

**Державний вищий навчальний заклад  
«Приазовський державний технічний університет»  
Міністерство освіти і науки України**

**Донбаська державна машинобудівна академія  
Міністерство освіти і науки України**

**Кваліфікаційна наукова  
праця на правах рукопису**

**Курпе Олександр Геннадійович**

УДК 621.771.23 : 621.771.06-114 :  
621.771.06-115 : 621.771.09 :  
620.178.4/6 : 620.186.5

**ДИСЕРТАЦІЯ**

**РОЗВИТОК НАУКОВИХ ОСНОВ ТЕРМОМЕХАНІЧНОЇ ПРОКАТКИ  
ПЛОСКОЇ МЕТАЛОПРОДУКЦІЇ З ОТРИМАННЯМ ПІДВИЩЕНОГО РІВНЯ  
МЕХАНІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ**

**05.03.05 – Процеси та машини обробки тиском**

Подається на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело.

\_\_\_\_\_ О.Г. Курпе

**Науковий консультант** Кухар Володимир Валентинович, доктор технічних наук, професор

**Маріуполь – 2020**

## АНОТАЦІЯ

*Курпе О.Г.* Розвиток наукових основ термомеханічної прокатки плоскої металопродукції з отриманням підвищеного рівня механічних властивостей. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.03.05 – процеси та машини обробки тиском. – Державний вищий навчальний заклад «Приазовський державний технічний університет», Міністерство освіти і науки України, Маріуполь, 2020. – Донбаська державна машинобудівна академія, Міністерство освіти і науки України, Краматорськ, 2020.

Дисертація спрямована на вирішення важливої науково-технічної та практичної проблеми розширення сортаменту продукції з підвищеним рівнем механічних властивостей, що виробляється на товстолистових та широкоштабових станах на підставі розвитку наукових основ процесу термомеханічної прокатки і розробки методик вдосконалення технології з різним конструктивним та структурним складом основного прокатного устаткування.

На підставі проведеного аналізу літературних джерел визначено проблеми і шляхи подальшого розвитку процесів термомеханічної прокатки. Виконано систематизацію технологічних етапів процесів термомеханічної прокатки в залежності від категорії міцності прокату та устаткування, яке використовується. Встановлено основні напрямки вдосконалення даної технології, яка знаходиться на межі обробки металів тиском та металознавства, через поглиблене вивчення зміння розподілу температурного поля прокату, дослідження впливу деформації на чорновій стадії прокатки на властивості металу, що є успадкованими, визначення впливу окремого прокатного устаткування на зміння температури прокату, дослідження енергосилових параметрів шляхом застосування вдосконалених методів математичного та фізичного моделювання.

Мета роботи полягає в розширенні сортаменту продукції з підвищеним рівнем механічних властивостей на товстолистових та широкоштабових станах на підставі розвитку наукових основ термомеханічної прокатки і розробки методик

вдосконалення технології з різним конструктивно-структурним складом основного прокатного устаткування.

Об'єкт дослідження є технології та устаткування для термомеханічної контрольованої прокатки товстолистого та рулонного прокату.

Тема роботи відповідає пріоритетними напрямками наукової, науково-технічної та інноваційної діяльності на 2018-2020 роки ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет».

Отримали подальший розвиток методи розробки та вдосконалення технологій термомеханічної прокатки на товстолистових та широкоштабових станах з різним конструктивно-структурним складом устаткування.

Розвинуто метод розрахунку розподілу температури по ширині штаби для умов прокатки в реверсивному стані з пічними моталками. Доведено необхідність врахування впливу конвекційного теплового потоку при зниженні температури підкату з 1100 °С до 800 °С, доля впливу якого в загальному тепловому потоці на крайці підкату збільшується з 1 % до 93 %. Встановлено, що впродовж кожного етапу нагрівання та охолодження перед прокаткою на стані Стеккеля, в діапазоні температур 830-790 °С різниця між температурою в центральній частині штаби по ширині та крайкою збільшується з початкових 8 °С до 44 °С, перед останнім проходом, що перевищує рекомендований для технології ТМСР перепад в 25 °С. Для збереження рекомендованого перепаду між температурою в центральній частині штаби та крайкою запропоновано корегування режиму нагрівання в пічній моталці стану Стеккеля, шляхом регулювання роботи пічних пальників, що розташовані біля вхідного/вихідного вікна.

Вперше для мікролегованої низьковуглецевої сталі марки 06Г2ДБ категорії міцності Х65 встановлено залежність зміни опору гарячої деформації від розміру зерна аустеніту та розміру зерна аустеніту від параметрів деформації. Шляхом поєднання дослідних даних по діаметру зерна аустеніту та високотемпературних пластометричних досліджень встановлено, що найбільш інтенсивне зменшення розміру зерна аустеніту марки сталі 06Г2ДБ категорії міцності Х65 при температурі

1050 °C відбувається при деформації від 10 % до 20 %, тобто з 51 мкм до 38 мкм, що становить 50 % в загальнодослідженому діапазоні. Подальше збільшення деформації з 20 % до 70 % є менш ефективним, так як зменшує зерно аустеніту лише з 38 мкм до 25 мкм, що сумарно також становить 50 % в загальнодослідженому діапазоні. Встановлено, що з метою отримання якомога більш дрібного розміру зерна аустеніту при чорновій прокатці мікролегованих марок сталі та подальшого успадкованого зерна фериту, зокрема сталі марки 06Г2ДБ (Х65), ступінь деформації за прохід має бути  $\geq 20$  %, раніше вважалося, що достатнім є ступінь деформації в 10 %.

Уточнено метод розрахунку впливу ступеня, швидкості і температури гарячої деформації на опір деформації при термомеханічній прокатці сталі категорії міцності Х70, що покладені в основу математичних моделей для його розрахунку.

Встановлено, на основі результатів лабораторних та теоретичних досліджень, що реологічні властивості сплаву 0Х18МФТ та сталей марок 15Х25Т, DD11, 65Г, Х80, Х70, Ст3сп при температурі деформації 1200-1000 °C, швидкості деформації  $u = 1 \text{ c}^{-1}$ , ступені деформації від 0,1-0,54 відн. од. наближені до реологічних властивостей свинцю марки ССу при температурі 20 °C та однакових деформаційно-швидкісних умовах. На підставі розрахованих поліноміальних залежностей отримано коефіцієнти пропорційності  $n_i$  та коефіцієнти змінення істинного опору деформації  $K_\sigma$ , які дозволяють розраховувати реологічні властивості сплаву 0Х18МФТ та сталей марок 15Х25Т, DD11, 65Г, Х80, Х70, Ст3сп на підставі отриманих реологічних властивостей свинцю марки ССу. Отримані залежності перевірено на фактичних даних чорнової прокатки товстих листів зі сталі категорії міцності Х70 на стані 3600 «МК «АЗОВСТАЛЬ», середня похибка становить 11,6 %, що підтверджує можливість моделювання силових параметрів прокатки марок сталі і сплаву, наближених до свинцю, в лабораторних умовах.

Вперше встановлено умови прокатки, при яких забезпечена максимальна рівномірність розподілу деформації по товщині в залежності від параметрів прокатки плоского розкату в чорнових проходах. Встановлено методом скінченно-елементного моделювання, що зменшення нерівномірності деформації по товщині підкату при

чорновій прокатці конструкційної марки сталі типу S355JR+AR досягається при ступені деформації 14-20 %, що забезпечує підвищення рівномірності розподілу успадкованих механічних властивостей по товщині. Запропоновано впровадження коефіцієнту  $K_{нд}$  для оцінки рівномірності деформації по товщині прокату. Встановлено, що при ступені деформації 14-20 %, температурі  $\leq 1150$  °C та показнику осередку деформації  $l_d/h_{cp} \geq 0,83$  коефіцієнт  $K_{нд}$  становить від 70 % до 92%. Визначено, що максимальне значення коефіцієнту  $K_{нд}$  не перевищує 92%, тому збільшення деформації більше за 20 % не є ефективним. Отримані результати дозволяють керувати рівномірністю розподілу механічних властивостей в готовому прокаті.

Підтверджено технічну можливість виробництва відносно тонкого прокату розмірами  $4 \times 3125 \times 16000$  мм за технологією гарячої, нормалізувальної та термомеханічної прокатки на товстолистовому стані 3200 заводу Tramet, Італія зі слябу товщиною 220 мм, замість слябу 150 мм, кількість якого є обмеженою. Умови прокатки забезпечено за рахунок скорочення часу пауз між проходами, що дозволило зберегти температуру розкату по проходах та температуру кінця прокатки не нижче за 820°C та, відповідно, утримати силові характеристики прокатки в межах встановлених обмежень. Розроблена технологія дозволяє забезпечити безперебійне виробництво прокату товщиною 4 мм на стані 3200 зі слябів товщиною 220 мм, які є в необхідному обсязі.

Уточнено метод розрахунку змінення середньомасової температури металу для умов нагрівання в пічній моталці стану Стеккеля вуглецевих та низьколегованих марок сталей, який покладено в основу аналітичних моделей для її розрахунку. Підтверджено, шляхом аналітичного моделювання, можливість впровадження технології термомеханічної прокатки рулонної штаби товщиною 12 мм зі сталі категорії міцності X65 на стані Стеккеля заводу Ferriera Valsider, Італія. При перевірці технічних можливостей наявного устаткування встановлено, що фактична потужності головних двигунів прокатного стану 3170 та прокатного стану 1780 є, відповідно, на 50 % та 20 % нижчою за необхідну для забезпечення максимальної

сили прокатки, що враховано при розробці технології прокатки. Отримано закономірності для розрахунку часу, який витрачається на втрати тепла випромінюванням та конвекцією, для умов прокатки на стані Стеккеля, і залежність, яка дозволяє визначати змінення температури металу в пічній моталці та додатково враховує усереднену теплоємність вуглецевих та низьколегованих сталей, що нагріваються, радіус барабану моталки та барабану з металом, довжину штаби, швидкість прокатки, за рахунок яких вдосконалено аналітичну модель технологічного процесу прокатки.

Впроваджено на стані 1700 «ММК ІМЕНІ ІЛЛІЧА» технологію термомеханічної прокатки рулонів конструкційного сортаменту зі сталей марок S355MC та S460MC, згідно зі стандартом EN 10149-2 та трубного сортаменту зі сталей марок B, X52M для подальшого виробництва електрозварних труб, згідно зі стандартом API-5L. Визначено, що додаткове додавання 0,014 % Nb при виробництві штаби товщиною 8 мм зі сталі марки X52M дозволяє підвищити границю плинності на 40 МПа, тимчасовий опір на 20 МПа, зменшує бал смугастості мікроструктури на поверхні та в центрі на 1-2 бали відповідно, що частково дозволяє компенсувати вплив недостатньої потужності установки прискореного охолодження на формування механічних властивостей.

Підтверджено шляхом промислового експерименту можливість впровадження технології термомеханічної прокатки товстолистового прокату для суднобудування зі сталі марки EN36 згідно з Правилами Bureau Veritas на стані 3600 «МК «АЗОВСТАЛЬ». Встановлено, що при порівняльному хімічному складі сталі, при термомеханічній прокатці отримано вищі механічні властивості, в том числі границя плинності +40 МПа, тимчасовий опір +37 МПа, ніж при термічній обробці нормалізацією.

На підставі розроблених методології керування якістю, методології освоєння нового сортаменту та технологічної стратегії обґрунтовано вибір прокатного стану 1700 та запропоновано варіант його модернізації. Обґрунтовано перелік устаткування, який буде змінено в ході реконструкції стану 1700, серед якого чорнова

реверсивна кліть, установка CoilBox, моталка, та розраховано його мінімально необхідні технічні характеристики для забезпечення виробництва термомеханічнообробленого прокату категорії міцності до X70. Для виконання проектних розрахунків розроблено залежність для визначення втрат температури розкату при змотуванні на установці CoilBox, яка враховує вплив швидкості змотування/розмотування, часу знаходження рулону на установці, а також додаткові втрати через вплив товщини підкату, температури на початковому етапі змотування і наприкінці розмотування, вплив ефекту «термосу» при витримуванні рулону у змотаному стані. Похибка запропонованої залежності перевірена на різноманітних фактичних та розрахункових даних та склала від -0,91 % / 0,39 % до -4,2 % / -6,4 %, що підтвердило можливість її використання. Запропонований проект прийнято до реалізації на комбінаті «ММК ІМЕНІ ІЛЛІЧА».

**Ключові слова:** термомеханічна прокатка, товстолистові стани, безперервні стани, прокат трубного призначення, конструкційний прокат, температурний режим прокатки, моделювання технологічних процесів, скінченно-елементний метод, фізичне моделювання.

## SUMMARY

*Kurpe O.H.* Development of scientific bases of thermomechanical rolling of flat rolling products with obtaining the increased level of mechanical properties. - Qualifying scientific work on the rights of the manuscript.

The dissertation on competition of a scientific degree of the doctor of technical sciences on a specialty 05.03.05 – Processes and Machines of Plastic Working. – Priazovsky State Technical University, the Ministry of Education and Science of Ukraine, Mariupol, 2020. – Donbass State Engineering Academy, the Ministry of Education and Science of Ukraine, Kramatorsk, 2020.

The dissertation is aimed at solving an important scientific, technical and practical problem of expanding the product mix with a high level of mechanical properties, produced on plate and strip mills based on the development of scientific bases of thermomechanical rolling process and development of methods for improving technology with different construction and structural composition basic rolling equipment.

Based on the analysis of literature sources, the problems and ways of further development of thermomechanical rolling processes are identified. The systematization of technological stages of thermomechanical rolling processes depending on the category of rolling strength and the equipment used is performed. The main directions of improvement of this technology, which is on the verge of plastic metal working and materiology, through in-depth study of changes in the temperature field of rolled products, study of the effect of deformation at the roughing rolling on inherited metal properties, determining the impact of individual rolling equipment on temperature change of rolled products, research of power parameters by application of advanced methods of mathematical and physical modeling.

The purpose of the work is to expand the product mix with a high level of mechanical properties on plates and strip mills on the basis of the development of scientific bases of thermomechanical rolling and development of methods to improve technology with different structural and structural composition of basic rolling equipment.



The object of research is technologies and equipment for thermomechanical controlled rolling of plate and coil rolled products.

The theme of the work corresponds to the priority areas of scientific, scientific-technical and innovative activities for 2018-2020 Priazovsky State Technical University.

Methods of development and improvement of thermomechanical rolling technologies on plate and strip mills with different construction and structural composition of the equipment were further developed.

A method for calculating the temperature distribution over the width of the staff for rolling conditions in the reversible mill with furnace coilers has been developed. The necessity to take into account the influence of convective heat flux when reducing the rolling temperature from 1100 °C to 800 °C, the influence share of which in the total heat flux at the edge of the rolling products increases from 1% to 93%. It was found that during each stage of heating and cooling before rolling on the Steckel mill, in the temperature range 830-790 °C the temperature difference in the central part of the strip width and edge increases from the initial 8 °C to 44 °C before the last pass exceeding the recommended for technology TMCP difference of 25 °C. To maintain the recommended temperature difference in the central part of the strip and the edge, it is proposed to adjust the heating mode in the furnace coilers of the Steckel mill by adjusting the operation of the furnace burners located near the inlet / outlet window.

For the first time for microalloyed low-carbon steel grade 06G2DB strength group X65 the dependence of the change of hot deformation resistance on the austenite grain size and austenite grain size on the deformation parameters was established. By combining experimental data on austenite grain diameter and high-temperature plastometric studies, it was found that the most intensive reduction in austenite grain size of steel grade 06G2DB strength category X65 at a temperature of 1050 °C occurs at deformation from 10% to 20%, i.e from 51 µm to 38 µm, which is 50% in the study range. A further increase in strain from 20% to 70% is less effective as it reduces the austenite grain from only 38 µm to 25 µm, which in total is also 50% in the study range. It was found that in order to obtain the smallest possible grain size of austenite, in roughing rolling of microalloyed steel grades and

subsequent inherited ferrite grain, in particular steel grade 06G2DB (X65), the reduction per pass should be  $\geq 20\%$ , previously considered sufficient reduction in  $10\%$ .

The method of calculating the influence of the reduction, strain rate and temperature of deformation on the deformation resistance during thermomechanical rolling of steel of strength group X70, which are the basis of mathematical models for its calculation, is specified.

It is established, on the basis of results of laboratory and theoretical researches, that rheological properties of alloy 0X18MFT and steel grades 15X25T, DD11, 65G, X80, X70, St3sp at deformation temperature  $1200-1000\text{ }^{\circ}\text{C}$ , strain rate  $u = 1\text{ c}^{-1}$ , engineering deformation from  $0.1-0.54\text{ Rel.}$  from close to the rheological properties of SSu grade lead at a temperature of  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$  and the same deformation-rate conditions. Based on the calculated polynomial dependences, the coefficients of proportionality  $n_i$  and the coefficients of change of the true deformation resistance  $K_{\sigma}$  are obtained, which allow to calculate the rheological properties of alloy 0X18MFT and steel grades 15X25T, DD11, 65G, X80, X70, St3sp on the basis of the obtained properties of SSu grade lead. The obtained dependences are checked on the actual data on the results of roughing rolling of plates of steel grade X70 at the rolling mill 3600 AZOVSTAL IRON & STEEL WORKS, the average error is  $11.6\%$ , which confirms the possibility of modeling the rolling force parameters of steel and alloy grades close to lead, in the laboratory.

For the first time the rolling conditions at which the maximum uniformity of distribution of deformation on thickness depending on parameters of rolling of flat semi-rolling products at rolling in roughing passes is provided are established. It is established by the finite-elements method that the reduction of non-uniformity of deformation along the thickness of semi-rolling products during roughing rolling of structural grade steel type S355JR + AR is achieved at a reduction of  $14-20\%$ , which increases the uniformity of inherited mechanical properties. It is proposed to introduce the coefficient  $K_{nd}$  to estimate the uniformity of deformation in the thickness of the rolled products. It is established that at the reduction  $14-20\%$ , temperature  $\leq 1150\text{ }^{\circ}\text{C}$  and deformation zone index  $l_d/h_{av} \geq 0.83$  the coefficient  $K_{nd}$  is from  $70\%$  to  $92\%$ . It is determined that the maximum value of the

coefficient  $K_{nd}$  does not exceed 92%, so increasing the deformation by more than 20% is not effective. The obtained results allow to control the uniformity of the distribution of mechanical properties in the finished products.

The technical feasibility of production of relatively thin rolled products with dimensions of  $4 \times 3125 \times 16000$  mm by the technology of hot, normalized and thermomechanical rolling at the plate mill 3200 of Tramet plant, Italy from thick slab 220 mm, instead of thick slab 150 mm, the quantity of which is limited is confirmed. Rolling conditions are ensured by reducing the pause time between passes, which allowed to keep the rolling temperature on the passes and the temperature of the end of rolling not lower than 820 °C and, accordingly, to keep the rolling power characteristics within the established limits. The developed technology allows to provide uninterrupted production of rolled products with a thickness of 4 mm at the rolling mill 3200 from slabs with a thickness of 220 mm which are in necessary volume.

The method of calculating the change in the average mass temperature of the metal for the heating conditions in the furnace coilers at the Steckel mill of carbon and low-alloy steels is specified, which is the basis of analytical models for its calculation. The possibility of introducing the technology of thermomechanical rolling of 12 mm thick coils of steel of strength category X65 at the Steckel mill of the Ferreria Valsider plant, Italy was confirmed by analytical modeling. When checking the technical capabilities of the existing equipment, it was found that the actual power of the main engines of the rolling mill 3170 and rolling mill 1780 is 50% and 20% lower than necessary to ensure maximum rolling power, which is taken into account in the development of rolling technology. Regularities are obtained for calculating the time spent on heat loss by radiation and convection, for rolling conditions at the Steckel mill, and the dependence, which allows to determine the change in metal temperature in the furnace coilers and additionally takes into account the average heating capacity of heated carbon steels and low-alloy steels, the radius of the coiler drum with metal and the drum with metal, the length of the strip, the speed of rolling, due to which improved the analytical model of the technological process of rolling.

The technology of thermomechanical rolling of coils of structural rolled products from steels of grades S355MC and S460MC, according to the standard EN 10149-2 and pipe rolled products from steels of grades B, X52M for further production of electric welded pipes, according to standard API-5L implemented at the rolling mill 1700 ILYICH IRON AND STEEL WORKS. It is determined that the additional addition of 0.014% Nb in the production of strips with a thickness of 8 mm steel grade X52M can increase the yield strength by 40 MPa, tensile strength by 20 MPa, reduces the score stripe microstructure on the surface and in the center by 1-2 points, respectively, allows to compensate influence of insufficient power of installation of the accelerated cooling on formation of mechanical properties.

The possibility of introducing the technology of thermomechanical rolling of plate for shipbuilding from EH36 steel in accordance with the Rules of Bureau Veritas at the mill 3600 of AZOVSTAL IRON & STEEL WORKS was confirmed by an industrial experiment. It is established that at comparative chemical composition of steel, at thermomechanical rolling higher mechanical properties, including yield strength of +40 MPa, tensile strength of +37 MPa are received, than at heat treatment by normalization.

On the basis of the developed methodology of quality management, methodology of development of the new product mix and technological strategy the choice at the rolling mill 1700 is substantiated and the variant of its modernization is offered. The list of equipment that will be changed during the reconstruction at the rolling mill 1700, including a roughing reversible stand, CoilBox, coiler, is substantiated and its minimum necessary technical characteristics are calculated to ensure the production of thermomechanical rolled products with strength category up to X70. To perform project design calculations, a dependence was developed to determine the loss of semi-rolling products temperature during coiling on the CoilBox, which takes into account the influence of coiling / uncoiling speed, rolling time on the installation, as well as additional losses due to rolling thickness, temperature at the initial coiling and at the end uncoiling, the effect of the "thermos" effect when keeping the roll in a coiled state. The error of the proposed dependence was checked on various factual and calculated data and ranged from -0.91% / 0.39% to -4.2% / -6.4%, which confirmed the

possibility of its use. The proposed project was accepted for implementation at the plant ILYICH IRON AND STEEL WORKS.

**Keywords:** thermomechanical rolling, plate rolling mills, continuous rolling mills, rolling products for pipe, structural rolling products, temperature rolling schedule, modeling of technological processes, finite-element method, physical modeling.

### Список публікацій за темою дисертації

Наукові праці, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації:

*Монографії:*

1. Кухарь, В.В., Присяжный, А.Г., Балалаева, Е.Ю., Тузенко, О.А., Курпе, А.Г., Анищенко, А.С., Кармазина, И.В. (2018), *Управление тепловым состоянием тонколистового проката для повышения равномерности распределения механических свойств*, ПГТУ, Мариуполь, 144 с. ISBN 978-966-604-243-2.

2. Kurpe, O., Kukhar, V. (2018), “Mastering high-strength shipbuilding steel plate production using thermo-mechanical controlled process (TMCP) at the rolling mill 3600”, *Engineering sciences: Development prospects in countries of Europe at the beginning of the third Millennium: Collective monograph*, Stalowa Wola, Poland, Vol. 1, pp. 281-298. ISBN 978-9934-571-63-3.

3. Kurpe, O., Kukhar, V. (2018), “Developing of Manufacturing Technology for Hot Rolling Coils (Steel Grade S355MC) at the Wide-Strip Rolling Mill 1700”, *Scientific development and Achievements*, Science publishing London, Vol. 5, pp. 260-270. ISBN 978-1-9993071-0-3.

4. Kukhar, V.V., Kurpe, O.H., Klimov, E.S., Prysiashnyi, A.H., Anishchenko, O.S. (2020), “Research and Improvement of Rolling Parameters at the Steckel Mill”, *Intellectual capital is the foundation of innovative development innovative engineering and technology, informatics: Monographic series «European Science» Book 3. Part 3*, ScientificWorld-

NetAkhatAV, Karlsruhe, pp. 60-78. ISSN 2709-2313. DOI: 10.21893/2709-2313.2020-03-03-052.

*Публікації у фахових виданнях України:*

5. Кухарь, В.В., Курпе, А.Г. (2018), “Уточнение методики расчета тепловых потерь металла на непрерывных станах горячей прокатки”, *Обработка материалов давлением: сб. науч. тр. ДГМА, ДГМА, Краматорск, № 1 (46)*, сс. 159-166.

6. Курпе, О.Г., Кухар, В.В., Змазнева, Є.В. (2018), “Уточнення розрахунку теплових втрат металу на станах Стеккеля”, *Проблеми трибології = Problems of Tribology, № 1*, pp. 78-84.

7. Курпе, О.Г., Кухар, В.В. (2018), “Освоєння виробництва прокату товщиною 1,2 мм на стані 1700 ПрАТ «ММК ІМЕНІ ІЛЛІЧА»”, *Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки, №5 (265)*, сс. 171-175.

8. Курпе, О.Г., Кухар, В.В., Присяжний, А.Г. (2018), “Перевірка математичної моделі технологічного процесу прокатки на стані Стеккеля заводу Ferriera Valsider SpA”, *Mechanics and Advanced Technologies, № 3 (84)*, сс. 98-105.

9. Курпе, О.Г., Кухар, В.В. (2019), “Вдосконалення математичної моделі зміни температурного поля смуги перед термомеханічною прокаткою на стані Стеккеля”, *Вісник НТУ «ХПІ». Сер. Інноваційні технології та обладнання обробки матеріалів у машинобудуванні та металургії, № 11 (1336)*, сс. 31-35.

10. Курпе, А.Г., Изотов, Б.В., Лаштун, А.И., Коткова, Е.Ю., Негрий, С.Д. (2017), “Разработка и внедрение модели нормирования расхода топлива в методических печах стана 1700 в рамках функционирования системы энергетического менеджмента ISO 50001:2011”, *Металл и литье Украины, № 1*, сс. 35-42.

11. Курпе, А.Г., Васильченко, С.Е., Негрий, С.Д., Шебаниц, О.Н. (2017), “Освоение технологии термомеханической контролируемой прокатки на стане 1700”, *Металл и литье Украины, № 1*, сс. 54-56.

12. Курпе, О.Г., Кухар, В.В. (2018), “Варіант модернізації стану 1700 ПрАТ «ММК ІМЕНІ ІЛЛІЧА»”, *Вісник НТУ «ХПІ». Сер. Інноваційні технології та*

обладнання обробки матеріалів у машинобудуванні та металургії, № 23 (1299), сс. 33-38.

13. Курпе, О.Г., Кухар, В.В. (2018), “Синхронізація роботи клітей чорнової групи стану 1700 ПРАТ «ММК ІМ. ІЛЛІЧА»”, *Вісник приазовського державного технічного університету. Сер. Технічні науки*, Вип. 37, сс. 29-34.

14. Курпе, О.Г., Кухар, В.В. (2018), “Розширення сортаменту листового прокату в умовах металургійного заводу в Італії”, *Вчені записки Таврійського національного університету імені В. І. Вернадського. Технічні науки*, № 3, т. 29 (68), сс. 121-126.

15. Курпе, О.Г. (2018), “Проектування технології виробництва рулонного прокату для труб на стані Стеккеля заводу «FERRIERA VALSIDER» (ІТАЛІЯ)”, *Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки*, № 6, т. 2, сс. 53- 59.

16. Курпе, О.Г., Кухар, В.В., Шибаніц, О.М. (2018), “Виробництво дослідної партії та оцінка якості рулонів з марки сталі S355MC на стані 1700 ПРАТ «ММК ІМЕНІ ІЛЛІЧА»”, *Збірник наукових праць Дніпровського державного технічного університету (технічні науки). Тематичний випуск Машина І Пластична Деформація Металу*, Кам’янське, сс. 36-44.

17. Курпе, О.Г., Кухар, В.В. (2018), “Освоєння виробництва гарячекатаних рулонів зі сталі марки S460MC на широкосмуговому стані 1700”, *Проблеми трибології = Problems of Tribology*, Хмельницький, № 3, сс. 61-69.

18. Курпе, О.Г., Кухар, В.В., Шибаніц, О.М. (2018), “Освоєння виробництва гарячекатаних рулонів із марки сталі В для подальшого виробництва труб згідно з вимогами API-L на стані 1700 ПРАТ «ММК ІМЕНІ ІЛЛІЧА»”. *Вчені записки Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського Серія: Технічні науки*, № 6, Т. 29 (68), Част. 2, сс. 56-63.

19. Курпе, О.Г., Кухар, В.В., Шибаніц, О.М. (2018), “Освоєння виробництва гарячекатаних рулонів зі сталі марки X52M для подальшого виробництва труб згідно з вимогами API-5L, на стані 1700 ПРАТ «ММК ІМЕНІ ІЛЛІЧА»”, *Вісник КрНУ імені*

Михайла Остроградського. *Сучасні технології в машинобудуванні, транспорті та гірництві*, Вип. 5(112), сс. 65-74.

20. Курпе, О.Г. (2018), “Термомеханічна прокатка товстих листів зі сталі марки ЕНЗ6 на стані 3600 ПрАТ «МК «АЗОВСТАЛЬ»”, *Обработка материалов давлением: сб. науч. труд, ДГМА, Краматорск, № 2 (47)*, сс. 146-155.

21. Kurpe, O.H., Kukhar, V.V. (2019), “Pilot production development of plate, steel grade EN36 applying thermo-mechanical controlled process at the rolling mill 3600”, *Проблеми трибології = Problems of Tribology, Хмельницький, Vol. 92, № 2*, сс. 33-41.

22. Кухар, В.В., Курпе, О.Г. (2020), “Фізичне моделювання силових процесів чорнової гарячої прокатки”, *Вчені записки Таврійського національного університету імені В. І. Вернадського. Технічні науки, № 3, т. 31 (70)*, сс. 185-190. DOI: <https://doi.org/10.32838/TNU-2663-5941/2020.3-1/29>.

23. Курпе, О.Г., Кухар, В.В. (2020), “Дослідження процесів рекристалізації в умовах термомеханічного процесу прокатки сталі марки Х65”, *Вісник КрНУ імені Михайла Остроградського. Матеріалознавство, Вип. 2(121)*, сс. 122-128. DOI: [10.30929/1995-0519.2020.2.122-128](https://doi.org/10.30929/1995-0519.2020.2.122-128).

24. Кухар, В.В., Курпе, О.Г. (2020), “Визначення реологічної подоби свинцю та сталей для плоскої гарячої прокатки”, *Збірник наукових праць національного гірничого університету. Матеріалознавство та галузеве машинобудування, №61*, сс. 153-162. DOI: <https://doi.org/10.33271/crpnmu/61.153>.

25. Kurpe, O., Kukhar, V. (2020), “Investigation of the hot rolling process at the Steckel mill by means of modeling by the finite-element method”, *Scientific Journal of the Ternopil National Technical University, № 2 (98)*, pp. 68-79. DOI: [https://doi.org/10.33108/visnyk\\_tntu2020.02](https://doi.org/10.33108/visnyk_tntu2020.02).

26. Курпе, О.Г., Кухар, В.В., Присяжний, А.Г. (2020), “Удосконалення та апробація методології керування якістю листового металопрокату”, *Обработка материалов давлением: сб. науч. тр. / ДГМА, ДГМА, Краматорск, № 1 (50)*, сс. 228- 235.



27. Курпе, О.Г., Кухар, В.В. (2020), “Визначення умов проникнення деформації по товщині прокату на стані Стеккеля”, *Обработка материалов давлением: сб. науч. тр. / ДГМА, ДГМА, Краматорск, № 1 (50)*, сс. 249-258.

*Публікації у виданнях, що входять до міжнародних наукометричних баз даних:*

28. Zinchenko, Yu.A., Kurpe, A.G., Bagmet, O.A. (2008), “Prospects of the technology used to make skelp at the Azovstal metallurgical combine”, *Metallurgist*, Vol. 52, №. 7-8, pp. 461-463. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11015-008-9065-4>. (Scopus)

29. Kukhar, Volodymyr., Kurpe, Oleksandr., Klimov, Eduard., Balalayeva, Elena., Dragobetskii, Vladimir. (2018), “Improvement of the Method for Calculating the Metal Temperature Loss on a Coilbox Unit at The Rolling on Hot Strip Mills”, *International Journal of Engineering & Technology*, 7(4.3), pp. 35-39. DOI: <http://dx.doi.org/10.14419/ijet.v7i4.3.19548>. (Scopus)

30. Kurpe, O., Kukhar, V., Klimov, E., Prysiaznyi, A. (2018), “Thermomechanical Controlled Rolling of Hot Coils of Steel Grade S355MC at the Wide-Strip Rolling Mill 1700”, *Materials Properties and Technologies of Processing, Solid State Phenomena*, Vol. 291, pp. 63-71. DOI: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/SSP.291.63>. (Scopus)

31. Kurpe, O.H., Kukhar, V.V., Klimov, E.S., Chernenko, S.M. (2020), “Improvement of Process Parameters Calculation for Coil Rolling at the Steckel Mill”, *Materials Science and Metallurgical Technology II. Materials Science Forum*, Vol. 989, pp. 609-614. DOI: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.989.609>. (Scopus)

32. Kurpe, O.H., Kukhar, V.V. (2018), “Development and Optimization of Flat Products Manufacturing at Rolling Mill 3200”, *Materials Science and Metallurgical Technology. Materials Science Forum*, Vol. 946, pp. 794-799. DOI: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.946.794>. (Scopus)

33. Kurpe, O., Kukhar, V., Klimov, E., Chernenko, S., Balalayeva, E. (2020), “Implementation of Pipe Steel Grade X52M Manufacturing according to API-5L Requirements Applied to Hot Rolling Mills "1700", *2nd International Conference on Design, Simulation, Manufacturing: The Innovation Exchange, Lutsk, Ukraine, Springer*

*Nature Switzerland AG*, pp. 418- 429. DOI: [https://doi.org/10.1007/978-3-030-22365-6\\_42](https://doi.org/10.1007/978-3-030-22365-6_42). (Scopus)

34. Kurpe, Oleksandr., Kukhar, Volodymyr., Puzyr, Ruslan., Burko, Vadym., Balalayeva, Elena., Klimov, Eduard. (2020), “Electric Motors Power Modes at Synchronization of Roughing Rolling Stands of Hot Strip Mill”, *25th IEEE International Conference on Problems of Automated Electric Drive. Theory and Practice. Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University, Ukraine*, pp. 510-513. DOI: 10.1109/PAEP49887.2020.9240818. (Scopus)

*Публікації у виданнях, що не входять до переліку фахових:*

35. Кухар, В.В., Курпе, О.Г. (2018), “Розробка технології виробництва листового прокату товщиною 4 мм на стані 3200 заводу Trametel SpA”, *Металлургическая и горнорудная промышленность*, № 2, сс. 24-29.

36. Капланов, В.И., Володарский, В.В., Курпе, А.Г., Носоченко, А.О., Сагиров, Р.И., Ганошенко, И.В., Матросов, Ю.И. (2007), “Исследование прочностных свойств стали категории прочности X70 и X80”, *Производство проката. Москва: Наука и Технологии*, №2, сс. 7-10.

37. Капланов, В.И., Курпе, А.Г., Володарский, В.В., Сагиров, Р.И. (2007), “Анализ математической модели технологического процесса прокатки на стане 3600 ОАО «МК «Азовсталь»”, *Производство проката. Москва: Наука и Технологии*, № 8, сс. 12-14.

*Наукові праці апробаційного характеру:*

38. Капланов, В.И., Курпе, А.Г. (2009), “Усовершенствованная зависимость для определения пластических свойств стали категории прочности X70”, *Университетская наука – 2009: тез. докл. Междунар. науч.-техн. конф., ПГТУ, Мариуполь*, сс. 156-157.

39. Курпе, А.Г. (2010), “Освоение производства рулонного проката для труб на стане Стеккеля”, *Университетская наука – 2010: тез. докл. Междунар. науч.-техн. конф., ПГТУ, Мариуполь, т. 1*, сс. 158-159.

40. Курпе, А.Г. (2010), “Проектирование технологии производства рулонного проката для труб на стане Стеккеля”, *Труды восьмого конгресса прокатчиков. МОО «Объединение прокатчиков», ОАО «Магнитогорский металлургический комбинат», ГОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.Н. Носова». Магнитогорск, т. 2, сс. 123-130.*

41. Капланов, В.И, Курпе, А.Г, Змазнева, Е.В. (2011), “Особенности проектирования технологии прокатки рулонов на стане Стеккеля”, *Университетская наука – 2011: тез. докл. Междунар. науч.-техн. конф. Металлургический факультет, ПГТУ, Мариуполь, сс. 144-145.*

42. Курпе, А.Г, Змазнева, Е.В. (2018), “Анализ режимов деформации на стане Стеккеля”, *Университетская наука – 2012: тез. докл. Междунар. науч.-техн. конф., ПГТУ, Мариуполь, т. 1, сс. 236-237.*

43. Курпе, О.Г, Кухар, В.В., Присяжний, А.Г. (2018), “Перевірка математичної моделі процесу прокатки на стані Стеккеля щодо умов заводу Feeriera Valsider SpA”, *Теоретичні та практичні проблеми в обробці металів тиском і якості фахової освіти: «Київський політехнічний інститут»: матеріали 9 міжнародної технічної конференції, сс. 152-156.*

44. Курпе, А.Г, Кухар, В.В., Березка, В.В. (2018), “Уточненная методика расчета изменения температуры раската при прокатке на стане Стеккеля”. *Сучасні технології в механіці: збірник наукових праць. Укл. Скиба М. Є., Олександренко В. П., ФОП Мельник А. А., Хмельницький, сс. 11-13.*

45. Курпе, О.Г, Кухар, В.В. (2019), “Математична модель зміни температурного поля смуги перед прокаткою на стані Стеккеля”, *Перспективи розвитку машинобудування та транспорту: тези I Міжнар. наук.-техн. конф. Вінниця: ВНТУ, сс. 88-89.*

46. Курпе, О.Г., Кухар, В.В. (2019), “Оцінка впливу конвекційного теплообміну в розрахунках зміни температурного поля смуги при термомеханічній прокатці”, *Теоретичні та практичні проблеми в обробці матеріалів тиском і якості фахової*

освіти: тези X Міжнар. наук.-техн. конф. КПІ ім. Ігоря Сікорського, Херсонський національний технічний університет. Київ-Херсон, сс. 65-66.

47. Курпе, О.Г., Кухар, В.В. (2019), “Математичне моделювання зміни температурного поля смуги на стані Стеккеля”, *Ресурсозбереження та енергоефективність процесів і обладнання обробки тиском у машинобудуванні та металургії: Матеріали XI Міжнар. наук.-техн. конф., Харків*, сс. 88-89.

48. Курпе, А.Г., Негрій, С.Д. (2014), “Оптимизация параметров прокатки полос в черновой группе ЛПЦ-1700”, *Университетская наука – 2014: тез. докл. Междунар. науч.-техн. конф., ПГТУ, Мариуполь, т. 1*, сс. 158-159.

49. Курпе, А.Г., Негрій, С.Д., Изотов, Б.В., Васильченко, С.Е. (2015), “Расширение транзитного сортамента горячекатаных рулонов в ЛПЦ-1700”, *Университетская наука – 2015: тез. докл. Междунар. науч.-техн. конф., ПГТУ, Мариуполь*, сс. 126-127.

50. Курпе, А.Г., Негрій, С.Д., Чабан, В.В., Изотов, Б.В., Лаштун, А.И., Коткова, Е.Ю., Кшевицкая, Т.С., Литовчук, В.В., Шаламов, Ю.Н. (2015), “Освоение технологии нагрева слябов толщиной 250 мм в нагревательных колодцах ЛПЦ-1700”, *Университетская наука – 2015: тез. докл. Междунар. науч.-техн. конф., ПГТУ, Мариуполь*, сс. 175-176.

51. Шаламов, Ю.Н., Курпе, А.Г., Изотов, Б.В., Лаштун, А.И., Литовчук, В.В., Васильченко, С.Е., Негрій, С.Д., Медведев, В.В. (2017), “Освоение и развитие технологии нагрева непрерывнолитых слябов толщиной 250 мм в теплотехнических агрегатах ЛПЦ-1700 ЧАО «ММК им. Ильича»”, *Университетская наука – 2017: тез. докл. Междунар. науч.-техн. конф., ПГТУ, Мариуполь, т. 1*, сс. 213-214.

52. Шаламов, Ю.Н., Курпе, А.Г., Изотов, Б.В., Лаштун, А.И., Коткова, Е.Ю., Негрій, С.Д. (2017), “Разработка модели нормирования расхода топлива, функционирующей в рамках системы энергетического менеджмента ISO 50001:2011, на примере методических печей ЛПЦ-1700 ЧАО «ММК им. Ильича»”, *Университетская наука – 2017: тез. докл. Междунар. науч.-техн. конф., ПГТУ, Мариуполь, т. 1*, сс. 214-215.

53. Курпе, О.Г., Кухар, В.В., Глебова, Ю.М., Березка, В.В. (2018), “Розрахунок втрат температури розкату на безперервних листових станах гарячої прокатки при використанні установки COILBOX”, *Университетская наука – 2018: тез. докл. Междунар. науч.-техн. конф., ГВУЗ «ПГТУ», Мариуполь, т. 1*, сс. 114-115.

54. Курпе, А.Г., Горлаков, А.Б. (2010), “Перспективные требования к сталям и листовому прокату для изготовления труб магистральных газонефтепроводов и их реализация в условиях ОАО «МК «Азовсталь»”, *Университетская наука – 2010: тез. докл. Междунар. науч.-техн. конф., ПГТУ, Мариуполь, т. 1*, сс. 159-160.

55. Курпе, А.Г., Негрий, С.Д., Васильченко, С.Е. (2016), “Термомеханическая прокатка рулонов на стане 1700”, *Университетская наука – 2016: тез. докл. Междунар. науч.-техн. конф., ПГТУ, Мариуполь*, сс. 109-110.

56. Курпе, А.Г., Шебаниц, О.Н. Васильченко, С.Е. (2017), “Освоение технологии производства рулонов для труб по API-5L на стане ЛПЦ-1700”, *Университетская наука – 2017: тез. докл. Междунар. науч.-техн. конф., ПГТУ, Мариуполь, т. 1*, сс. 195- 196.

57. Курпе, О.Г., Кухар, В.В., Шебаниц, О.М. (2018), “Виробництво дослідної партії та оцінка якості рулонів з марки сталі S355MC на стані 1700 ПРАТ «ММК ІМЕНІ ІЛІЧА»”, *Машины і пластична деформація металу: тез. IV Междунар. науч.-техн. конф. Кам'янське, Дніпро: Дніпровський державний технічний університет НТУ «Дніпровська політехніка»*, сс. 22-23.

58. Kurpe, O., Kukhar, V., Shebanits, O. (2018), “Development of pilot batch and grade estimation of coils of steel grade S355MC at rolling mill "1700", PJSC "ILYICH IRON AND STEEL WORKS", *Physical & Chemical Geotechnologies – 2018: Materials of the International Scientific & Practical Conference (Program of report) = Фізико-хімічні геотехнології – 2018: Матеріали міжнар. наук.-практ. конф. (програма виступів), м. Дніпро, 10-11 жовтня 2018 р. / ред. кол.: Р.О. Дичковський, О.М. Шашенко, П.Б. Саїк, В.Г. Лозинський. Дніпро: НТУ «Дніпровська політехніка»*, сс. 107-109.

59. Kurpe, O., Kukhar, V., Klimov, E., Chernenko, S., Balalayeva, E. (2019), "Implementation of Pipe Steel Grade X52M Manufacturing according to API-5L Requirements Applied to Hot Rolling Mills "1700", *The Innovation Exchange: 2<sup>nd</sup> International Conference on Design, Simulation, Manufacturing. Book of Abstracts (June 11-14, 2019 y.), Lutsk, Ukraine*, p. 101.

60. Курпе, А.Г. (2012), "Опробование технологии термомеханической прокатки листов из судостали на стане 3600", *Университетская наука – 2012: тез. докл. Междунар. науч.-техн. конф., ПГТУ, Мариуполь, т. 1*, сс. 236-237.

61. Зинченко, Ю.А., Курпе, А.Г, Багмет, О.А. (2009), "Перспективы развития технологии производства штрипса в ОАО «МК «Азовсталь»", *Современные тенденции разработки и производства сталей и труб для магистральных газонефтепроводов: Сб. докладов, Металлургиздат, Москва*, сс. 76-77.

62. Курпе, О.Г. , Кухар, В.В. , Захаров, М.П. , Пертік, Д.І. (2019), "Розробка та відпрацювання технології термомеханічної контрольованої прокатки рулонної сталі за європейськими Стандартами", *Університетська наука – 2019: тези доп. Міжнар. науково-техн. конф., ПДТУ, Мариуполь, т.1*, сс. 39-41.

63. Курпе, О.Г., Кухар, В.В., Мирвода, К.Ю., Пертік, Д.І., Захаров, М.П. (2019), "Досягнення показників якості рулонного металопродукату зі сталей за Європейськими Стандартами, що вироблені в умовах НШПС 1700", *Університетська наука – 2019: тези доп. Міжнар. науково–техн. конф., ПДТУ, Мариуполь, т.1*, с. 41.

64. Кухар, В.В., Курпе, О.Г., Захаров, М.П., Калатало, А.В. (2020), "Недоліки та перспективи розвитку технології та устаткування ширококуглових станів гарячої прокатки", *Університетська наука – 2020: тези доп. Міжнар. науково–техн. конф., ПДТУ, Мариуполь, т.1*, сс. 56–57.

Опубліковані праці, які додатково відображають наукові результати дисертації:

65. Лівшиц, Д.А., Зінченко, Ю.А., Шахпазов, Є.Х., Матросов, Ю.І., Ганошенко, І.В., Гоман, С.В., Шалімов, С.Я., Кумуржи, Є.В., Володарський, В.В., Лоскутов, О.Ю., Койфман, О.А., Курпе, О.Г. (2012), "Спосіб виробництва сталевих високоміцних електрозварних одношовних труб великого діаметра для магистральних

трубопроводів”, *пат. 98214 Україна: МПК (2012.01), B21C 37/08 (2006.01) B21B 1/32 (2006.01) C22C 38/00 C21D 8/02 (2006.01) C21D 8/10 (2006.01) B23K 9/025 (2006.01), № а 2010 11473; заявл. 27.09.2010; опубл. 25.04.2012, Бюл. № 8. (патент на винахід).*

66. Лівшиц, Д.А., Зінченко, Ю.А., Шахпазов, Є.Х., Матросов, Ю.І., Ганошенко, І.В., Гоман, С.В., Шалімов, С.Я., Кумуржи, Є.В., Володарський, В.В., Лоскутов, О.Ю., Койфман, О.А., Курпе, О.Г. (2011), “Спосіб виробництва сталевих високоміцних електрозварних двошовних труб великого діаметра для магістральних трубопроводів”, *пат. 96097 Україна: МПК (2011.01), B21C 37/08 (2006.01) C22C 38/00 C21D 1/00 B21B 1/22 (2006.01) B23K 9/00, № а201011469; завл. 27.09.2010; опубл. 26.09.2011, Бюл. № 18. (патент на винахід).*

67. Лівшиц, Д.А., Третьяков, О.Б., Ковура, О.Б., Зінченко, Ю.А., Кумуржи, Є.В., Чубань, А.М., Койфман, О.А., Курпе, О.Г., Змазнева, Є.В. (2010), “Спосіб нагрівання і підготовки заготовок перед прокаткою у станах гарячої прокатки”, *пат. 92950 Україна: МПК C21D 9/00, F27B 9/00, F27B 9/30, F27D 3/00, № а 2009 00161; заявл. 09.01.2009; опубл. 27.12.2010, Бюл. № 24. (патент на винахід).*

68. Зінченко, Ю.А., Пісмарьов, К.Є., Курпе, О.Г., Мурашкін, О.В., Васильченко, С.Є., Меркулова, Н.О., Чаленко, О.Г., Негрій, С.Д., Куліш, С.В. (2016), “Спосіб виробництва гарячекатаного прокату підвищеної міцності”, *пат. 110812 Україна: МПК B21B 1/46 (2006.01), № и 2016 03353; заявл. 31.03.2016; опубл. 25.10.2016, Бюл. № 20. (патент на корисну модель).*

69. Зінченко, Ю.А., Пісмарьов, К.Є., Курпе, О.Г., Мурашкін, О.В., Васильченко, С.Є., Меркулова, Н.О., Чаленко, О.Г., Негрій, С.Д., Куліш, С.В. (2017), “Спосіб виробництва гарячекатаного прокату підвищеної міцності”, *пат. 121374 Україна: МПК B21B 1/46 (2006.01), № и 2017 01785; заявл. 24.02.2017; опубл. 11.12.2017, Бюл. № 23. (патент на корисну модель).*

70. Зінченко, Ю.А., Пісмарьов, К.Є., Курпе, О.Г., Змазнева, Є.В. (2017), “Спосіб визначення параметрів прокатки рулонів на стані Стеккеля”, *пат. 117875 Україна: МПК B21B 1/26 (2006.01), № и 2017 01099; заявл. 06.02.2017; опубл. 10.07.2017, Бюл. № 13. (патент на корисну модель).*

71. Зінченко, Ю.А., Пісмарьов, К.Є., Курпе, О.Г., Бердник, В.П., Ізотов, Б.В., Лаштун, А.І., Кшевицька, Т.С., Негрій, С.Д., Чабан, В.В. (2016), “Кришка рекуперативного нагрівального колодязя”, *пат. 109260 Україна: МПК C21D 9/70, № и 2015 12829; заявл. 25.12.2015; опубл. 25.08.2016*, Бюл. № 16. (патент на корисну модель).

72. Зінченко, Ю.А., Пісмарьов, К.Є., Курпе, О.Г., Мурашкін, О.В., Васильченко, С.Є., Горбачов, І.А., Чаленко, О.Г., Бердник, В.П., Ізотов, Б.В., Лаштун, А.І., Негрій, С.Д., Кочура, О.О. (2016), “Спосіб редукування безперервнолитих заготівок”, *пат. 109976 Україна: МПК B21B 1/02, № и 2016 00859; заявл. 08.02.2016; опубл. 26.09.2016*, Бюл. № 18. (патент на корисну модель).

73. Зінченко, Ю.А., Пісмарьов, К.Є., Курпе, О.Г., Негрій, С.Д., Медведєв, В.В., Ізотов, Б.В., Лаштун, А.І., Коткова, О.Ю. (2016), “Методична штовхальна піч”, *пат. 113959 Україна: МПК F27B 9/00, F27B 9/10, F27B 9/20, F27B 9/22, F27B 9/28, № и 2016 08057; заявл. 20.07.2016; опубл. 27.02.2017*, Бюл. № 04. (патент на корисну модель).

74. Зінченко, Ю.А., Пісмарьов, К.Є., Курпе, О.Г., Годинський, О.А., Левтерова, І.А., Олійник, В.В. (2017), “Трубоелектрозварювальний стан”, *пат. 113589 Україна: МПК B21C 37/08, № и 2016 06688; заявл. 21.06.2016; опубл. 10.02.2017*, Бюл. № 03. (патент на корисну модель).

75. Лівшиц, Д.А., Ковура, О.Б., Зінченко, Ю.А., Ганошенко, І.В., Койфман, О.А., Володарський, В.В., Курпе, О.Г., Капланов, В.І. (2009), “Спосіб визначення параметрів прокатки товстих листів”, *пат. 41713 Україна: МПК B21B 1/26, № и 2008 11407; заявл. 22.09.2008; опубл. 10.06.2009*, Бюл. № 11. (патент на корисну модель).

76. Лівшиц, Д.А., Третьяков, О.Б., Шахпазов, Є.Х., Матросов, Ю.І., Гоман, С.В., Кумуржи, Є.В., Володарський, В.В., Багмет, О.О., Курпе, О.Г., Койфман, О.А., Ганошенко, І.В. (2010), “Спосіб виробництва прокату методом багатостадійної контрольованої прокатки”, *пат. 54343 Україна: МПК B21B 1/22, C21D 1/00, C22C*



38/00, № и 2010 03966; заявл. 06.04.2010; опубл. 10.11.2010, Бюл. № 21. (патент на корисну модель).

77. Лівшиц, Д.А., Третьяков, О.Б., Шахпазов, Є.Х., Матросов, Ю.І., Гоман, С.В., Ганошенко, І.В. Кумуржи, Є.В., Володарський, В.В., Курпе, О.Г., Койфман, О.А., Очеретін, В.М. (2010), “Спосіб виробництва прокату методом багатостадійної термодифузної обробки”, *пат. 54506 Україна: МПК C21D 3/00, C21D 1/00, и 2010 06311; заявл. 25.05.2010; опубл. 10.11.2010, Бюл. № 21.* (патент на корисну модель).

78. Лівшиц, Д.А., Третьяков, О.Б., Шахпазов, Є.Х., Матросов, Ю.І., Гоман, С.В., Ганошенко, І.В. Кумуржи, Є.В., Володарський, В.В., Курпе, О.Г., Койфман, О.А., Очеретін, В.М. (2010), “Спосіб виробництва прокату методом багатостадійної термодифузної обробки”, *пат. 54507 Україна: МПК C21D 3/00, C21D 1/00, № и 2010 06313; заявл. 25.05.2010; опубл. 10.11.2010, Бюл. № 21.* (патент на корисну модель).

79. Лівшиц, Д.А., Третьяков, О.Б., Шахпазов, Є.Х., Матросов, Ю.І., Гоман, С.В., Ганошенко, І.В. Кумуржи, Є.В., Володарський, В.В., Курпе, О.Г., Койфман, О.А., Чубань, А.М. (2011), “Спосіб виробництва прокату методом нормалізуючої прокатки”, *пат. 56651 Україна: МПК C21D 8/00, B21B 1/22, C22C 38/00, № и 2010 07248; заявл. 11.06.2010; опубл. 25.01.2011, Бюл. № 2.* (патент на корисну модель).

## ЗМІСТ

ВСТУП .....	35
РОЗДІЛ 1 ВПЛИВ ТЕХНІЧНОГО РІВНЯ ПРОКАТНОГО УСТАТКУВАННЯ НА РІВЕНЬ ТЕХНОЛОГІЇ ТА ЯКІСТЬ ПРОДУКЦІЇ.....	46
1.1 Формування та вдосконалення способу виробництва «Термомеханічна прокатка».....	46
1.2 Аналіз вимог до виробництва прокату способом термомеханічної прокатки .....	61
1.2.1 Прокат конструкційного призначення .....	61
1.2.2 Прокат для виробництва труб .....	66
1.3 Аналіз рівня устаткування вітчизняних та деяких закордонних станів гарячої прокатки.....	74
1.3.1 Товстолистові стани гарячої прокатки.....	74
1.3.1.1 Стан 3000 металургійного комбінату «ММК ІМЕНІ ІЛЛІЧА».....	74
1.3.1.2 Стан 3600 металургійного комбінату «МК «АЗОВСТАЛЬ».....	79
1.3.1.3 Стан 3200 заводу Trameal, Італія.....	84
1.3.2 Широкоштабові стани гарячої прокатки.....	90
1.3.2.1 Широкоштабовий стан 1700 «ММК ІМЕНІ ІЛЛІЧА».....	90
1.3.2.2 Широкоштабовий стан 1680 МК «Запоріжсталь».....	95
1.3.3 Стан Стеккеля.....	98
1.3.4 Порівняння характеристик станів щодо впровадження технології термомеханічної прокатки .....	102

1.4	Аналіз сучасних тенденцій вдосконалення устаткування прокатних станів, що виробляють продукцію способом термомеханічної прокатки.....	104
1.5	Аналіз етапів розробки технології термомеханічної прокатки.....	109
	Висновки.....	116
РОЗДІЛ 2	ВИБІР НАПРЯМКІВ І МЕТОДИК ПРОВЕДЕННЯ ДОСЛІДЖЕНЬ	119
2.1	Систематизація технологічних етапів процесів термомеханічної обробки плоского металопрокату.....	119
2.2	Вибір та описання методів теоретичних досліджень.....	121
2.3	Методика проведення експериментальних лабораторних та промислових досліджень.....	124
	Висновки.....	127
РОЗДІЛ 3	ТЕОРЕТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСІВ ЗМІНЕННЯ ТЕМПЕРАТУРНОГО ПОЛЯ ШТАБИ ТА ПРОЦЕСІВ РЕКРИСТАЛІЗАЦІЇ ДЛЯ ПРОГНОЗУВАННЯ МЕХАНІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ДЛЯ УМОВ ТЕРМОМЕХАНІЧНОЇ ПРОКАТКИ.....	129
3.1	Вдосконалення математичної моделі змінення температурного поля нерівномірно нагрітої штаби, що охолоджується, для умов термомеханічної прокатки.....	129
3.1.1	Отримання вдосконалених залежностей для розрахунку необхідної форми нерівномірного температурного поля методами математичного моделювання.....	129
3.1.2	Отримання залежностей для безперервного розрахунку фізичних та теплофізичних властивостей матеріалу.....	137
3.1.3	Реалізація моделі, оцінка впливу на результати розрахунку вдосконалення математичної моделі.....	142
3.2	Апроксимація діаграм рекристалізації для прогнозування механічних властивостей в залежності від температурно-	

	деформаційних умов прокатки.....	149
3.2.1	Використання програмного забезпечення для розробки технології термомеханічної прокатки.....	149
3.2.2	Дослідження процесів рекристалізації в умовах термомеханічного процесу прокатки низьколегованих маловуглецевих марок сталі.....	154
	Висновки.....	160
РОЗДІЛ 4	ДОСЛІДЖЕННЯ СИЛОВИХ ПРОЦЕСІВ ПРОКАТКИ МЕТОДАМИ ФІЗИЧНОГО МОДЕЛЮВАННЯ.....	162
4.1	Проведення експерименту, обробка експериментальних даних.....	162
4.2	Аналіз результатів експерименту, рекомендації по маркам сталі-аналогам.....	165
4.3	Порівняння розрахованих на підставі експерименту даних з фактичними результатами прокатки на стані 3600 «МК «АЗОВСТАЛЬ».....	173
	Висновки.....	175
РОЗДІЛ 5	ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ ГАРЯЧОЇ ПРОКАТКИ НА СТАНІ СТЕККЕЛЯ ШЛЯХОМ МОДЕЛЮВАННЯ МЕТОДОМ СКІНЧЕННИХ ЕЛЕМЕНТІВ.....	177
5.1	Математична модель процесу гарячої прокатки.....	177
5.1.1	Модель фізико-механічних властивостей матеріалу, що прокатується, початкові дані.....	177
5.1.2	Обробка результатів розрахунку.....	181
5.2	Результати розрахунку процесу прокатки на стані Стеккеля в середовищі Abaqus CAE.....	183
5.2.1	Результати розрахунку процесу прокатки в кліті стану 3170 в середовищі Abaqus CAE.....	183

5.2.2	Результати розрахунку процесу прокатки в кліті стану 1780 (Стеккеля) в середовищі Abaqus CAE.....	195
5.3	Аналіз даних по результатах скінченно-елементного моделювання процесу прокатки рулонів на стані Стеккеля.....	199
	Висновки.....	204
РОЗДІЛ 6	ПРОМИСЛОВА РЕАЛІЗАЦІЯ РОЗРОБКИ ТА ВИРОБНИЦТВА ПРОДУКЦІЇ СПОСОБОМ ТЕРМОМЕХАНІЧНОЇ ПРОКАТКИ....	206
6.1	Розробка технології в межах внутрішньої координації між підприємствами однієї компанії.....	206
6.1.1	Розробка технології виробництва листового прокату розмірами 4×3125×16000 на стані 3200 заводу Trametel, Італія, зі слябу товщиною 220 мм.....	206
6.1.2	Розробка технології виробництва термомеханічного прокату на стані Стеккеля.....	213
6.1.2.1	Уточнення розрахунку теплових втрат металу на станах Стеккеля.....	213
6.1.2.2	Перевірка аналітичної моделі технологічного процесу прокатки на стані Стеккеля заводу Ferriera Valsider.....	220
6.1.2.3	Освоєння технології виробництва рулонного прокату зі сталі категорії міцності X65 на стані Стеккеля заводу Ferriera Valsider.....	227
6.2	Освоєння виробництва нового сортаменту на підприємствах України.....	235
6.2.1	Освоєння виробництва конструкційного прокату способом термомеханічної прокатки.....	235
6.2.1.1	Освоєння виробництва рулонного прокату зі сталі марки S355MC товщиною 6 мм згідно з вимогами стандарту EN 10149-2 на стані 1700	

	«ММК ІМЕНІ ІЛЛІЧА».....	235
6.2.1.2	Освоєння виробництва рулонного прокату зі сталі марки S460MC товщиною 2,5 мм згідно з вимогами стандарту EN 10149-2 на стані 1700 «ММК ІМЕНІ ІЛЛІЧА».....	243
6.2.2	Освоєння виробництва прокату для труб способом термомеханічної прокатки.....	249
6.2.2.1	Освоєння виробництва рулонного прокату зі сталі марки В товщиною 4,7 мм та 5,7 мм способом термомеханічної прокатки згідно з вимогами стандарту API-5L на стані 1700 «ММК ІМЕНІ ІЛЛІЧА».....	249
6.2.2.2	Освоєння виробництва рулонного прокату зі сталі категорії міцності X52M товщиною 8 мм згідно з вимогами стандарту API-5L на стані 1700 «ММК ІМЕНІ ІЛЛІЧА».....	258
6.2.3	Освоєння виробництва товстолистового прокату зі сталі марки EN36 товщиною 25 мм способом термомеханічної прокатки згідно з вимогами Правил Bureau Veritas на стані 3600 «МК «АЗОВСТАЛЬ».....	266
6.3	Обґрунтування можливості виробництва прокату за технологією термомеханічної прокатки на станах з існуючим рівнем устаткування.....	275
	Висновки.....	276
РОЗДІЛ 7	РОЗВИТОК МЕТОДОЛОГІЙ КЕРУВАННЯ ЯКІСТЮ, ЗАСВОЄННЯ НОВОГО СОРТАМЕНТУ, ТЕХНОЛОГІЧНОЇ СТРАТЕГІЇ ТА ЇХ РЕАЛІЗАЦІЯ В УМОВАХ ТЕРМОМЕХАНІЧНОЇ ПРОКАТКИ.....	279

7.1	Оцінка сучасних та перспективних вимог до виробництва прокатної продукції, аналіз додаткових вимог .....	279
7.2	Розвиток системних підходів до превентивного керування якістю термомеханічного прокату. Методологія керування якістю.....	288
7.3	Методологія освоєння нового сортаменту.....	307
7.4	Технологічна стратегія та її реалізація.....	313
7.4.1	Обґрунтування вибору підприємства для реалізації технологічної стратегії.....	313
7.4.2	Цільовий сортамент стану 1700 після модернізації, існуючі обмеження .....	317
7.4.3	Комплекс устаткування, що підлягає модернізації, аналіз вузьких місць, визначення необхідних технічних характеристик.....	321
7.4.4	Вдосконалення методології аналітичних розрахунків температурного режиму прокатки на широкоштабовому стані з установкою CoilBox.....	324
7.5	Синхронізація роботи клітей чорнової групи стану 1700 з метою збільшення ваги готових рулонів.....	332
	Висновки.....	337
	<b>ВИСНОВКИ.....</b>	<b>339</b>
	<b>СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ.....</b>	<b>344</b>
Додаток А	Список публікацій за темою дисертації.....	379
Додаток Б	Апробація результатів дисертації.....	393
Додаток В	Порівняння вимог стандартів різноманітного призначення.....	395
Додаток Г	Технічні характеристики основного устаткування деяких товстолистових станів гарячої прокатки.....	410
Г.1	Технічні характеристики основного устаткування стану 3000 «ММК ІМЕНІ ІЛЛІЧА».....	410

Г.2	Технічні характеристики основного устаткування стану 3600 «МК «АЗОВСТАЛЬ».....	415
Г.3	Технічні характеристики основного устаткування стану 3200 заводу Trametal.....	425
Г.4	Технічні характеристики основного устаткування стану 1700 «ММК ІМЕНІ ІЛЛІЧА».....	427
Г.5	Технічні характеристики деякого основного устаткування стану 1680 МК «Запоріжсталь».....	439
Г.6	Технічні характеристики деякого основного устаткування стану Стеккеля заводу Ferriera Valsider, Італія.....	441
Додаток Д	Опис методології створення математичної моделі в системі Abaqus CAE.....	445
Додаток Е	Методи інтерполяції даних по розміру зерна в залежності від температурно-деформаційних умов.....	456
Додаток Є	Методика обробки результатів експерименту з осадження свинцевих зразків.....	460
Додаток Ж	Результати розрахунків до дослідження процесів прокатки методами фізичного моделювання.....	463
Додаток З	Лістинг розроблених в середовищі VB6.0 програмних засобів для визначення опору деформації в залежності від ступеня, швидкості та температури деформації.....	465
Додаток І	Технічний звіт по фактичних параметрах прокатки листів розмірами 5x3125x12000 мм зі сталі А320 на заводі Trametal...	467
Додаток Й	Технічний звіт по фактичних параметрах прокатки рулонів розмірами 6x1500 мм зі сталі В638 на стані Стеккеля, заводу Ferriera Valsider.....	469
Додаток К	Технічний звіт по фактичних параметрах прокатки рулонів зі сталі марки S355 в клітях стану Стеккеля.....	471



Додаток Л	Протокол щодо виробництва прокату категорії міцності X65 на заводі Ferriera Valsider.....	480
Додаток М	Технологія виробництва рулонів зі сталі марки S460MC на стані 1700 «ММК ІМЕНІ ІЛЛІЧА».....	484
Додаток Н	Акт освоєння виробництва нового продукту – гарячекатаних рулонів з марки сталі S460MC згідно з вимогами EN 10149-2...	486
Додаток О	Металографічне дослідження зразків гарячекатаних рулонів зі сталі марки В.....	487
Додаток П	Акт освоєння виробництва нового продукту – гарячекатаних рулонів зі сталі марки В згідно з вимогами API-5L.....	496
Додаток Р	Металографічне дослідження зразків гарячекатаних рулонів зі сталі категорії міцності X52M.....	497
Додаток С	Лист представництва Bureau Veritas щодо виробництва прокату способом ТМСР на стані 3600 «МК «АЗОВСТАЛЬ»...	504
Додаток Т	Технологія виробництва прокату зі сталі марки EN36 на «МК «АЗОВСТАЛЬ».....	506
Додаток У	Керування показниками якості прокату, методологія освоєння нового сортаменту.....	509
	У.1 Методологія керування якістю.....	509
	У.2 Залежності між показниками та параметрами якості, що досліджуються при виробництві товстолистового прокату сталі марки К60, товщиною 14 мм, який вироблявся по режимах термомеханічної прокатки з прискореним охолодженням на стані 3600 «МК «АЗОВСТАЛЬ».....	510
Додаток Ф	Методологія побудови технологічної стратегії.....	516
Додаток Х	Принциповий дизайн проекту модернізації стану 1700 «ММК ІМЕНІ ІЛЛІЧА», погоджений з «Primetals».....	522

Додаток Ц	Загальна технологія синхронізації запроваджена на «ММК ІМЕНІ ІЛЛІЧА».....	523
Додаток Ч	Довідка про участь у розробці та впроваджені технологій на «ММК ІМЕНІ ІЛЛІЧА».....	531
Додаток Ш	Довідка про участь в обґрунтуванні та розробці проекту реконструкції стану 1700 «ММК ІМЕНІ ІЛЛІЧА».....	532
Додаток Щ	Довідка про використання результатів докторської дисертації в навчальному процесі.....	533
Додаток Ю	АКТ про використання розробок дисертаційної роботи.....	534

## ВСТУП

**Актуальність теми.** В умовах безперервного інноваційного технічного розвитку та глобалізації ринків збуту перед металургійними компаніями, а, отже, і перед безпосередніми виробниками металопрокату стоїть життєво важлива проблема - підвищення ефективності виробництва та забезпечення конкурентоспроможності продукції для відповідності сучасному рівню вимог за якістю. У зв'язку з цим, освоєння виробництва нового конкурентоспроможного сортаменту товстолистового та рулонного прокату, який виробляється за найсучаснішою та найекономнішою, що є на сьогодні, технологією термомеханічної прокатки, при порівнянні співвідношення рівень властивостей / витрати на виробництво, становить комплексну багатофакторну проблему. Актуальність вирішення такої проблеми для нашої країни визначається необхідністю оптимізації та оновлення існуючих технологічних підходів, які тісно пов'язані зі станом, технічним рівнем устаткування та організацією виробництва продукції, що відповідає сучасним світовим вимогам.

Аналіз сучасного стану галузевих проектів показав розширення застосування продукції, виробленої за технологією термомеханічної прокатки (ТМСП), по всіх напрямках. При засвоєнні такої продукції для технологів залишаються нерозв'язаними питаннями щодо можливостей впровадження технології ТМСП з урахуванням складу основного технологічного устаткування, яке не передбачало використання таких процесів та забезпечення підвищених механічних властивостей продукції. Розв'язання вказаних протиріч робить необхідним науково-технологічний розвиток процесів освоєння технології ТМСП на існуючому прокатному устаткуванні.

З літературних джерел та виробничого досвіду відомі механізми впровадження технології ТМСП на товстолистових, широкоштабових станах та станах Стеккеля. Але галузеве засвоєння технології ТМСП стримується через неповноту уявлень про механізми впливу режимів деформації на механізми еволюції та формування зеренної структури, керування розподілом деформації за товщиною прокату, механізми оцінки

та забезпечення рівномірності розподілу температур в металі, що необхідно для забезпечення підвищеного рівня та стабільності розподілу механічних властивостей в прокаті. Відсутність та неповнота таких відомостей обмежує застосування процесів ТМСР у прокатці. Застосування такої технології потребує єдиних підходів до оцінки можливостей різних типів прокатних станів.

Тому робота, яка спрямована на розв'язання вищезазначеної проблеми шляхом розвитку наукових основ термомеханічної прокатки плоскої металопродукції з отриманням підвищеного рівня механічних властивостей та розширенням сортаменту продукції, що виробляється, є актуальною.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Виконання дисертаційної роботи пов'язано з пріоритетними напрямками наукової, науково-технічної та інноваційної діяльності на 2018-2020 роки ДВНЗ «ПДТУ»: «Проблеми розвитку металургії, машинобудування, енергетики та енергоефективності, архітектури та будівництва, економіки, права та соціально-гуманітарної сфери, ресурсозбереження та охорони навколишнього середовища»; «Нові речовини і матеріали, нанотехнології: створення і освоєння нових технологій отримання, обробки, з'єднання, в тому числі, наплавлення і зварювання, конструкційних, функціональних і інструментальних матеріалів». Базовими для дисертації є науково-дослідницькі роботи: «Розвиток наукових і технологічних основ виробництва металопродукції підвищеної якості з листа та композитів спеціального призначення», (2017–2019 рр.), № ДР 0117U002269; «Розвиток теорії, дослідження та вдосконалення процесів пластичного деформування матеріалів», (2019 р.), № ДР 0118U006912; «Превентивне керування якістю металопродукції з листа та композитів для захисту спеціальної та броньованої техніки» (2020 р. – по тепер), № ДР 0120U102154. Автор дисертації – виконавець робіт.

**Мета та завдання дослідження:** Мета роботи полягає у розширенні сортаменту продукції з підвищеним рівнем механічних властивостей товстолистових, широкоштабових станів та санів Стеккеля на підставі розвитку наукових основ термомеханічної прокатки і розробки рекомендацій з вдосконалення технологій, що

враховують різний конструктивно-структурний склад основного прокатного устаткування.

Для досягнення зазначеної мети поставлені і розв'язані задачі:

- проведення аналізу проблем, сучасних тенденцій і напрямків розвитку технології термомеханічної прокатки та відповідного устаткування для виробництва товстих листів та штаб в рулонах конструкційного та трубного призначення;

- систематизація технологічних етапів процесів термомеханічної прокатки в залежності від категорії міцності прокату та устаткування, що використовується;

- розвиток методу скінченних різниць щодо моделювання зміни температурного поля підкату, що охолоджується попереду термомеханічної прокатки, для визначення ділянок підстужування і розробка рекомендацій, що забезпечать зменшення градієнту температур по ширині штаби в умовах стану Стеккеля;

- аналіз впливу температурно-деформаційних режимів чорнової прокатки на формування рекристалізованого зерна аустеніту в умовах процесів ТМСП та встановлення закономірностей зміни розміру зерна аустеніту в залежності від ступеня деформації та температури і відповідно зміни опору деформації матеріалу, а також умов отримання якомога більш дрібного розміру зерна для успадкованого формування кінцевих механічних властивостей сталі категорії міцності Х65.

- розвиток методу фізичного моделювання для дослідження силових режимів прокатки сталей, що виробляються способом ТМСП, у лабораторних умовах і визначення температурно-деформаційних меж їх застосування;

- вивчення закономірностей впливу температурно-деформаційних умов процесу прокатки на підвищення рівномірності розподілу деформації по товщині підкату;

- рекомендації щодо розробки та впровадження технологічних процесів виробництва товстолистого та штабового прокату підвищеної міцності, що виготовляється термомеханічною прокаткою із урахуванням технічних характеристик та складу основного устаткування;

- розробка рекомендацій для промислового впровадження методологій керування якістю, освоєння нового сортаменту та технологічної стратегії;

- розробка рекомендацій щодо удосконалення режимів роботи основного прокатного та термічного устаткування та формування пропозицій з необхідного складу та характеристик технологічних ліній широкоштабового стану 1700, що модернізується.

**Об'єкт дослідження.** Технології та устаткування для термомеханічної прокатки товстолистового та рулонного прокату.

**Предмет дослідження.** Закономірності впливу складу технологічного устаткування та режимів термомеханічних процесів прокатки на формування підвищеного рівня механічних властивостей плоского прокату.

**Методи дослідження.** Теоретичні дослідження базуються на фундаментальних положеннях теорії обробки металів тиском (ОМТ), теорій теплопровідності, теплопереносу, теорій фазових перетворень. Експериментальні та промислові дослідження включали методи фізичного моделювання, планування експерименту, визначення механічних властивостей, металографії та виконані з використанням устаткування й вимірювальних пристроїв, що пройшли метрологічний контроль. При проведенні досліджень також було використано методи скінченних елементів, скінченно-різницевий метод, результати експериментів оброблені за допомогою методів математичної статистики.

**Наукова новизна отриманих результатів.** Наукову новизну дисертації складають наступні її положення:

**1. Вперше для низьковуглецевої мікролегованої сталі групи міцності X65, встановлено залежність розміру зерна аустеніту та опору деформації від температурно-деформаційних умов термомеханічної прокатки.** Раніше такі залежності для низьковуглецевої сталі групи міцності X65 відомі не були. Отримано коефіцієнти для розрахунку опору деформації на основі співвідношення Холла-Петча в залежності від розміру зерна аустеніту, який є закономірно зв'язаним зі значеннями одиничних обтиснень при певних температурно-швидкісних умовах. Отримані

залежності необхідні для визначення температурно-деформаційних умов, що забезпечують потрібний розмір зерна аустеніту. Встановлені залежності дозволяють корегувати режими прокатки з метою керування структурою та механічними властивостями продукції, що успадковуються.

**2. Вперше встановлено температурно-деформаційні умови прокатки, при яких досягають максимальної рівномірності розподілу деформації по товщині плоского розкату в чорнових проходах.** До цього такі умови були не відомі. Рівномірність деформації визначається запропонованим коефіцієнтом  $K_{нд}$ , який є відношенням мінімального до максимального значення еквівалентної деформації (інтенсивності деформації) в осередку деформації, що розраховані методом скінченних елементів при певних температурах, ступенях та показниках форми осередку деформації (відношення довжини осередку деформації до середньої товщині прокату). Встановлено, що в дослідженому діапазоні температурно-деформаційних умов термомеханічної прокатки, максимальне значення коефіцієнту  $K_{нд}$  не перевищує 0,92 (92 %), тому обтиснення  $\geq 20$  % забезпечує найкращу рівномірність розподілу деформації по товщині. Це дозволяє забезпечувати умови рівномірного розподілу механічних властивостей у готовому прокаті.

**3. Уточнено закономірності впливу конвекційного теплообміну на розподіл температури по ширині штаби для умов термомеханічної прокатки у широкоштабових та реверсивних станах з пічними моталками.** Розробка відрізняється врахуванням конвекційного теплообміну при визначенні розподілу температур у підкаті, отриманого після пічних моталок або пристроїв міжклітьового перемотування на подальший розподіл температури по ширині штаби, розрахований методом елементарних теплових балансів при температурах термомеханічної прокатки. Це дозволяє знизити похибку між методами розрахунку в дослідному діапазоні умов чистової термомеханічної прокатки на 4 %, а також забезпечувати умови рівномірного розподілу механічних властивостей прокату по ширині.

**4. Уточнено закономірності впливу ступеня, швидкості і температури гарячої деформації на опір деформації при термомеханічній прокатці сталі групи**

**міцності X70, що покладені в основу аналітичних моделей для його розрахунку.** Розробка відрізняється врахуванням впливу на опір деформації сталі групи міцності X70 властивостей, що успадковані з попередніх технологічних операцій (аустенізація, природне та примусове охолодження перед прокаткою), що визначаються фактором спадковості  $K_n$ , який залежить від значення температури ( $t$ ) деформації  $K_n = 0,1344 \exp^{0,0021t}$ . Уточнення фактору спадковості  $K_n$  дозволяє знизити похибку розрахунку опору деформації з 9 % до 7,4 %. Отримані результати дозволяють визначати силові та раціональні температуро-деформаційні параметри прокатки.

**5. Уточнено закономірність зміни середньомасової температури металу від умов нагрівання вуглецевих та низьколегованих сталей в пічних моталках станів Стеккеля.** Метод відрізняється додатковим врахуванням радіусів барабану моталки та рулону, довжини розкату, швидкості прокатки, що забезпечує зменшення похибки розрахунку температури металу на 11,25 % (з 9,15 % до -2,1 %). Уточнений метод покладений в основу аналітичних моделей для визначення зміни температури підкату в пічних моталках, корегування режимів нагрівання та прокатки з метою керування структурою та механічними властивостями продукції.

**6. Отримали подальший розвиток методологічні засади розробки та вдосконалення технологій виробництва гарячого прокату на товстолистових та штабових станах.** Відмінності полягають у систематизації елементів процесів розробки технологій виробництва товстолистого та штабового прокату із встановленням рівнів впливу значень технологічних факторів на показники якості плоскої металопродукції за допомогою їх аналізу і обробки методами Парето, використання правила «трьох сигм» і карт Шухарта, багатofакторного регресійного аналізу даних і впровадження трирівневої системи кольорових маркерів для оцінки стабільності технології (стабільний рівень, рівень який потребує уваги та порушення процесу). Застосування запропонованих елементів дозволяє встановлювати залежний зв'язок між технологічними факторами, складом і конструкційними особливостями технологічних ліній та показниками механічних властивостей плоскої



металопродукції, генерувати нові конструктивно-технологічні рішення при розробці та вдосконаленні процесів гарячої прокатки за допомогою комбінації встановлених зв'язків.

**Практичне значення отриманих результатів.** Практичну цінність становлять:

- методика визначення значень технологічних факторів, що впливають на механічні властивості металопродукції, їх контроль і механізм корегування;

- аналітичні моделі розрахунку зміни температурних параметрів прокатки для безперервних станів з використанням установок CoilBox та станів Стеккеля з пічними моталками.

- математична модель розрахунку зміни температурного поля штаби при режимах ТМСР, яка охолоджується після пічної моталки на стані Стеккеля та запропоновані рекомендації щодо коригування розподілу температур по ширині штаби;

- рекомендації з вибору температурно-деформаційних умов чорнової термомеханічної прокатки низьковуглецевої мікролегованої сталі 06Г2ДБ (Х65) трубного призначення, які забезпечують отримання якомога меншого успадкованого розміру зерна аустеніту;

- запропоновані схеми обтиснень та температурні режими чорнової прокатки конструкційної марки сталі S355JR+AR в умовах стану Стеккеля, що забезпечують зменшення нерівномірності деформації по товщині підкату;

- розроблені режими контрольованого повітряного охолодження рулонного прокату, що забезпечують зниження товщини повітряної окалини, яка утворюється після термомеханічної прокатки;

- рекомендації з розробки та вдосконалення технології термомеханічної прокатки на товстолистових, широкоштабових станах та станах Стеккеля;

- рекомендації з удосконалення проектів реконструкції та модернізації прокатного устаткування широкоштабових станів для забезпечення виробництва термомеханічного прокату підвищеної міцності.

Теоретичні та експериментальні результати розробок використані в умовах: «ММК ІМЕНІ ІЛІЧА» (технологічне завдання (ТЗ) ТЗ-ЦЛМК-№33/16-2Пр1 від 05.04.2016), (ТЗ-ЦЛМК-№59/16-2-Пр1 від 29.06.2016), (акт №1/216 від 19.08.2016), (акт №9 від 24.10.2017); «МК «АЗОВСТАЛЬ» (вимоги до виробництва продукції ТПП 232-39-2011 від. 01.07.2011); заводів Trameal (Італія) і Ferriera Valsider (Італія) (протокол від 29.10.2010). Матеріали роботи, технологічні рішення та рекомендації застосовані у навчальному процесі (довідка від 25.09.2020) та науково-дослідницьких роботах кафедри обробки металів тиском ДВНЗ «ПДТУ» (акт від 23.09.2020).

### **Особистий внесок здобувача.**

Основні результати роботи отримані автором самостійно. При проведенні досліджень автором здійснені: обґрунтування мети роботи, розробка основних ідей і методик досліджень, постановка і рішення задач дисертаційної роботи; вдосконалення математичної моделі та дослідження зміни розподілу температури по ширині штаб; розробка залежностей та дослідження впливу температурно-деформаційних параметрів на розмір зерна аустеніту та опір деформації мікролегованих сталей групи міцності Х65, розробка залежностей для фізичного моделювання процесів ТМСП; розробка методики для оцінки рівномірності проникнення деформації по товщині прокату; розробка залежностей для розрахунку зміни температури металу в установці CoilBox та пічних моталках; розробка комплексу аналітичних моделей для розрахунку технологічних параметрів прокатки на товстолистових, ширококутових та станах Стеккеля. Автор планував та проводив експериментальні дослідження, виконував обробку та аналіз отриманих результатів, розробив технологічні процеси виробництва прокату на товстолистових, ширококутовому та стані Стеккеля, виконував розрахунки технічних параметрів устаткування стану 1700, яке необхідно реконструювати, для впровадження технології ТМСП, приймав активну участь у впровадженні результатів роботи у виробництво.

Конкретний особистий внесок здобувача в роботах, що опубліковані у співавторстві наведений у вигляді скорочених анотацій після вказаних їх номерів у списку публікацій за темою дисертації:

[1] – розділ 5; [2, 3, 11, 16–19, 21, 30, 33, 55–59, 62, 63] – аналіз параметрів устаткування, розробка хімічного складу, розрахунок параметрів та впровадження ТМСР процесу, оцінка похибок; [5, 6, 29, 41, 44, 53, 70] – вдосконалення закономірностей розрахунку зміни температурних параметрів прокату для різних комплексів устаткування; [7, 48, 49] – аналіз параметрів устаткування, сортаменту, розрахунок технологічних параметрів прокатки, впровадження технології, оцінка похибки; [8, 31, 37, 43] – вдосконалення аналітичної моделі розрахунку параметрів процесу прокатки, порівняльний аналіз результатів; [9, 45–47] – вдосконалення математичної моделі, порівняльний аналіз результатів; [10, 51] – аналіз похибки розробленої моделі, порівняння з фактичними даними; [12, 64] – ідея, аналіз параметрів устаткування, оцінка резервів, оцінка перспективних вимог до прокату, розрахунок технологічних параметрів, параметрів устаткування, обґрунтування устаткування, яке підлягає реконструкції; [13, 34] – ідея, технічне рішення, розрахунок параметрів та обґрунтування можливостей впровадження технології, порівняльний аналіз; [14, 32, 35, 42] – аналіз параметрів устаткування, порівняльна обробка фактичних даних, розрахунок параметрів прокатки; [22, 24] – визначення переліку марок сталі (сплаву)-аналогів, встановлення закономірних зв'язків, визначення меж застосування, визначення похибки розрахунків; [23] – проведення експерименту, аналіз даних, отримання залежностей, висновки; [4, 25, 27] – формування вихідних даних, порівняльний аналіз, висновки; [28, 54, 61] – оцінка перспективних вимог, аналіз тенденцій розвитку металургійних підприємств; [26] – методологія, методи обробки даних, визначення покращень; [36, 38] – планування експерименту, обробка дослідних даних, розробка аналітичних залежностей; [65, 66, 75–79] – розрахунок параметрів ТМСР процесу; [68, 69] – розробка хімічного складу та системи використання мікролегуючих елементів, розрахунок параметрів ТМСР процесу; [50, 51, 72, 73] – розробка нової схеми

виробництва рулонного прокату, розрахунок параметрів; [67, 71] – оцінка впливу устаткування на змінення температурних параметрів прокату; [74] – оцінка технічних можливостей устаткування, параметрів якості заготовки та кінцевої продукції.

**Апробація результатів дисертації.** Основні положення роботи, наукові та практичні результати доповідалися та обговорювалися на наукових конференціях та семінарах серед яких: Міжнародна конференція (МК) ФДУП «ЦНДІЧормет імені І.П. Бардина» «Сучасні тенденції розробки та виробництва сталей і труб для магістральних газів та нафтопроводів» (Москва, 2008 р.), очна форма участі, з доповіддю; Міжнародна науково-технічна конференція (МНТК) «Університетська наука – 2009–2012, 2014–2020» (Маріуполь, 2009–2012 рр., 2014–2020 рр.), очна форма участі, з доповіддю; VIII Конгрес прокатників (Магнітогорськ, 2010 р.), очна форма участі, з доповіддю; 9 Міжнародна технічна конференція «Теоретичні та практичні проблеми в обробці металів тиском і якості фахової освіти» (Київ, 2018 р.), заочна форма участі; IV МНТК «Машини і пластична деформація металу» (Кам'янське, Дніпро, 2018 р.), заочна форма участі; Міжнародна науково-практична конференція «Фізико-хімічні геотехнології» (Дніпро, 2018 р.), заочна форма участі; Наукова конференція «Сучасні технології в механіці» (Хмельницький, 2018 р.), заочна форма участі; I МНТК «Перспективи розвитку машинобудування та транспорту» (Вінниця, 2019 р.), заочна форма участі; X МНТК «Теоретичні та практичні проблеми в обробці матеріалів тиском і якості фахової освіти» (Київ-Херсон, 2019 р.), заочна форма участі; XI МНТК «Ресурсозбереження та енергоефективність процесів і обладнання обробки тиском у машинобудуванні та металургії» (Харків, 2019 р.), заочна форма участі; 2<sup>nd</sup> International Conference on Design, Simulation, Manufacturing «The Innovation Exchange» (Lutsk, Ukraine, 2019 р.), очна форма участі, з доповіддю; дисертацію докладено в повному обсязі на XXIII МНТК «Досягнення та проблеми розвитку технології і машин обробки тиском» (Краматорськ, 2020 р.), на науковому семінарі кафедри обробки металів тиском (ОМТ) ДВНЗ «ПДТУ» (Маріуполь, 2020 р.), а також на засіданні Придніпровського наукового семінару при кафедрі ОМТ НМетАУ (2020 р.).

**Структура та обсяг дисертації.** Дисертація складається з анотації, вступу, 7 розділів, висновків, списку використаної літератури та додатки. Загальний обсяг дисертації становить 534 сторінки машинописного тексту, з них 272 сторінки основного тексту, 125 рисунків та 103 таблиці, в тому числі 24 рисунків та 11 таблиць розташовані на окремих 35 сторінках, список використаної літератури з 273 найменувань на 35 сторінках, анотації та 28 додатків, що знаходяться на 156 сторінках.

Матеріали дисертаційної роботи опубліковані в 79 роботах, з яких 33 статті опубліковано в журналах і збірниках наукових праць, з них 7 статей в міжнародних наукових журналах, які входять до бази даних Scopus, 23 статті у наукових фахових виданнях України, 3 статті у виданнях, що не входять до переліку фахових, в тому числі 2 статті у зарубіжних виданнях; 27 робіт опубліковано в матеріалах та тезах міжнародних конференцій. Матеріали досліджень і розробок опубліковані також в 1 монографії та 3-х колективних монографіях, отримано 3 патенти України на винахід та 12 патентів України на корисну модель.

Автор висловлює глибоку подяку науковому консультанту доктору технічних наук, професору Кухарю В.В. за поради та консультації.

## РОЗДІЛ 1

# ВПЛИВ ТЕХНІЧНОГО РІВНЯ ПРОКАТНОГО УСТАТКУВАННЯ НА РІВЕНЬ ТЕХНОЛОГІЇ ТА ЯКІСТЬ ПРОДУКЦІЇ

### 1.1 Формування та вдосконалення способу виробництва «Термомеханічна прокатка»

Великий перелік світових стандартів з виробництва прокату дозволяє виробляти схожу продукцію різноманітними способами, такими, як класична гаряча прокатка, нормалізувальна прокатка, термомеханічна прокатка (ТМСР), або із застосуванням термічної обробки. Але боротьба за собівартість, конкуренція та вимоги до якості продукції встановлюють чіткі пріоритети щодо термомеханічного способу виробництва прокату.

Наразі вже не виникає сумнівів щодо оптимального співвідношення комплексу механічних властивостей та собівартості прокатної продукції, яка виробляється способом ТМСР.

Процес термомеханічної прокатки отримав розвиток з процесу контрольованої прокатки. Методом ТМСР виробляють дрібнозернисту сталь, шляхом поєднання хімічного складу і сукупності способів контролю процесів виготовлення, починаючи від нагрівання сляба до охолодження після прокатки в певних для кожного хімічного складу діапазонах температур, забезпечуючи, таким чином, необхідний комплекс властивостей.

Відомо, що технологія отримання прокату способом ТМСР має певні переваги в порівнянні з технологією «класичної» контрольованої прокатки і звичайно ж технологією термічної обробки, в тому числі:

- найкраща зварюваність, за рахунок забезпечення комплексу властивостей, при більш низькому вуглецевому еквіваленті;
- висока міцність у поєднанні з високою пластичністю;

- енергозбереження за рахунок більш низьких температур нагрівання металу під прокатку, більш високих температур чистової прокатки і застосуванням прискореного охолодження.

Безумовною перевагою цієї технології є більш високі споживчі властивості продукції, що одержана, це неодноразово підкреслювалося багатьма дослідженнями.

Завдяки низці суттєвих переваг, технологія термомеханічної прокатки отримала поширення на виробництво майже усіх видів прокату. Внаслідок цього споживачі отримали продукцію, яка відповідає сучасним вимогам з якості, а виробники отримали додаткову можливість знизити собівартість продукції, тим самим зберегти, а в деяких випадках і суттєво підвищити свою конкурентоспроможність. Важливим фактором для підвищення вітчизняної конкурентоспроможності металопродукції на Європейських ринках є навіть вимоги до умов роботи на підприємствах - виробниках металопродукату [1, 2].

Розробка та подальше поширення технології термомеханічної прокатки у світі почалось з 60-х років минулого сторіччя [3]. В нашій країні впровадження цієї технології почалося з виробництва товстолистого прокату на 10 років пізніше [4]. З того часу технологія ТМСП набула розвитку, суттєві зміни також відбулися і у відповідному устаткуванні [5-17]. Зараз цей спосіб виробництва є таким, що постійно розвивається та поширюється на різні види прокату.

Великий вплив на розвиток, становлення та сучасне сприйняття технології термомеханічної прокатки у світі надали роботи таких вчених як E.O. Holl (University of Sheffield, England); N.J. Petch (University of Leeds, England); М.Л. Бернштейн, В.О. Займовский (MICiC); В.І. Погоржельський, Ю.І. Матросов, Ю.Д. Морозов, Л.І. Ефрон (ЦНДІЧормет імені І.П. Бардіна); E. Orowan, A.J. DeArdo (University Pittsburg, USA); J.M. Gray (Microalloying Steel Institute, USA); L.J. Cuddy (Pennsylvania State University, USA); C. Ouchi (Tohoku University, Japan); S. Okaguchi, T. Hashimoto (Sumitomo Metal Industries, Japan); K. Hulka, F. Heisterkamp (Niobium Products Company GmbH, Germany); H.Brandis (Thyssen Edelstahlwerke AG, Germany); L.E. Collins (IPSCO, Canada) та інші.

Наразі, способом ТМСП поширено виробляється товстолистовий та рулонний прокат для конструювання, будівництва, вироблення посудин під тиском, для виробництва трубопроводів, дослідження якого наведено у багатьох працях авторів з різних країн світу [3, 5-7, 18-36].

Раніше, процес ТМСП переважно був поширений на виробництво прокату з низьковуглецевих марок сталі [25, 26], але в останній час поширилось вивчення термомеханічного процесу із застосуванням сталей з вмістом вуглецю до 0,40% [37]. Вивчення та впровадження сталей з вмістом вуглецю від 0,06% та нижче отримало подальшого розвитку одночасно з поглибленим дослідженням процесів зміцнення та отриманням додаткових властивостей [20, 22, 27, 38, 39]. Дослідження впливу різноманітних швидкостей охолодження при реалізації процесу ТМСП на структуру та властивості прокату становлять окрему цікавість [23, 40] та підтверджують ефект суттєвого підвищення властивостей при збільшенні швидкості прискореного охолодження.

Відомо, що великий вплив на отримання кінцевих механічних властивостей при термомеханічній прокатці з прискореним охолодженням має дотримання необхідної технологічної температури прокату перед початком аустенітного перетворення, а також мінімізація коливань температури по ширині та довжині прокату [18-20, 41, 42].

Якщо дозволяє устаткування, то сучасний рівень технології забезпечує виробництво прокату з границею плинності до та понад 800 МПа, але нові більш високі рівні властивостей становлять і нові проблеми, які потребують подальшого вивчення, серед яких питання стабільності механічних властивостей та необхідної мікроструктури [23, 24, 26, 27, 29, 30, 32]. Великий перелік наукових праць свідчить, що для засвоєння технології виробництва продукції способом ТМСП треба виконати низку цілеспрямованих досліджень з метою підтвердження можливостей технології, устаткування та отримання відповідної якості, згідно з вимогами стандартів та споживачів [43-49].



З розвитком обчислювальної техніки набули поширення дослідження, що виконуються різноманітними методами математичного моделювання [50-68]. Слід зазначити, що багато робіт виконана на базі методу скінченних елементів [52-56]. Ці методи дозволяють поглибити існуючі знання про фізичні процеси обробки металів тиском та розробити превентивні методи впливу на кінцевий результат. Тенденція з розширення досліджень процесів обробки металів тиском шляхом математичного моделювання, замість існуючих аналітичних залежностей, у більшості випадків є науковою тенденцією, що відкриває нові можливості для проектування устаткування та освоєння технологій нового рівня. Вивчення технології ТМСР методами математичного моделювання дозволяє отримати більше важелів для її тонкого керування. Але, запропоновані авторами моделі мають різний рівень похибок. Так, наприклад, в роботі [69] похибка визначена у силі прокатки та становить в середньому 142 т. Слід відмітити, що вказана похибка залежить від рівня сили прокатки, що можна побачити на графіках, які наведені у роботі [69]. Похибка при моделюванні, вказана авторами в роботі [70], складає +/-10 %, а в роботі [71] похибка складає до 15,6 % у першому проході і далі знижується. Таким чином, немає чітких рекомендації щодо точності розроблених моделей, але безумовно метою усіх авторів є її підвищення. У роботі [55] автори пропонують застосовувати розроблену модель для проектування технології контрольованої або термомеханічної прокатки [56], так як вона враховує термофізичні та структурні параметри. При цьому авторами не вказаний рівень похибки, який дозволяє отримати ця модель. Особу цікавість становить запропонована авторами [72] модель, яка враховує анізотропність металу в процесі прокатки, у той час як ця особливість іншими авторами не вказана або не враховується. В роботі [73] похибка складає менш ніж 8 %. Таким чином, різний рівень похибок у авторів дає можливість диференційовано використовувати запропоновані моделі для розрахунку більш або менш чутливих до них способів виробництва.

Наявність перевіреної моделі для розробки технології прокатки на будь якому стані суттєво спрощує цей процес, зменшує технологічні похибки та зменшує ризик

отримання продукції незадовільної якості. Ще одна перевага - це можливість оптимізації процесу [53, 74, 75].

Однак, що є одностаїним, так це використання моделей з найменшою похибкою для проектування технології контрольованої або термомеханічної прокатки, як вказано в роботах [55, 56]. Слід зазначити, що більшість математичних та аналітичних моделей, які розробляються інжиніринговими підприємствами та перевірені на діючому устаткуванні, мають обмежений доступ.

У загальному вигляді, схема процесу термомеханічної прокатки, що запропонована автором роботи [76], виглядає наступним чином, рис. 1.1.

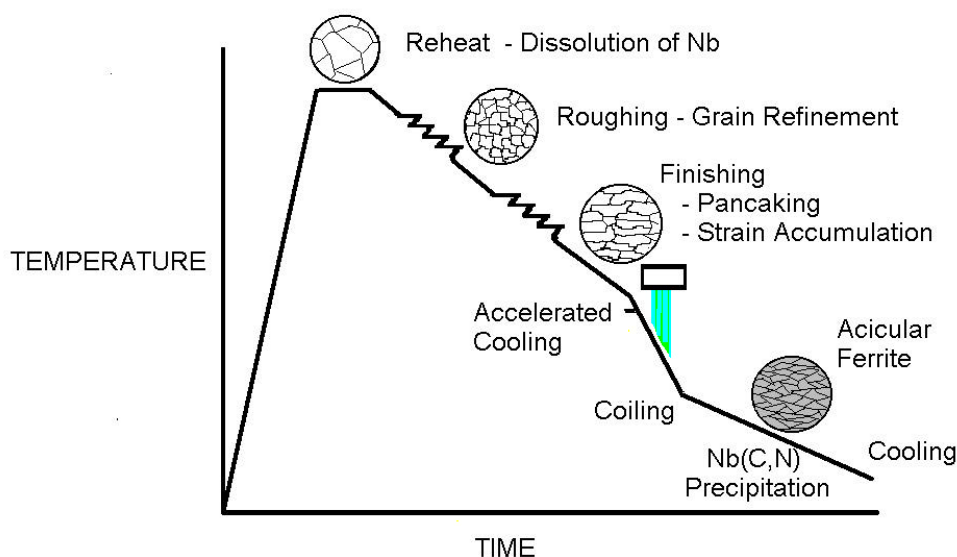


Рисунок. 1.1 – Схема термомеханічного процесу прокатки у загальному вигляді [76]

Водночас, з розробкою технології та поглибленим вивченням її впливу на нові властивості прокату, отримав поширення напрямок прогнозування результатів впровадження технології через моделювання розвитку мікроструктури та механічних властивостей [18, 19, 25, 77, 78].

Але технологія ТМСП не є тією, що не змінюється, вона адаптується в залежності від типу прокатного стану, переліку устаткування, що використовується, та відповідного сортаменту, який виробляється.

Якщо розглядати загалом технологію ТМСП, то вона мала свої етапи розвитку.

З технології контрольованої прокатки або низькотемпературної контрольованої прокатки, контрольованої прокатки з додатковим охолодженням до термомеханічної прокатки з прискореним охолодженням минули декілька десятиліть [79]. Якщо порівнювати всі ці варіанти технології, які, доречі, і зараз ще поширено використовуються виробниками прокату, безумовно, наразі, перевага буде на боці сучасної технології ТМСР з прискореним охолодженням [80-82].

Посеред багатьох наукових праць з впровадження технології ТМСР загальним питанням лишається комбінування цілей і рівня механічних властивостей сортаменту, який треба освоїти, з технічними можливостями існуючого устаткування [83, 84]. При цьому слід враховувати оптимальну комбінацію між хімічним складом сталі, можливостями технології та отриманим рівнем характеристик міцності прокату, щоб не отримати занадто дорогий кінцевий продукт.

Розглянемо поточний стан досліджень та основні напрямки розвитку технології ТМСР по видах прокату та прокатних станів.

На товстолистових станах поглиблено досліджується як сама комплексна технологія термомеханічної прокатки, так і впровадження її окремих етапів.

Прискорене охолодження після прокатки є одним з основних етапів технології, а тому, вивчення впливу швидкості та температури переривання охолодження є переважним напрямком багатьох досліджень [85], в комплексі з дослідженнями впливу температур прокатки на станах [86, 87]. Гарним прикладом є дослідження процесів прокатки, прискореного охолодження, мікроструктури та механічних властивостей плит (товстолистого прокату) товщиною до 60 мм [88, 89]. Також поширено досліджується вплив різноманітних комплексів хімічного складу сталі на властивості товстолистого прокату [90-94], на підставі яких надалі формуються вимоги до технології обробки та необхідні особливі характеристики устаткування для прискореного охолодження [95-97]. Одна з цих характеристик є швидкість, яку повинна забезпечити установка прискореного охолодження, і яка змінюється в залежності від вимог та сортаменту від 10 °C/с до 40 °C/с, а для плит, або для досягнення високоміцних категорій в сталі необхідна підвищена швидкість яка

дорівнює 100 °C/c.

На сьогодні згідно з класифікацією американського інституту нафти API SPECIFICATION 5L, в залежності від вимог, для виробництва труб поширено застосовуються марки сталей від B, X42 до X120 (або їхні аналоги). Також відомі і поширені аналоги, наприклад, по стандартах ISO, та по інших стандартах з різними вимогами до зварювального шву та його якості [98]. Сучасні дослідження спрямовані на поглиблене вивчення та поширене впровадження таких сталей категорій міцності, як X70, X80, X100, X120 [23, 24, 99-106]. Особливе місце займають дослідження технології виробництва прокату категорій міцності X90 та X100 [103, 107].

Але потреба в менш міцних марках також залишається. Газо-нафтотранспортні об'єкти, які були побудовані раніше, потребують ремонту, також будуються невеликі ділянки для транспортування відносно малих об'ємів продуктів. Тому і на сьогодні питання виробництва марок сталі типу B, X42, X56 є актуальним.

В якості подальшого розвитку технології ТМСП при виробництві товстолистового прокату можна розглядати дослідження процесів проміжного охолодження чорнових підкатів в товщинах 60-180 мм [108], у тому числі з трубних марок сталі [109]. Цей напрямок вдосконалення технології набув розвитку тільки в останні декілька років при виробництві прокату підвищених категорій міцності, наприклад типу X90 згідно зі стандартом API-5L. Наразі, цей спосіб вже підтвердив свої переваги в мікроструктурі металу, механічних властивостях, особливо при випробуваннях на ударну в'язкість KV. Так, в прокаті товщиною 19,6 мм з марки сталі X90 при виробництві з проміжним охолодженням підкату, значення випробування KV склало 499 Дж в порівнянні з класичною технологією ТМСП, тобто без проміжного охолодження, значення KV склало 261 Дж [107]. Таким чином ударна в'язкість є майже вдвічі вищою.

При безсумнівно великому переліку переваг технології ТМСП, при виробництві високоміцних марок сталі з границею плинності більше ніж 690 МПа [110] та судносталі підвищеної міцності типу EN36, відзначається наявність підвищених напружень, в порівнянні з технологією виробництва термічною обробкою

«загартуванням та відпуск», які проявляють себе при подальшій обробці прокату, зварюванні. Такі залишкові напруження можуть викликати утворення дефектів типу «розриви» зварених швів. Тому замовникам та переробникам необхідно враховувати цей стан прокату та корегувати технологію обробки цих сталей [107, 111].

Окремими напрямком розглядаються процеси оптимізації технології та можливості виробництва тонколистового прокату на товстолистових станах. Особливе значення при оптимізації технологічних процесів має врахування параметрів устаткування, що також відмічене авторами роботи [74], та дозволяє на етапі проектування керувати часом та температурою в комплексі з товщиною прокату, у тому числі в двофазній області, та зменшувати кількість проходів, як наведено авторами [53]. Окрему цікавість в роботі [53] становить режим прокатки при отриманні листа розмірами  $5 \times 3200$  мм зі сляба 150 мм, при розрахунку якого виконана оптимізація зі зменшенням кількості проходів з 15 до 13, що дало змогу підвищити температуру закінчення прокатки з  $713$  °С до  $821$  °С. Слід зазначити, що вказаний в існуючих літературних джерелах сортамент та способи оптимізації його виробництва є унікальними для кожного виробника з урахуванням характеристик устаткування, яке застосовується.

Вивчення термомеханічних процесів, що відбуваються на безперервних станах гарячої прокатки, є не менш поширеними [112, 113].

Одною з існуючих особливостей безперервних станів є велика довжина штаби, що обробляється. В залежності від товщини та можливостей устаткування, довжина штаби може сягати 1000 м, або більше. Вздовж всієї довжини штаби необхідно забезпечити рівномірність температури при охолодженні з перепадом не більше ніж  $20-30$  °С, для цього використовуються сучасні математичні моделі [114-118], за допомогою яких здійснюють керування установками прискореного охолодження. Безумовно, важливо щоб штаба вже поступала на охолодження з мінімальним розподілом температур. Для цього на сучасних безперервних станах для виготовлення нескінченних полос застосовуються декілька проміжних перемотувальний пристроїв, встановлених між чорною та чистою групами [119].

Моделювання температурного режиму гарячої прокатки широко досліджено авторами робіт [120-131]. Запропоновані рішення орієнтовані як на конкретні комплекси прокатного устаткування, так і на лабораторні прокатні стани. Залишається питанням універсальність існуючих моделей з можливістю їх застосування для розрахунку прокатних комплексів з різним складом основного технологічного устаткування.

Важливим моментом, зазначеним у праці [126], є потреба в отриманні точних моделей для проектування технології контрольованої прокатки мікролегованих марок сталі. Також важливість точного визначення температури відзначена авторами робіт [127] і [128] з метою забезпечення необхідної структури механічних властивостей і якісних характеристик прокату.

Слід зазначити, що в роботах [126-128, 130] авторами вивчалися дискретні процеси прокатки без прив'язки до конкретних виробничих комплексів.

У той же час в роботі [120] автори пропонують розрахунки і обґрунтовують використання різного дизайну технологічного устаткування з установкою CoilBox, а також з індукційної піччю, що дозволяє додатково підвищити температуру і знизити навантаження на прокатне устаткування. В роботі [131] авторами описаний спосіб розрахунку втрат температури на установці CoilBox, який враховує втрати на кожному витку. Даний спосіб є цікавим, проте сам спосіб або залежність в роботі не наведено. Також необхідна перевірка похибки, яка була одержана при використанні даного методу, так як загальна похибка моделі, за даними автора, становить понад 6 %. У той же час автори досліджували технологію в широкому діапазоні температур, в тому числі в двофазній області, що дозволяє застосовувати модель для процесів низькотемпературної контрольованої прокатки.

Точності в цілому моделей прокатки, з урахуванням температурних моделей, розроблених різними вченими, мають відмінності, що пов'язано з різною структурою моделей, підходами і методами розрахунків. Так авторами роботи [121] запропонований адаптований спосіб розрахунку, похибка якого не перевищує 3,4 % по клітках, в порівнянні з неадаптованим, похибка якого становила до 6 % від

фактичних даних по силі прокатки. В роботі [131] загальна похибка моделі також визначена розрахунком сили прокатки.

У вигляді самостійного елементу авторами робіт [122] і [128] запропонована температурна модель, похибка якої визначена в град. С. Так, відхилення температури в роботі [128], яке визначається двома способами, становить 4,2 °С, в роботі [122] відхилення температури на поверхні двох досліджених листів складала від -20 °С до +10 °С і від +10 °С до +30 °С відповідно. В роботі [124] авторами досліджено вплив швидкісних процесів на температурний перепад по довжині штаби, з урахуванням змотування на установці CoilBox, проте сама залежність не наведена. Також авторами умовно прийнято, що температура металу, змотаного в рулон не змінюється, що вносить певну похибку у розрахунки. У той же час в роботі [125] наведено залежності для визначення втрат температури при змотування на CoilBox, що базується на диференціальному рівнянні теплопровідності. Дані рівняння не враховують втрати температури в процесі змотування і розмотування штаби, що обмежує їх застосування.

Таким чином, існуючі залежності і методи для розрахунку втрат температури на установках CoilBox здебільшого є спрощеними, не враховують частини факторів і не забезпечують необхідну точність розрахунків. Наявної в літературних джерелах інформації недостатньо для універсального математичного або аналітичного опису процесів охолодження металу в установках CoilBox. Розрахунки, які виконуються інжиніринговими компаніями, мають обмежений доступ. Існуючі обмеження обумовлюють необхідність в розробці залежностей для широкого застосування в інженерних розрахунках температурних процесів прокатки в комплексі з устаткуванням CoilBox.

Поглиблене вивчення температурних процесів, які відбуваються при обробці металів тиском шляхом математичного моделювання, становить окрему цікавість [132-135]. Так, в роботі [132] автори вивчають змінення температури одночасно з фазовим перетворенням при охолодженні в процесі змотування рулону. В роботі [133] автори вивчають вплив температурних полів та теплових потоків на форму

штаби з можливістю керування в режимі реального часу. Вплив температурних полів на дефекти форми штаби автори роботи [134] вивчають зворотнім тримірним методом. Слід зазначити, що в цих роботах нахил вивчення зроблено на широкий діапазон змінення температур гарячої прокатки, в той час як технологія ТМСП має вузький температурний коридор, що потребує проведення окремих досліджень.

Відомо, що формування властивостей в процесах ТМСП відбувається в тому числі після прокатки та охолодження, так зване карбонітридне твердіння [136]. Отже, після змотування штаби в рулон, формування властивостей ще відбувається та викликає додаткові напруження. Тому важливо індивідуально, в залежності від категорії міцності сталі враховувати умови прискореного ламінарного охолодження [137, 138], а також впроваджувати додатковий режим охолодження рулонів після змотування [139, 140].

Окремим питанням при впровадженні технології ТМСП є дослідження якості. З підвищенням категорії міцності і відповідно підвищенням внутрішнього напруження в металі, серед інших, можуть з'являтися такі дефекти, як тріщини (тріщини напружень), на появу яких може впливати поєднання хімічних елементів, таких як Са, Al [141], використання яких в інших технологічних напрямках, раніше, навпаки, вважалося тільки покращенням.

Серед параметрів якості параметр, який є чутливим до рівномірного охолодження, це «площинність штаби», який надалі формує ще один параметр – «геометричну форму» рулону [142], тому важливо це враховувати як при оцінці можливостей існуючого устаткування, так і при розробці технології та верифікації отриманого результату.

Наступним кроком в розвитку та вдосконаленні технології термомеханічної прокатки рулонної сталі можна назвати виробництво прокату з TRIP-сталі (Transformation - Induced Plasticity - пластичність, що наведена перетворенням), метастабільна високоміцна аустенітна сталь з високою пластичністю. Така сталь застосовується для виготовлення високонавантажених виробів. При її виробництві необхідно забезпечити можливість впровадження декількох стадій



високошвидкісного (до 100 °C/c) охолодження прокату перед змотуванням [143, 144].

Слід зазначити еволюційне застосування технології ТМСП для виробництва ІФ сталі [145], впровадження технології термомеханічної прокатки для яких вважалося неефективним через малий вміст елементів в сталі та неможливість відтворити необхідні умови для створення бар'єрів для зупинення дислокацій [146, 147].

Окрему цікавість становлять дослідження технологічних процесів виробництва прокату за технологією ТМСП на станах Стеккеля.

Цільовим призначенням станів Стеккеля, які були спроектовані до 60-х років минулого століття, було виробництво рулонної трансформаторної сталі, легованих сталей, які вироблялись способом гарячої прокатки в аустенітній області.

З метою розширення сортаменту стани Стеккеля були модернізовані [50, 51, 148, 149] та обладнанні установками прискореного охолодження прокату, що дозволило суттєво розширити сортамент, у тому числі за рахунок застосування технології термомеханічного контрольованого процесу [76, 150-152]. Стани Стеккеля останніх поколінь вже мають увесь необхідний комплекс устаткування для виробництва широкого сортаменту вуглецевих, мікролегованих та спеціальних сталей, а також широко використовуються в комплексі ливарно-прокатних модулів [50, 51, 148, 149, 153, 154]. Функціонуючі стани за своєю конструкцією поділяються на декілька типів: одноклітьові, двоклітьові, з чорною кліттю, з додатковими чистовими клітнями [51, 154].

Сучасні стани в змозі виробляти не тільки важкодеформовані електротехнічні та вуглецеві сталі, а і високоміцні та корозійностійкі мікролеговані сталі [155, 156]. Також суттєво розширився розмірний сортамент: замість товщин 2-12 мм сучасні стани можуть виробляти прокат у товщинах від 1,5 мм до 50 мм, у тому числі в листах. Маса слябів, які використовуються, становить до 70 т [51]. Сучасні стани Стеккеля мають усе необхідне устаткування для виробництва високоякісного прокату.

Авторами роботи [148] досліджено енергосилові параметри процесу прокатки на стані Стеккеля та відзначено необхідність та важливість моделювання технологічного процесу для розрахунку виробничих агрегатів, для розглядання

динаміки температур, сили та моментів прокатки. Ця необхідність підтверджується приведеними в роботі [148] графіками з результатами моделювання. Проте інформація про математичні залежності, які були використані, є обмеженою.

Як і на інших станах, багатьма авторами виконувались дослідження комплексних процесів виробництва на станах Стеккеля [47, 150, 157-160] і дослідження окремих технологічних процесів, які також можна використати для проектування цілісної технології [161, 162]. Серед інших, дослідження впливу температури на формування структурних складових по довжині штаби при виробництві аустенітних сталей [157], результати яких можуть бути частково застосовані при розробці технології або її корегуванні на стані Стеккеля.

Виробництво високоміцних марок сталі, здебільшого, це прерогатива товстолистових станів. Але стан Стеккеля є комбінацією товстолистого та безперервного стану. Сортамент, що виробляють на станах Стеккеля, є змішаним.

Дослідження та виробництво прокату для труб великого діаметру категорії міцності X80 [76, 150] на цьому типі стану цілком обґрунтовані. Слід зазначити, що ці технології впроваджені на устаткуванні, яке збудоване у 90-х роках, що дозволяє зробити окремий аналіз технічних можливостей та відмінностей устаткування з устаткуванням, побудованим раніше. Зокрема, новий стан обладнаний системою керування температурою головної та хвостової частин розкатів через автоматичне регулювання витрати охолоджувальної води.

Виробництво на стані Стеккеля є досить складним процесом, тому безумовно дослідження процесів з використанням лабораторної моделі стану [158] дозволяють суттєво поглибити знання та покращити процеси промислового засвоєння технології.

Слід зазначити, що в існуючих літературних джерелах питання моделювання процесів на станах Стеккеля висвітлені недостатньо. Розрахунки, які виконуються інжиніринговими компаніями при проектуванні схожих станів мають обмежений доступ. Існуючі обмеження обумовлюють необхідність в розробці залежностей, які будуть широко застосовуватися в інженерних розрахунках температурних процесів прокатки на станах Стеккеля. Обмежена кількість досліджень залишає відкритим

питання з оцінки технічних можливостей існуючого устаткування станів Стеккеля по освоєнню нового сортаменту підвищених категорій міцності.

Таким чином, поширене вивчення та цільове впровадження технології ТМСР спостерігається на товстолистових, безперервних станах та станах Стеккеля з урахуванням технічних особливостей станів, їх устаткування та сортаменту прокату, як марочного, так і розмірного. Здебільшого дослідження стосуються впливу різних швидкостей прискореного охолодження, загального моделювання процесів ТМСР, оцінки їх точності, якості прокату, прогнозування впливу параметрів прокатки на механічні властивості. При цьому, дослідження впливу деформаційних процесів на формування вихідної структури термомеханічного прокату, що успадковується, з сучасною схемою мікролегування сталі може заповнити прогалину в загальних дослідженнях та розширити напрямки подальшого вивчення, в тому числі методами математичного моделювання, та вдосконалення технології ТМСР. Вивчення змінення розподілу температури по ширині підкату в умовах термомеханічної прокатки дозволить покращити процес розробки технології та забезпечити рівномірність розподілу механічних властивостей в готовому прокаті. Розробка закономірностей для розрахунку змінення температури підкату в установці CoilBox та в пічних моталках стану Стеккеля, які відсутні в наявних дослідженнях, дозволить встановити вплив цього устаткування на загальний процес розробки технології термомеханічної прокатки. Розширення класичного методу фізичного моделювання для вивчення, в лабораторних умовах, силових характеристик прокату, що виробляється термомеханічним способом, дозволить отримати необхідні дані для подальшої розробки технологічного процесу.

Відповідно до різних стандартів, трактування терміну «Термомеханічна прокатка» є майже однаковим [163-166]. Нижче наведені приклади терміну «Термомеханічна прокатка» згідно з деякими нормативними документами які ототожнюють основні групи призначення прокату.

При виробництві прокату з судносталі, згідно з класифікацією Bureau Veritas (BV), Правила на матеріали та зварку для класифікації морських споруджень NR 216

Глава 2 (п. 1.7.3) [163], термомеханічна прокатка ТМ (термомеханічний контрольований процес ТМСП) передбачає суворий контроль температури металу і обтиску при прокатці. Як правило, основна частина обтиску проводиться при температурі, наближеної до температури  $A_{r3}$ , і може припускати прокатку в двофазній області. Властивості після ТМ (ТМСП) не можуть бути відтворені наступною нормалізацією або іншими видами термообробки. По спеціальному схваленню товариства після прокатки може застосовуватися прискорене охолодження АСС, при якому забезпечується поліпшення механічних властивостей за рахунок контрольованого охолодження зі швидкістю більшою, ніж охолодження на повітрі.

При виробництві прокату з конструкційних марок сталі, згідно зі стандартом EN 10149-1 «Гарячекатаний плоский прокат зі сталей з високою границею плинності для холодної обробки тиском» [164], термомеханічна прокатка - це процес, при якому кінцева деформація відбувається в певному діапазоні температур, що дозволяє отримати матеріал з певними властивостями, які неможна досягти або повторити тільки за допомогою термообробки. Гаряча обробка тиском або термообробка після зварювання при температурі вище за  $580\text{ }^{\circ}\text{C}$  може погіршити значення тимчасового опору, і тому вказані види обробки краще не виконувати. Не рекомендується проводити наступне нагрівання до температури вище за  $400\text{ }^{\circ}\text{C}$  для марок S900MC та S960MC. Термомеханічна прокатка може включати процеси з прискореним охолодженням з відпуском, або без нього, в тому числі з самовідпуском, але виключаючи загартування з цементаційного нагріву та загартування і відпуск.

При виробництві прокату зі сталей для труб, згідно зі стандартом API Specification 5L «Специфікація на трубопровідні труби» [165] термомеханічний прокат - це стан поставки труби, отриманий в процесі гарячої прокатки штабового або листового матеріалу, коли остаточну деформацію проводять в певному інтервалі температур, внаслідок чого матеріал набуває певні властивості, які неможливо досягти або відтворити тільки однією термічною обробкою. Після деформації проводиться охолодження (можливо з прискореними темпами охолодження) з

відпуском або без нього, включаючи самовідпуск. Наступний нагрів понад 580 °C (1075 F) може знизити значення міцності.

При виробництві прокату зі сталей для посудин високого тиску, згідно зі стандартом ASTM A841/A841M «Стандартна специфікація на сталеві плити для посудин високого тиску, що виготовляються способом термомеханічного контрольованого процесу (ТМСР)» [166], метод ТМСР складається з регулювання швидкості прокатки та охолодження, що призводить до механічних властивостей готової пластини, еквівалентних тим, які досягаються за допомогою звичайних процесів прокатки та термообробки, які тягнуть за собою повторне нагрівання після прокатки. Внаслідок властивостей методу ТМСР пластини не можуть формуватися при підвищеній температурі без значних втрат у міцності та в'язкості. Пластини можуть бути сформовані і після зварювання та термооброблені при температурах, що не перевищують 1200 °F [650 °C].

Єдине трактування терміну та розуміння ТМСР всіма учасниками процесу виробництва та споживання дозволяє спільно використовувати переваги цієї продукції, результати досліджень та надалі розвивати цей технологічний напрямок.

## **1.2 Аналіз вимог до виробництва прокату способом термомеханічної прокатки**

### **1.2.1 Прокат конструкційного призначення**

Звичайний конструкційний прокат призначений головним чином для використання в машинобудівних та будівельних конструкціях звичайного масового призначення. В той же час, конструкційний прокат, що вироблений за технологією термомеханічної прокатки, за рахунок особливого комплексу властивостей має вже більш відповідальне призначення.

Конструкційний прокат, що виробляється по стандарту EN 10025-4 [167], призначений головним чином для використання на навантажених ділянках зварних

конструкцій, що піддаються великим навантаженням, такі як: мости, шлюзові затвори, резервуари-сховища, резервуари системи водопостачання та інші, для використання при температурі навколишнього середовища і низькій температурі. Прокат з конструкційних сталей згідно зі стандартом EN 10149-2 [168] придатний до зварювання, має високу границю плинності та застосовується для подальшої холодної обробки тиском.

Ці обидва типових та найпоширеніших Європейських стандарти регламентують виробництво конструкційного прокату за технологією термомеханічної прокатки, але мають деякі відмінності у вимогах до механічних властивостей та сортаменті сталей.

В додатку В, табл. В.1- В.6, наведено порівняння стандартів EN 10025-4, EN 10149-2 зі стандартом для виготовлення конструкційного прокату звичайного призначення EN 10025-2 [169]. Слід зазначити, що стандарт EN 10025-2 дозволяє виготовлення прокату способом гарячої, нормалізувальної та термомеханічної прокатки.

Стандартом EN 10025-4 регламентовано значно нижчий рівень вуглецевого еквіваленту в порівнянні зі стандартом EN 10025-2 для аналогічних марок сталі.

В стандарті EN 10149-2 вуглецевий еквівалент взагалі не застосовується, дотримання умов зварювання забезпечується більш низьким обмеженням хімічного складу. Проте, при розрахунку вуглецевого еквіваленту згідно з п. 7.2.3 стандарту EN 10025-1 [170], для хімічного складу відповідно до стандарту, маємо нижчий рівень СЕ в порівнянні з EN 10025-4 та значно нижчий рівень в порівнянні зі стандартом EN 10025-2, додаток В, табл. В.2, для марок сталі, що можна порівняти.

По трьох вказаних стандартах для аналогічних марок сталі регламентовано майже однаковий рівень границі плинності. Виняток становить змінення границі плинності в залежності від товщини прокату у випадках, регламентованих відповідними стандартами. У той же час, рівень тимчасового опору має відмінності як по стандартах, так і в залежності від товщини прокату. Тимчасовий опір прокату, що вироблений за технологією термомеханічної прокатки, має більш низький рівень,

ніж прокат по режимах гарячої прокатки. Цими обмеженнями дозволяють дотримуватися іншого показника механічних властивостей прокату, такого, як співвідношення «границя плинності / тимчасовий опір ( $\sigma_T/\sigma_B$ )». Цей показник не використано в перерахованих стандартах, але його використовують при виробництві прокату для труб, що буде показано в наступних підрозділах. Проте показник співвідношення  $\sigma_T/\sigma_B$  дуже важливий при розробці як хімічного складу так і термомеханічних режимів прокатки, які впливають на його рівень [165]. Тому в додатку В, таблиця В.4 показано його розраховане змінення по відповідних стандартах.

Слід зазначити, що в даній роботі використане уніфіковане позначення границі плинності  $\sigma_T$  та тимчасового опору  $\sigma_B$ . В наведених стандартах з урахуванням умов випробувань вказані показники можуть бути позначені іншим чином.

Розраховане співвідношення  $\sigma_T/\sigma_B$ , на підставі даних зі стандартів, для прокату, що виробляється способом термомеханічної прокатки, має більш високий рівень в порівнянні з прокатом, що виробляється способом гарячої прокатки. Це обумовлено властивостями самої сталі, що має більш низький рівень вуглецю та містить мікролегуючі елементи, які зсувають температуру перетворення аустеніту в ферит, забезпечуючи, таким чином, необхідний комплекс механічних властивостей та можливості зварювання. Також сталі, що виробляються способом термомеханічної прокатки, мають більш високі вимоги до відносного видовження, ніж сталі, що виробляються способом гарячої прокатки, для марок сталі, які можна порівняти.

Сталі, що виробляються способом термомеханічної прокатки, мають більш високі вимоги до енергії удару, ніж сталі, що виробляються способом гарячої прокатки, для марок сталі, які також можна порівняти. Це ствердження стосується як самого рівня енергії удару, так і більш низьких температур випробувань, які для гарячекатаного прокату взагалі не застосовуються.

Порівняння вимог по стандартах до вуглецевого еквіваленту CE та співвідношення  $\sigma_T/\sigma_B$ , в залежності від границі плинності прокату, наведено на рис. 1.2 – 1.3.

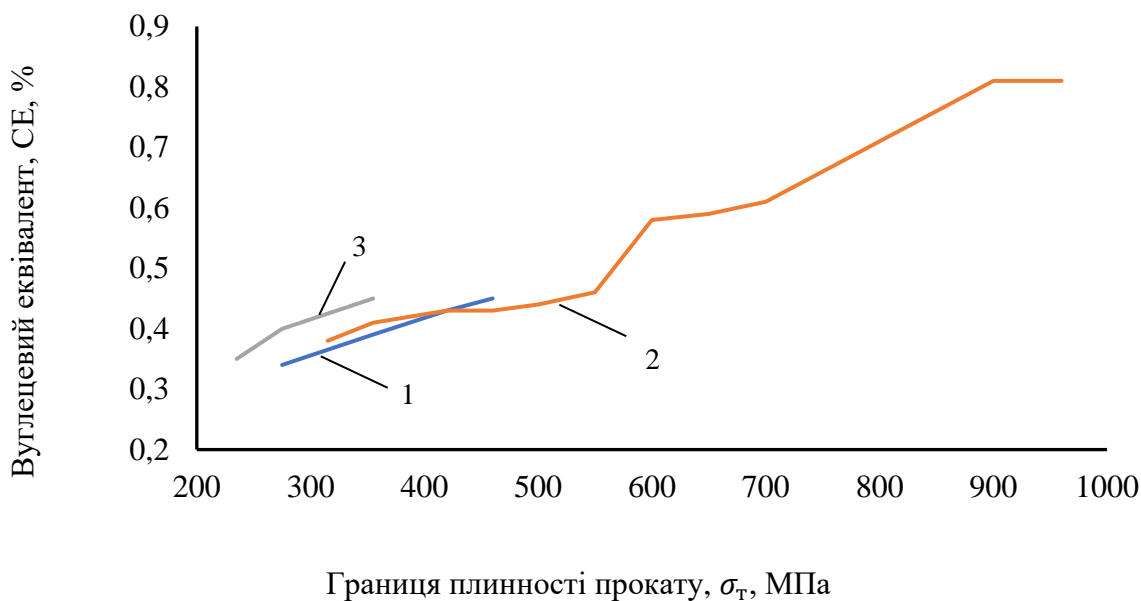


Рисунок 1.2 – Залежність вуглецевого еквіваленту від границі плинності прокату, згідно з вимогами/розрахунками по стандартах EN 10025-4 (1), EN 10149-2 (2) та EN 10025-2 (3)

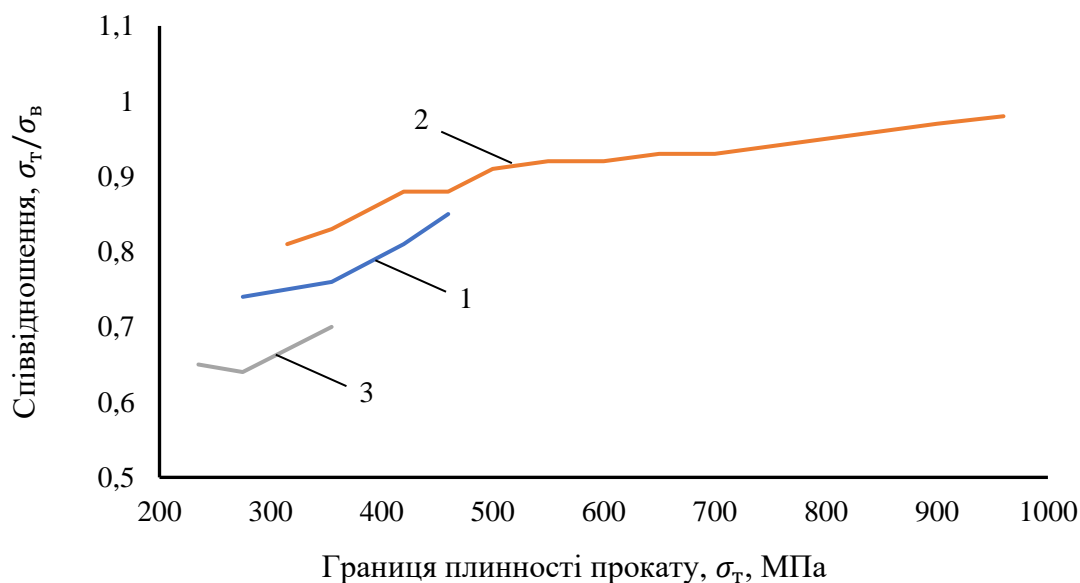


Рисунок 1.3 – Залежність розрахованого співвідношення  $\sigma_T/\sigma_B$  від границі плинності прокату, згідно з вимогами стандартів EN 10025-4 (1), EN 10149-2 (2) та EN 10025-2 (3)

Вуглецевий еквівалент для марок сталі з границею плинності більшою, ніж 550 МПа, див. рис. 1.2, не є показовим, так як розрахований виходячи з



максимального обмеження хімічного складу без встановлення обмежень по зварюванню.

На підставі порівняння даних зі стандартів для виробництва конструкційного прокату, а також додатково розрахованих показників, можна зазначити основні відмінності або переваги прокату, що виробляється способом термомеханічної прокатки, від прокату, що виробляється способом гарячої або нормалізувальної прокатки:

- хімічний склад має менше вуглецю та містить більше обмежень щодо таких мікролегуючих елементів як Ti, Nb, V, Ni, Cr, Mo, B та інші, використання яких, за рахунок меншого рівня вуглецевого еквіваленту, забезпечує краще зварювання прокату, див. рис. 1.2;

- механічні властивості характеризуються більш низьким рівнем тимчасового опору при майже однаковому рівні границі плинності, тобто показник співвідношення  $\sigma_T/\sigma_B$  є вищим, див. рис. 1.3. Такий стан повинен вимагати встановлення додаткового обмеження та контролю, особливо при використанні прокату в конструкціях, що підлягають розтягненню. Слід зазначити, що наразі цей показник відсутній у вимогах для виробництва конструкційного прокату. Часткова втрата рівня тимчасового опору обумовлена концептуальним підходом до хімічного складу та є типовою для сталі, що використовується для термомеханічного прокату;

- відносне видовження має більш високий рівень вимог. Також більш високий рівень вимог до енергії удару, це стосується як самого рівня енергії удару, так і більш низьких температурі випробувань, які для стану гарячекатаного прокату взагалі не застосовуються;

- технологія термомеханічної прокатки дозволяє виробляти значно ширший асортимент прокату з більш високим рівнем механічних характеристик при інших рівних умовах, ніж технологія гарячої або нормалізувальної прокатки.

Основні показники якості прокату конструкційного призначення, що виробляється способом термомеханічної прокатки, наступні: – хімічний склад з вмістом мікролегуючих елементів; – вуглецевий еквівалент, CE; – границя плинності,

$\sigma_T$ ; – тимчасовий опір,  $\sigma_B$ ; – відносне видовження,  $\delta$ ; – холодний згин (в роботі не досліджувався, з огляду на візуальне визначення результату цього випробування); – енергія удару, KV.

Таким чином, комплексна технологія термомеханічної прокатки, за рахунок особливого хімічного складу та термомеханічних режимів, забезпечує комплекс механічних властивостей прокатки, що має високі властивості міцності та пластичності в поєднанні з більш високою холодостійкістю.

Відмінності у стандартах EN 10025-4 та EN 10149-2 пов'язані суто з призначенням кінцевої продукції та не порушують загальної концепції. Наприклад, вимоги до нижчого рівня тимчасового опору по EN 10149-2 обумовлені використанням цього прокату для подальшої холодної обробки тиском.

### **1.2.2 Прокат для виробництва труб**

Прокат для трубопровідного транспорту призначений для подальшого вироблення різноманітного марочного та розмірного сортаменту труб. Широкий сортамент труб, що виробляються, використовується для виготовлення різноманітних конструкцій та для транспортування різних речовин та рідини. Кінцеве призначення труб визначає необхідний перелік властивостей, які, в свою чергу, повинен мати прокат для їх виготовлення.

Слід зазначити, що властивості/вимоги до прокату, який використовується для виробництва труб, та властивості/вимоги до самих труб мають відмінності, які обумовлені способами виробництва та впливом відомого ефекту Баушингера [171, 172]. З метою врахування змінення властивостей прокату при трубній переробці між конкретним виробником труби та виробником прокату розробляється окремий документ, який містить технічні вимоги. Також цей документ може бути розроблений профільним інститутом та узгоджений з усіма зацікавленими сторонами.

Для виробництва труб загального та конструкційного призначення існує багато стандартів, наприклад стандарт ГОСТ 13663 «Труби сталеві профільні. Технічні вимоги» [173], який розповсюджується на виробництво профільних труб загального призначення з вуглецевої сталі, заготовкою для яких є звичайний гарячекатаний прокат. Стандарт ГОСТ 10705 «Труби сталеві електрозварні. Технічні вимоги» [174] розповсюджується на виробництво сталевих електрозварних прямошовних труб з вуглецевої сталі, які застосовуються для трубопроводів та конструкцій різноманітного призначення. Заготовкою для виготовлення цих труб є також гарячекатаний прокат, який вироблено без температурних обмежень. Стандарт ГОСТ 3262 «Труби сталеві водогазопровідні. Технічні умови» [175] розповсюджується на зварні труби, що застосовуються у водопроводах, газопроводах системах опалення, а також в деталях водогазопровідних конструкцій. Слід зазначити, що згідно з п. 2.1 цього ГОСТ, труби виробляються без вимоги до механічних властивостей та хімічного складу. Звичайно, що заготовкою для цих труб є гарячий прокат без особливих вимог.

Зі схожими вимогами та областю застосування труб в Сполучених Штатах Америки поширено використовується стандарт ASTM A53/A53M «Стандартна специфікація на сталеві труби без покриття та з цинковим покриттям, нанесеним шляхом занурення у ванну з розплавом, зварні та безшовні» [176]. Труби згідно з цим стандартом призначені для використання при механічних роботах та роботах під тиском, вони також можуть застосовуватись для паропроводів, водопроводів, газопроводів та повітропроводів. Заготовкою для виготовлення цих труб є звичайний гарячекатаний прокат, який вироблено без температурних обмежень, та прокат, що можливо виробляти за допомогою технології термомеханічної прокатки, при цьому вимоги до особливих властивостей в стандарті відсутні.

Також, конструкційне призначення мають труби, що виробляються по стандарту ASTM A500/A500M «Стандарт для холодногнутих зварних та безшовних цільнотянутих конструкційних труб круглого та фасонного перерізу з вуглецевої сталі» [177]. Ці труби використовують для виконання зварних, болтових та клепаних

з'єднань в конструкціях мостів, будівель, а також тих, що мають загальне конструкційне призначення. Серед переліку марок сталі, які використовуються при виробництві труб по цьому стандарту, є ті, прокат для яких виробляється за технологією термомеханічної прокатки. Однак, зважаючи на цільове призначення труб, особливі вимоги до їх властивостей в стандарті ASTM A500/A500M не застосовуються.

Окреме місце займає прокат для трубопровідного транспорту, який виробляється згідно з вимогами Американського інституту нафти API Specification 5L (API-5L) [165]. Дія цього стандарту розповсюджується на виготовлення зварних та безшовних труб двох рівнів якості PSL 1 та PSL 2, що застосовуються в трубопровідних транспортних системах в нафтовій та газовій галузях промисловості. Рівень PSL 1 встановлює базовий рівень якості для трубопровідних труб.

Рівень PSL 2 містить додаткові обов'язкові вимоги до хімічного складу, ударної в'язкості і властивостей міцності, а також додаткові неруйнівні випробування. Відповідно до цих вимог формуються вимоги до прокату, що повинен проходити той самий перелік випробувань, що і труби.

На відміну від стандартів на продукцію конструкційного призначення, в стандарті API-5L, з огляду на високу відповідальність продукції та можливі техногенні та екологічні наслідки, окрім особливого переліка вимог до труб регламентовано також вимоги до заготовки, тобто прокату.

Перелік можливих умов поставки прокату, згідно зі стандартом, наведено в табл. 1.1.

Порівняння рівня вимог по різних стандартах для виробництва труб наведено в додатку В, табл. В.7, В.8.

Дані в таблиці 1.1 свідчать про те, що прокат найвищих категорій міцності (марок сталі) з найвищими вимогами, тобто рівня PSL 2, можна отримати тільки способом термомеханічної прокатки.

Таблиця 1.1 – Умови поставки прокату для виробництва труб

Рівень якості, PSL	Умови поставки	Марка сталі
1	2	3
PSL 1	гаряча прокатка, нормалізувальна прокатка, нормалізація	A25
		A25P
		A
	гаряча прокатка, нормалізувальна прокатка, термомеханічна прокатка, нормалізація, нормалізація та відпуск	B
PSL 1	гаряча прокатка, нормалізувальна прокатка, термомеханічна прокатка, нормалізація, нормалізація та відпуск або загартування та відпуск	X42
		X46
		X52
		X56
		X60
		X65
		X70
PSL 2	гаряча прокатка	BR
		X42R
	нормалізувальна прокатка, нормалізація, нормалізація та відпуск	BN
		X42N
		X46N
		X52N
		X56N
		X60N
	загартування та відпуск	BQ
		X42Q
		X46Q
		X52Q
		X56Q
		X60Q
		X65Q
		X70Q
	X80Q	
	термомеханічна прокатка	BM
		X42M
		X46M
		X52M
		X56M
		X60M
X65M		
X70M		
X80M		
X90M		
X100M		
X120M		

Порівняння вимог, по стандартах, до вуглецевого еквіваленту двох типів СЕ, СЕРст та співвідношення  $\sigma_T/\sigma_B$ , в залежності від границі плинності прокату, наведено на рис. 1.4 – 1.6.

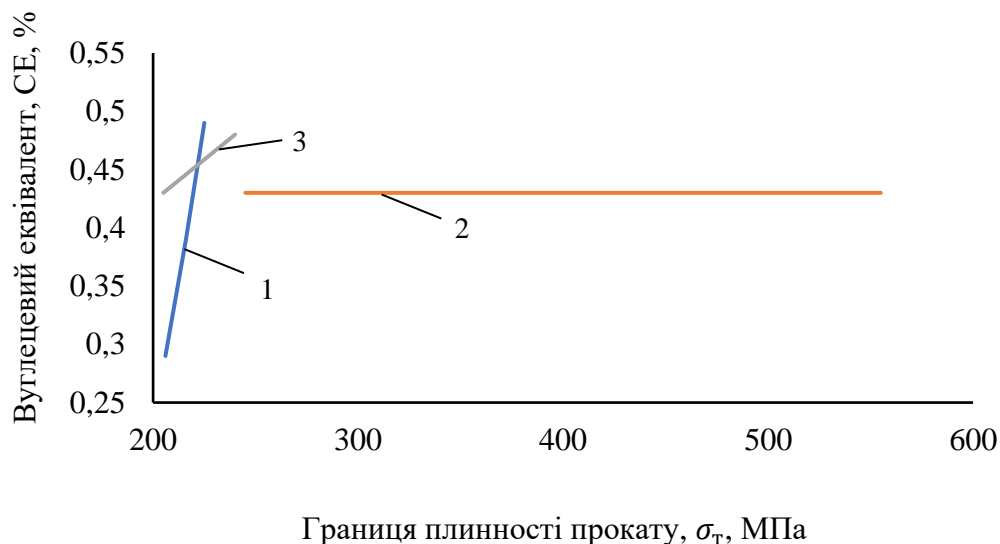


Рисунок 1.4 – Залежність вуглецевого еквіваленту СЕ від границі плинності прокату, згідно з вимогами/розрахунками по стандартах ГОСТ 10705 (1), API-5L (2), ASTM A53/A53M (3)

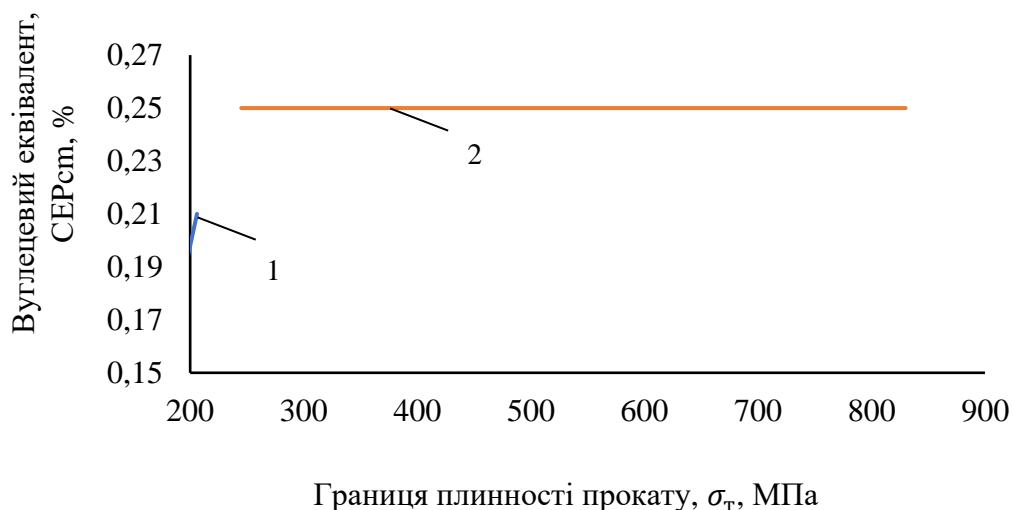


Рисунок 1.5 – Залежність вуглецевого еквіваленту СЕРст від границі плинності прокату, згідно з вимогами/розрахунками по стандартах ГОСТ 10705 (1), API-5L (2)

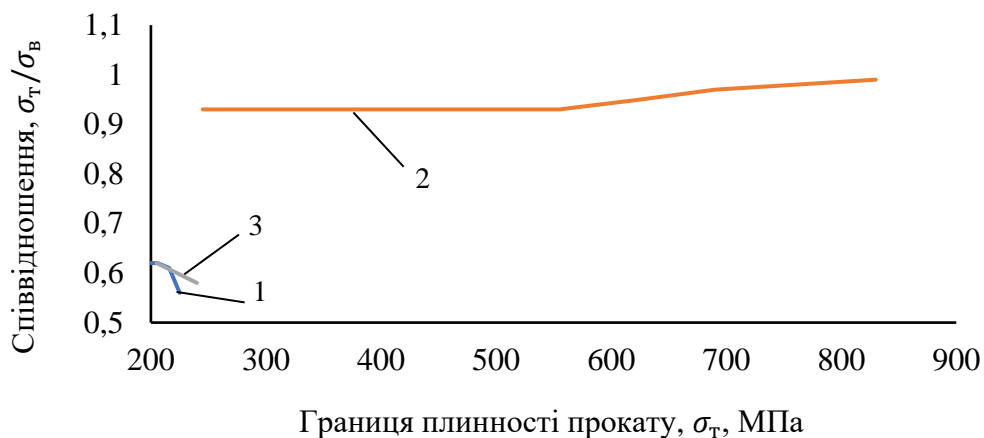


Рисунок 1.6 – Залежність співвідношення  $\sigma_T/\sigma_B$  від границі плинності прокату, згідно з вимогами/розрахунками по стандартах ГОСТ 10705 (1), API-5L (2), ASTM A53/A53M (3)

Таким чином, прокат/труби, які призначені для трубопровідного транспорту, мають наступні відмінності від прокату/труб конструкційного призначення:

- хімічний склад містить більше обмежень щодо мікролегуючих елементів, таких як Ti, Nb, V, Ni, Cr, Mo, B та інших, що забезпечує краще зварювання прокату;
- використання однакового для всіх марок сталі обмеження щодо максимального рівня вуглецевого еквіваленту двох типів (CE для прокату з вмістом вуглецю  $>0,12\%$  та  $CE_{Pcm}$  для прокату з вмістом вуглецю  $\leq 0,12\%$ ) яке невід'ємно пов'язане з комплексним хімічним складом сталі/прокату. Застосування вимог CE та  $CE_{Pcm}$  з розподілом по категорії міцності сортаменту наявно показано на рис. 1.4, 1.5. Слід зазначити, що в стандартах конструкційного призначення таке обмеження взагалі не застосовується, а рівень, який було розраховано, показав як менші, так і більші значення цього показника в порівнянні зі стандартом API-5L (PSL 2);
- використовується обмеження щодо показника співвідношення  $\sigma_T/\sigma_B$ , застосування якого обумовлено особливостями хімічного складу та термомеханічними режимами прокатки; рівень співвідношення прокату/труб для трубопровідного транспорту сягає 0,93-0,97, в той час, як цей показник для

прокату/труб конструкційного призначення стандартами взагалі не обмежений, а його розрахований рівень становить максимум 0,56-0,62, див. рис. 1.6;

- з підвищенням категорії міцності прокату/труб максимальний рівень вмісту вуглецю знижується з одночасним зниженням шкідливих домішок та збільшенням допустимого рівня  $Mn$  та мікролегуючих елементів. В стандартах для труб конструкційного призначення, навпаки, збільшення міцності здійснюється переважно за рахунок збільшення вмісту вуглецю;
- в якості обов'язкових випробувань застосовується випробування енергії удару KV та оцінка площі зламу при випробуванні падаючим вантажем DWT, що свідчить про підвищені умови експлуатації труб, зокрема запобіганню крихкому руйнуванню трубопроводів.

Необхідно відмітити, що використання таких показників як  $\sigma_T/\sigma_B$ , CE, CERcm, KV та площа зламу застосовується тільки для трубопровідного транспорту по API-5L, рівня якості PSL 2. Рівень якості PSL 1 таких обмежень та випробувань не передбачає.

При порівнянні способів виробництва прокату для труб, стандарт API-5L дозволяє використовувати різноманітні технології, включаючи термічну обробку для виробництва прокату для труб. Але кожний спосіб виробництва має обмеження щодо сортаменту. Найвищі категорії міцності, вище X80, в якості PSL 2, згідно зі стандартом API-5L, виробляють тільки способом термомеханічної прокатки.

Основні показники якості прокату для виробництва труб, що виробляється способом термомеханічної прокатки, наступні: – хімічний склад з вмістом мікролегуючих елементів; – вуглецевий еквівалент, CE та CERcm; – границя плинності,  $\sigma_T$ ; – тимчасовий опір,  $\sigma_B$ ; – співвідношення  $\sigma_T/\sigma_B$ ; – відносне видовження,  $\delta$ ; – енергія удару, KV; – випробування падаючим вантажем DWT.

Таким чином, комплексна технологія термомеханічної прокатки забезпечує можливість виробництва всього переліку сортаменту стандарту API-5L, від марки В до марки (категорії міцності) X120, у найвищому рівні якості PSL 2.



Для оцінки різниці між конструкційним прокатом та прокатом для труб, що виробляється способом термомеханічної прокатки, основні показники якості зведені в табл. 1.2.

Таблиця 1.2 – Порівняння основних показників якості прокату, що виробляється способом термомеханічної прокатки, в залежності від кінцевого призначення

Показник якості <sup>a</sup>	Призначення прокату			
	конструкційний прокат		прокат для труб	
	наявність показника в стандарті	рівень показника	наявність показника в стандарті	рівень показника
1	2	3	4	5
Хімічний склад з вмістом мікролегуючих елементів	+	порівнянний	+	порівнянний
Вуглецевий еквівалент, СЕ	+/-	≤(0,34-0,46)	+	≤0,43
Вуглецевий еквівалент, СЕРст	-	-	+	≤0,25
Границя плинності, $\sigma_T$ , МПа <sup>b</sup>	+	від 275 до 960	+	від 245 до 830
Тимчасовий опір, $\sigma_B$ , МПа <sup>b</sup>	+	від 370 до 980	+	від 415 до 915
Співвідношення $\sigma_T/\sigma_B$	-	-	+	≤(0,93-0,99)
Відносне видовження, $\delta$ , %	+	≥(24-7)	+	≥(23-11)
Енергія удару, KV, Дж <sup>c</sup>	+	≥(47-55)	+	≥(27-40)
Випробування падаючим вантажем DWT, площа зламу, %	-	-	+	≥85

<sup>a</sup> в таблиці вказані тільки ті параметри та їх рівні які регламентовано відповідними стандартами, що наведені вище

<sup>b</sup> вказана нижня межа

<sup>c</sup> наведено для порівняння при температурі випробувань 0 °С

Основні від'ємності, що відрізняють прокат по призначеннях, є застосування для прокату для труб показника СЕРст, що свідчить про використання сталей з вмістом вуглецю менше за 0,12%, використання показника  $\sigma_T/\sigma_B$ , дотримання обмежень якого в прокаті конче необхідно при подальшому випробуванні – експандуванні труб, а також випробування DWT, яке дозволяє запобігати крихкому руйнуванню трубопроводів.

Слід зазначити, що порівняння вимог до прокату, який буде використано при подальшому виготовленні труб, виконано без врахування ефекту Баушингера [171, 172]. В порівнянні використано перелік вимог, який стосується

тільки прокату (основного металу труби) без унікальних вимог, які стосуються тільки труби. В якості заготовки для виробництва труб в наведених стандартах розглянуто тільки гарячекатаний прокат з усіма можливими варіантами виробництва (безпосередньо гаряча прокатка без температурних обмежень, нормалізувальна прокатка, термомеханічна прокатка, прокатка з подальшою термообробкою). В якості заготовки не розглядався холодний прокат, оцинкований прокат та гарячекатані безшовні труби.

Зазначені в роботі ГОСТи наведені тільки в якості порівнювальних та можуть бути не діючими на території України, відповідно до Закону України «Про стандартизацію» від 05.06.2014 р. та щорічної Програми работ з національної стандартизації, Державного підприємства «Український науково-дослідний і навчальний центр проблем стандартизації, сертифікації та якості» (ДП «УкрНДНЦ»).

### **1.3 Аналіз рівня устаткування вітчизняних та деяких закордонних станів гарячої прокатки**

#### **1.3.1 Товстолистові стани гарячої прокатки**

##### **1.3.1.1 Стан 3000 металургійного комбінату «ММК ІМЕНІ ІЛЛІЧА»**

В Україні є два діючі товстолистові стани гарячої прокатки: стан 3000 металургійного комбінату «ММК ІМЕНІ ІЛЛІЧА» та стан 3600 металургійного комбінату «МК «АЗОВСТАЛЬ». В якості альтернативного, розглянуто стан 3200 заводу Trametal, Італія.

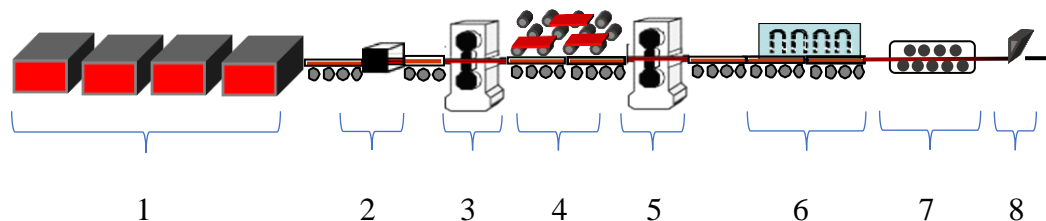
Розглянемо окремо схему виробництва, основне устаткування та сортамент, що виробляють стани.

Стан 3000 виробляє товстолистовий прокат товщиною 6-50 мм, шириною 1500-2700 мм та довжиною до 25000 мм.

В залежності від вимог замовників та/або стандартів, на стані 3000 виробляється продукція у стані гарячекатаному, після нормалізувальної прокатки, після термомеханічної прокатки. Наразі, устаткування для прискореного охолодження прокату після стану не працює, тому можливість виготовлення прокату способом термомеханічної прокатки з прискореним охолодженням відсутня.

Схема розташування основного устаткування стану наведена на рис. 1.7.

В якості заготовки для виробництва прокату використовуються безперервнолиті сляби, що виробляються в конвертерному цеху «ММК ІМЕНІ ІЛІЧА», також в невеликих об'ємах використовуються сляби виробництва «МК «АЗОВСТАЛЬ» з розмірами 150-315×1100-1850×2300-2850 мм, або катані сляби власного виробництва з розмірами 120-250×1100-1850×2300-2850 мм, для виробництва більш тонкого сортаменту.



- |   |   |
|---|---|
| 1 – дільниця методичних печей;                  | 5 – чистова реверсивна кліть;           |
| 2 – камера гідрозбиву окалини                   | 6 – установка прискореного охолодження; |
| 3 – чорнова реверсивна кліть;                   | 7 – ролико-правильна машина;            |
| 4 – байпас для проміжного охолодження підкатів; | 8 – поперечні ножиці.                   |

Рисунок 1.7. Схема розташування основного устаткування стану 3000 «ММК ІМЕНІ ІЛІЧА»

Основне технологічне устаткування стану 3000 включає (див. рис. 1.7) чотири методичні нагрівальні печі з крокуючими балками; камеру гідрозбиву для попереднього видалення окалини; двохклітьовий реверсивний прокатний стан кварто; байпас для проміжного охолодження підкатів (дільниця з холодильників дискового типу, яка використовується з метою накопичування та природнього або прискореного, за допомогою промислових аераторів, охолодження підкатів перед

чистою кліттю); установку прискореного ламінарного охолодження металу після прокатки (наразі не діє); ролико-правильні машини (РПМ-1 для гарячої правки, та РПМ-2,3 для холодної правки); ножиці поперечної різки (ПН-1, ПН2,5,6,7); чотири холодильники дискового типу для охолодження після прокатки; здвоєні крайкообрізні ножиці (ЗКОН-3,4); два ультразвукові дефектоскопи для неруйнівного контролю якості прокату; машину гарячого маркування (МГМ №2279); клеймувально-маркувальні машини (КММ №2280, №2281).

Стан обладнаний системою автоматичного керування технологічним процесом.

Все устаткування стану 3000 спроектоване на прокатування та обробку товстих листів з границею плинності  $\leq 736$  МПа та тимчасовим опором  $\leq 883$  МПа.

Зовнішній вигляд дільниці робочих клітей стану 3000 наведений на рис. 1.8.

Технічні характеристики основного устаткування стану наведені в додатку Г, табл. Г.1.1–Г.1.6.



Рисунок 1.8 – Зовнішній вигляд дільниці робочих клітей стану 3000 з зображенням чорнової кліті, байпасу та чистої кліті

Відповідно до проекту, стан 3000 був призначений для виробництва товстолистового прокату для подальшого виготовлення електрозварних труб

великого діаметру безпосередньо способом термомеханічної прокатки. Тому комплекс має відповідний набір та технічні характеристики основного устаткування.

Слід зазначити, що наразі, всім відома технологія протифлокеної обробки прокату (ПФО), згідно з проектом стану 3000 не була передбачена. Обладнання спеціальної ділянки та впровадження технології ПФО було здійснено в стислих умовах діючого процесу виробництва, без необхідної інфраструктури (спеціальні столи для знімання прокату магнітними кранами, недостатньо місць для складання прокату, відсутність автоматичного контролю температури складання прокату). Наразі ділянка ПФО є вузьким місцем стану 3000, так як вона здатна обробляти не більше ніж 27 тис. т. прокату на місяць, що становить не більше ніж 20 % від загального виробництва.

Сортамент товстолистового прокату, що наразі виробляє стан 3000, наведений в табл. 1.3.

Серед основних характеристик, необхідних для виробництва якісної продукції та забезпечення термомеханічного процесу на стані 3000 є наступні:

- наявність печей з крокуючими балками, які дозволяють вести нагрівання без травмування нижньої частини слябів (як, наприклад в печах штовхального типу), а також повністю вивантажувати сляби з печей при технологічних або аварійних простоях устаткування. Цей момент є дуже важливим, так як відомо, що при термомеханічному процесі час нагрівання повинен бути обмежений. Порушення режиму нагрівання призводить до розчинення більшої кількості карбонітридів V та Nb та до збільшення розміру аустенітного зерна;

- висока потужність та сила прокатки обох прокатних клітей, що дозволяє вести термомеханічний процес з виконанням необхідних умов по обтисненню (не менш ніж 10 % за прохід, а для деяких марок сталі не менш ніж 20 %), а також здійснювати термомеханічну прокатку як з прискореним охолодженням, так і без нього, так звану низькотемпературну контрольовану прокатку, яка потребує підвищення сили, так як здійснюється в діапазоні температур аустенітна-феритного перетворення;

- наявність байпасу забезпечує дотримання термомеханічного режиму без

Таблиця 1.3 – Основні групи сортаменту товстостінового прокату, що виробляє стан 3000

Призначення прокату	Стандарт	Марки сталі
Прокат для подальшого виробництва електрозварних труб для транспортування нафти та газу <sup>а</sup>	ТУ 14-1-1921; ТУ 14-1-3636; ТУ 14-1-3978; ТУ 14-1-4034; ТУ 14-1-4083; ТУ 14-1-4627; ТУ 14-1-5293; ТУ 14-100-МКИ	13ГС, 13Г1СУ, 17ГС, 17Г1С, 09Г2ФБ, 10Г2ФБ, 10Г2ФБЮ, Х70 та їх аналоги
Прокат для суднобудування	ABS, DNV GL, LR, BV, RINA, ASTM A131/A131M, РС, ГОСТ 52927, ГОСТ 5521	А, В, D, Е, АН27S, DH27S, ЕН27S, АН32, DH32, ЕН32, АН36, DH36, ЕН36, АН40, DH40, ЕН40
Прокат для котлів та посудин, що працюють під тиском, в тому числі при підвищених та низьких температурах	ASTM A204/A204M; ASTM A285/A285M; ASTM A299/A299M; ASTM A515/A515M; ASTM A516/A516M; ASTM A662/A662M;	А, В, С, D, 299, 55, 60, 65, 70
	EN 10028-2; EN 10207	P265 GH, P295 GH, P355 GH, P235S, P265S, P275SL та інші
	ГОСТ 5520	20К, 09Г2С та інші
Прокат для конструкцій загального та спеціального призначення, у тому числі стійкий до атмосферної корозії	ASTM A36/A36M; ASME SA36/SA36M; ASTM A283/A283M; ASTM A572/A572M; ASTM A573/A573M; ASTM A588/A588M; ASTM A709/A709M;	A36, C, D, 42, 50, 55, 60 type 1-5, 58, 65, 70, А, В, С, К, 36 (250) та інші
Прокат для конструкцій загального та спеціального призначення, у тому числі стійкий до атмосферної корозії	EN 10025-2, EN 10025-3, EN 10025-4, EN 10025-5, EN 10113-2, EN 10113-3, EN 10149-2, EN 10149-3, EN 10155	S235, S275, S355 всіх категорій, S355N, S355NL та інші, S355M, S355ML та інші, S235JOW, S235J2W, S355JOW та інші, S355MC, S420MC, S460MC та інші, S260NC, S315NC, S355NC, S420NC
	CSA G 40.21	300W, 350W та інші
	JIS G 3101, JIS G 3106	SS400, SS490 та інші
	ГОСТ 19281, ГОСТ 14637, ГОСТ 1577, ГОСТ 27772	09Г2С, 10ХСНД, 17Г1С та інші, Ст3Гсп, Ст3сп та інші, 20, 45, 65Г, С235, С245, С345

<sup>а</sup> наведені типові нормативні документи, що розроблені профільними інститутами, у тому числі під конкретні проекти. Для умов поставки на закордонні ринки між Замовником та Виробником розробляються окремі документи з відповідними вимогами Замовника, на підставі стандартів на трубу, вимог проекту, з урахуванням впливу процесу виробництва Замовника

втрати продуктивності стану, за рахунок накопичування на ньому підкатів та їх охолодження перед чистою прокаткою;

- наявність, згідно з проектом, установки прискореного охолодження для здійснення режиму термомеханічної прокатки з прискореним охолодженням. Нажаль, наразі ця установка не є діючою, а термомеханічний процес на стані 3000 здійснюється без прискореного охолодження, що обмежує можливості стану.

- наявність автоматичної системи керування процесом прокатки, що є важливою складовою виробництва термомеханічного прокату, у тому числі для отримання ідентичності показників якості між розкатами;

- розкочувальні поля мають достатню довжину для розміщення цілих розкатів, що є перевагою цього стану та не потребує синхронізації з одночасним використанням декількох видів устаткування при здійсненні процесу прокатки.

Слід зазначити, що вузьким місцем для розвитку технології термомеханічної прокатки на стані 3000 є дільниця протифлокеної обробки без належної інфраструктури.

Відсутність устаткування для термічної обробки прокату обмежує гнучкість технологічного процесу та унеможлиблює виправлення властивостей прокату, що отримані при виробництві на стані.

### **1.3.1.2 Стан 3600 металургійного комбінату «МК «АЗОВСТАЛЬ»**

Стан виробляє товстолистовий прокат та плити товщиною 6-200 мм, шириною 1500-3200 мм та довжиною 6000-12200 мм. По спеціальних заказах, переважно це стосується виробництва прокату для труб великого діаметру, товстий лист може виготовлятися шириною до 3300 мм. На стані 3600 плитою вважається прокат, товщина якого більша за 50,8 мм. Наразі, через технічний стан клітей кварто, прокат товщиною 6-7 мм не виробляється.

Згідно з вимогами стандартів на стані 3600 може бути вироблена продукція у стані після гарячої, нормалізувальної та термомеханічної прокатки, у тому числі з

прискореним охолодженням. Також, зважаючи на наявність устаткування, стан може виробляти продукцію після термічної обробки нормалізацією, відпуск, загартування з відпуском.

Схема розташування основного устаткування стану 3600 наведена на рис. 1.9.

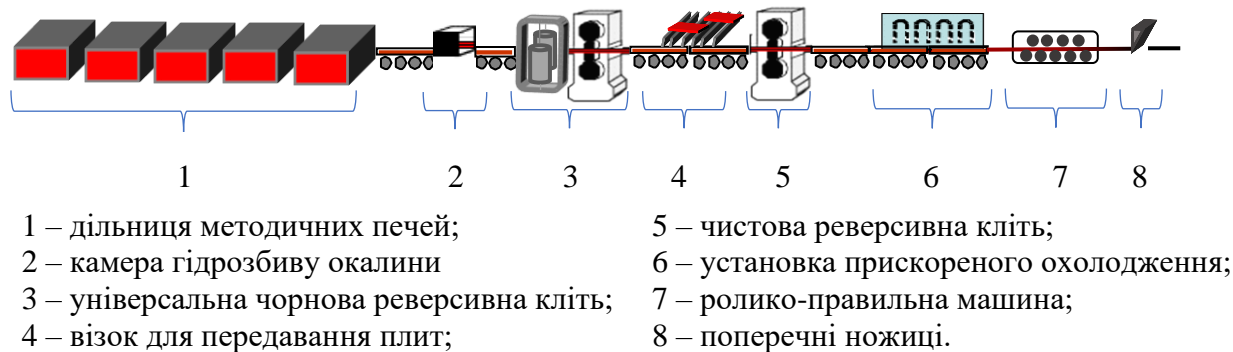


Рисунок 1.9 – Схема розташування основного устаткування стану 3600 «МК «АЗОВСТАЛЬ»

Заготовкою для виробництва продукції на стані 3600 є безперервноліті сляби виробництва конвертерного цеху «МК «АЗОВСТАЛЬ» та катані сляби власного виробництва товщиною 130-350 мм, шириною 1100-1920 мм та довжиною 920-3420 мм. Зовнішній вигляд робочих клітей стану 3600 наведений на рис. 1.10.

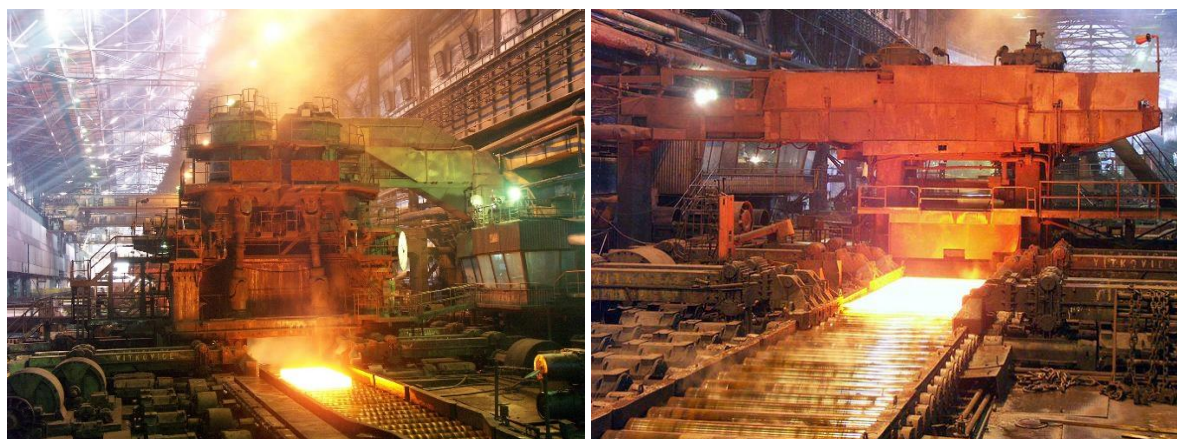


Рисунок 1.10 – Зовнішній вигляд універсальної чорнової кліті (ліворуч) та чистової кліті (праворуч) стану 3600



Основне технологічне устаткування стану 3600 включає (див. рис. 1.9) п'ять методичних нагрівальних печей штовхального типу; камеру гидрозбиву для попереднього видалення окалини; двохклітьовий реверсивний прокатний стан кварто, з універсальною чорною кліттю; візок для передавання плит в інший проліт, на ділянку для їх подальшої обробки; установку прискореного ламінарного охолодження прокату після прокатки; ролико-правильні машини, РПМ-8 для гарячої правки та РПМ-1-7 для подальшої гарячої та холодної правки; ножиці поперечної різки з машиною гарячого маркування (ПН-1, ПН-2, 5,6,7,8); чотири холодильники дискового типу для охолодження після прокатки та після термічної обробки; здвоєні крайкообрізні ножиці (ЗКОН-3,4); ультразвукові дефектоскопи для неруйнівного контролю якості прокату ДУЕТ 1,2; комплекс шлеперів та кантувачів для огляду прокату з двох сторін та передавання в інші проліти; печі з роликовим та висувним подом для термічної обробки товстих листів та плит; ролико-загартувальну машину та загартувальні машини ванного типу; прес для правки плит; клеймувальні машини.

Стан обладнаний системою простеження для контролю технологічних параметрів. Все устаткування стану 3600 спроектоване на прокатку та обробку товстих листів та плит з тимчасовим опором  $\leq 1200$  МПа.

Технічні характеристики основного устаткування стану 3600 наведені в додатку Г, табл. Г.2.1–Г.2.7.

Відповідно до проекту, стан 3600 був призначений для виробництва товстолистового прокату широкого спектру призначення, у тому числі для конструкцій, котлів та посудин під тиском, суднобудування, для подальшого виготовлення магістральних труб великого діаметру, а також спеціального, у тому числі подвійного призначення. Ця велика різноманітність сортаменту передбачала більшу частину виробництва з термічною обробкою прокату, як то товстий лист, так і плиту. Але початок засвоєння термомеханічного процесу прокатки зі всього пострадянського простору відбувався безпосередньо на стані 3600. Сортамент товстолистового прокату, що зараз виробляє стан 3600 наведений в табл. 1.4.

Таблиця 1.4 – Основні групи сортаменту товстолистового прокату, що виробляє стан 3600<sup>а</sup>

Призначення прокату	Стандарт	Марки сталі
1	2	3
Прокат для подальшого виробництва електрозварних труб для транспортування нафти та газу <sup>б</sup>	ТУ 14-1-1921; ТУ 14-1-3636; ТУ 14-1-3978; ТУ 14-1-4034; ТУ 14-1-4627; ТУ 14-1-5293; ТУ 14-100-МКИ; ТУ 14-1-1950; ТУ 14-1-5346; ТУ 14-1-5351; ТУ 14-1-5364; ТУ 14-1-5382; ТУ 14-1-5383; ТУ 14-1-5384; ТУ 14-1-5385; ТУ 14-1-5443; ТУ 14-1-5514; ТУ 14-1-5515; ТУ 14-1-5523; ТУ 14-1-5535;	13ГС, 13Г1СУ, 17ГС, 17Г1С, 09Г2ФБ, 10Г2ФБ, 10Г2ФБЮ, Х46, Х52, Х56, Х60, Х65, Х70, 17Г1СУ-К52, К55, 08Г1Б, 07ГБФ-К48, К50, К52, та їх аналоги
	EN 10208-1; EN 10208-2;	L210GA-L360GA; L245NB-L485MB
Прокат для суднобудування	ABS, DNV GL, LR, BV, RINA, NKK, ASTM A131/A131M, PC, PCY, ГОСТ 52927, ГОСТ 5521	A, B, D, E, AH27S, DH27S, EH27S, AH32, DH32, EH32, AH36, DH36, EH36, AH40, DH40, EH40, FH40
Прокат для котлів та посудин, що працюють під тиском, в тому числі при підвищених та низьких температурах	ASTM A202/A202M; ASTM A285/A285M; ASTM A299/A299M; ASTM A515/A515M; ASTM A516/A516M; ASTM A662/A662M; ASTM A537/A537M; ASTM A517/A517M	A, B, C, D, 299, 55, 60, 65, 70, Class 1,2,3, B, F, Q
Прокат для котлів та посудин, що працюють під тиском, в тому числі при підвищених та низьких температурах	EN 10028-2; EN 10028-3	P265 GH, P295 GH, P355 GH, P275-355NH, P275-355NL1, P275-355NL2, P460NL1 та інші
	BS 1501.1	151-430A...224-490B
	ГОСТ 5520	15К, 20К, 22К, 09Г2С, 10Г2С1, 16ГС, 17ГС, 12Х1МФ, 12ХМ, 10Х2М
Прокат для конструкцій загального та спеціального призначення, у тому числі стійкий до атмосферної корозії, морських платформ	ASME SA36/SA36M; ASME SA283/SA283M; ASTM A514/A514M; ASTM A572/A572M; ASTM A573/A573M; ASTM A588/A588M; ASTM A633/A633M; ASTM A709/A709M; ASTM A830/A830M	A36, C, D, 42, 50, 55, 60 type 1-5, A514-B,F,H,Q, 58, 65, 70, A, B, C, K, 36 (250), 50 Type 1,2,3, 50W Type A,B,C, 1045 та інші

Продовж. табл. 1.4

1	2	3
Прокат для конструкцій загального та спеціального призначення, у тому числі стійкий до атмосферної корозії, морських платформ	EN 10025-2; EN 10025-3; EN 10025-5; EN 10113-2; EN 10155; EN 10083-2	S235, S275, S355 всіх категорій, S355N, S355NL та інші, S235JOW, S235J2W, S355JOW та інші, S260NC, S315NC, S355NC, S420NC, C45
	CSA G 40.21	44W, 300W, 50W, 350W, 50WT, 350WT, 60W, 400W
	JIS G 3101; JIS G 3106; JIS G 3136;	SS400, SS490, SM400F- SM490YB, SN490B
	API Specification 2H API Specification 2Y	42, 50, 60
	SAE J403	1012, 1020, 1021, 1045
Прокат для конструкцій загального та спеціального призначення, у тому числі стійкий до атмосферної корозії, морських платформ	ГОСТ 19281, ГОСТ 14637, ГОСТ 1577, ГОСТ 27772, ГОСТ 6713	09Г2С, 10ХСНД, 17Г1С та інших марок сталі з класами міцності від 265 до 440, Ст3Гсп, Ст3сп та інші, 08, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 45, 50, 65Г, 20Х, 40Х, С245, С255, С345, 16Д, 10ХСНД, 15ХСНД

<sup>a</sup> на стані 3600 також виробляють прокат по окремих технічних вимогах Замовників

<sup>b</sup> наведені типові нормативні документи, що розроблені профільними інститутами, у тому числі під конкретні проекти. Для умов поставки на закордонні ринки між Замовником та Виробником розробляються окремі документи з відповідними вимогами Замовника, на підставі стандартів на трубу, вимог проекту, з урахуванням впливу процесу виробництва Замовника

Хоча комплекс устаткування був не пристосований для реалізації цього складного процесу, стан 3600 дав початок розвитку та впродовж декількох десятиліть був лідером по освоєнню технології термомеханічної прокатки та найскладнішого наукоємного сортаменту.

За час зміни кваліфікації стану з виробництва гарячекатаної та термообробленої продукції до виробника номер один з виробництва термомеханічного прокату в Україні та на пострадянському просторі (з 1973 року по 2008 рік) була зроблена велика кількість змін щодо існуючого устаткування та впровадження нових видів обробки прокату. Серед яких слід відзначити технологію протифлокенної обробки прокату (ПФО), для впровадження якої було обладнано окрему спеціалізовану дільницю з необхідною інфраструктурою. Ця дільниця спроможна обробляти 100 % прокату, що вироблений станом.

Останні кроки, що були зроблені у 2011-2012 роках – це реконструкція стану 3600 з встановленням установки прискореного охолодження прокату (УКО) та роликотправильної машини для гарячої правки прокату безпосередньо після термомеханічного охолодження.

На сьогодні, серед основних характеристик які необхідні для виробництва якісної продукції та забезпечення термомеханічного процесу прокатки на стані 3600 є наступні:

- розкочувальні поля між чорною та чистою кліткою мають достатню довжину для розміщення декількох підкатів для їх природнього охолодження з метою дотримання термомеханічного режиму;

- наявність установки прискореного охолодження для здійснення режиму термомеханічної прокатки з прискореним охолодженням;

- наявність автоматичної системи контролю термомеханічних параметрів (система простежування), що є важливою частиною керування технологічним процесом;

- наявність ділянки для протифлокеної обробки прокату з відповідною інфраструктурою;

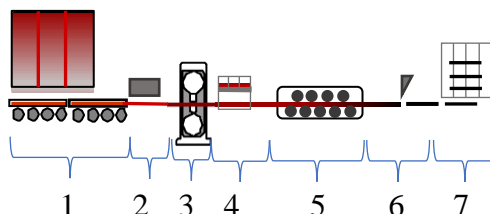
- наявність устаткування для термічної обробки прокату, яке дозволяє підвищити гнучкість технологічного процесу завдяки можливості часткового виправлення властивостей прокату.

### **1.3.1.3 Стан 3200 заводу Trameal, Італія**

Стан 3200 виробляє товстолистовий прокат товщиною 4-150 мм, шириною 1400-3250 мм та довжиною 4000-36000 мм. В залежності від вимог, устаткування стану 3200 дозволяє виробляти прокат у гарячекатаному стані, після нормалізувальної прокатки, після термомеханічної прокатки, а також після термообробки нормалізацією, нормалізацією з відпуском, відпалюванням.

В якості заготовки для виробництва прокату використовуються безперервнолиті сляби товщиною 150-220 мм виробництва «МК АЗОВСТАЛЬ» та «ММК ІМЕНІ ІЛІЧА» (сляб 150 мм).

Схема розташування основного устаткування стану наведена на рис. 1.11.



- |  |                                  |
|--|----------------------------------|
| 1 – штовхальна методична піч;  | 5 – ролико-правильна машина;     |
| 2 – камера гідрозбиву;   | 6 – ножиці для поперечної різки; |
| 3 – кліть кварто 3200;   | 7 – холодильник.                 |
| 4 – підйомний пристрій для природнього охолодження підкату на повітрі; |                                  |

Рисунок 1.11 – Схема розташування основного устаткування стану 3200 заводу Trametel

Основне технологічне устаткування стану 3200 включає (див.рис.1.11) методичну шестизонну трирядну штовхальну піч; нагрівальну камерну піч; камеру гідрозбиву; одноклітьовий реверсивний стан кварто; пристрій для проміжного природнього охолодження підкату на повітрі перед чистовою прокаткою для здійснення режимів нормалізувальної та термомеханічної прокатки; ролико-правильну машину для правки гарячого прокату; ножиці для поперечної різки розкатів комбіновані з машиною гарячого маркування; два холодильники рейкового типу для остаточного природнього або примусового охолодження прокату повітрям; прес для клеймування; машини кисневого та плазмового розрізання листа, та машина холодного розрізання; машину холодної правки прокату; дробі-струменеву установку; дві роликові термічні печі.

Стан обладнаний системою автоматичного керування технологічним процесом виробництва.

Зовнішній вигляд робочої кліті та підйомного пристрою наведено на рис. 1.12.



Рисунок 1.12 – Зовнішній вигляд робочої кліти стану 3200 (ліворуч) та підйомного пристрою для охолодження прокату перед чистовою прокаткою (праворуч)

Технічні характеристики основного устаткування стану наведені в додатку Г, табл. Г.3.1–Г.3.4.

Стан 3200 призначений для виробництва товстолистового прокату загального та спеціального конструкційного призначення, прокату для подальшого виготовлення труб, котлів та посудин, що працюють під тиском, прокату для суднобудування. Наявність устаткування для термічної обробки прокату дозволяє суттєво розширити сортамент та підвищити гнучкість технологічного процесу завдяки можливості часткового виправлення властивостей прокату цими засобами. Слід зазначити, що виробництво прокату способом термомеханічної прокатки здійснюється без прискореного охолодження. Відносно невисокі характеристики потужності стану обмежують можливості виробництва деяких категорій міцності прокату.

Серед характеристик, що забезпечують можливості стану виробляти продукцію термомеханічним способом прокатки, є наступні:

- наявність підйомного пристрою для дотримання термомеханічних режимів перед чистовою прокаткою;
- наявність автоматичної системи керування процесом виробництва;

- наявність спеціалізованої дільниці для проведення ПФО, з інфраструктурою;
- наявність устаткування для термічної обробки прокату дозволяє підвищити гнучкість технологічного процесу завдяки можливості часткового виправлення властивостей прокату цими засобами.

Сортамент товстолистого прокату, що зараз виробляє стан 3200, наведений в табл. 1.5.

Різноманітність устаткування для обробки прокату дозволяє виробляти продукцію з додатковою обробкою (індивідуальним перерізанням та поверхнею після дробе-струменевої обробки).

Таким чином, три товстолистові стани, що розглянуті в даному розділі, мають свої переваги та недоліки, які необхідно враховувати при розробці технології термомеханічної прокатки, табл. 1.6.

Порівняння наявного устаткування трьох досліджених станів щодо реалізації технології термомеханічної прокатки показало по кожному з них як переваги, так і напрямки для покращення.

Стан 3000, спеціалізований, має найкращі показники потужності, які на 30-70 % перевищують аналогічні показники у порівняних станів, та систему контролю технологічного процесу. Суттєвим недоліком, що обмежує можливості стану, є наявність установки УКО, що не експлуатується, а також наявність дільниці ПФО, яка потребує збільшення об'єму та покращення логістичних можливостей. Покращення в цих двох напрямках допоможе суттєво розширити сортамент та покращити якість термомеханічного прокату.

Стан 3600 має діючу установку УКО, дільницю ПФО, яка може обробляти 100 % прокату. Слід зазначити нижчі показники потужності прокатних клітей та обмеження по проміжному охолодженню, які, проте, тільки частково обмежують сортамент та продуктивність. Основним напрямком для покращення повинна стати система простежування, яка окрім контролю повинна отримати функції керування технологічним процесом.

Таблиця 1.5 – Основні групи сортаменту товстолистового прокату, що виробляє стан 3200

Призначення прокату	Стандарт	Марки сталі
1	2	3
Прокат для подальшого виробництва електрозварних труб для транспортування нафти та газу	API-5L	B, X42, X46, X52, X56, X60, X65, X70
Прокат для суднобудування	ABS, DNV GL, LR, BV, RINA	A, B, D, E, AH27S, DH27S, EH27S, AH32, DH32, EH32, FH32, AH36, DH36, EH36, FH36
	ASTM A131/A131M	A, B, D, E, AH32, DH32, EH32, FH32, AH36, DH36, EH36, FH36
Прокат для котлів та посудин, що працюють під тиском, в тому числі при підвищених та низьких температурах	ASTM A203/A203M; ASTM A204/A204M; ASTM A285/A285M; ASTM A299/A299M; ASTM A516/A516M; ASTM A662/A662M; ASTM A537/A537M; ASTM A387/A387M;	A, B, C, D, E, 55, 60, 65, 70, Class 1, Grade 11, 12
	EN 10028-2; EN 10028-3; EN 10028-4	P235 GH, P265 GH, P295 GH, P355 GH, P275-355NH, P275-355NL1, P275-355NL2, P460NL1 та інші, 13MHN1 6-3, 12HI14
	NF A36-215	P440HJ2, P440HJ4
Прокат для конструкцій загального та спеціального призначення, у тому числі стійкий до атмосферної корозії, морських платформ	ASME SA36/SA36M; ASME SA283/SA283M; ASTM A572/A572M; ASTM A573/A573M; ASTM A588/A588M; ASTM A633/A633M; ASTM A709/A709M	A36, C, D, 42, 50, 55, 60 type 1-5, 58, 65, 70, A, B, C, K, 36 (250), 50 Type 1,2,3, 50W Type A,B,C, та інші
	EN 10025-2; EN 10025-3; EN 10025-5; EN 10113-2; EN 10155; EN 10083-2; EN 10083-3, EN 10084, EN 10225	S235, S275, S355 всіх категорій, S355N, S355NL та інші, S235JOW, S235J2W, S355JOW та інші, S260NC, S315NC, S355NC, S420NC, C40-C50, 34CRO4-42CRMO4, 20MNB5-30MNB5, 16MNCR5-20MNCR5, S355G2, S355G3
	API Specification 2H	42, 50



Таблиці 1.6 – Порівняння основних характеристик розглянутих прокатних станів

Найменування параметрів	Технічні дані		
	Стан 3000 «ММК ІМЕНІ ІЛІЧА»	Стан 3600 «МК«АЗОВСТАЛЬ»	Стан 3200 заводу Trametel
Тип нагрівальних агрегатів	методичні з крокуючими балками	методичні штовхальні	методична штовхальна та камерна
<b>Прокатний стан:</b>			
Чорнова кліть			
- тип	кварто	кварто	-
- номінальна потужність головного приводу, кВт;	2×8000	2×6920	
- у тому числі питома потужність, кВт/мм <sup>а</sup> ;	2×2,6	1,92	
- максимальна сила прокатки, МН;	68,7	46	
- у тому числі питома сила прокатки, МН/мм <sup>а</sup>	0,023	0,013	
Чистова кліть			
- тип	кварто	кварто	кварто
- номінальна потужність головного приводу, кВт;	2×11200	2×8800	2×3500
- у тому числі питома потужність, кВт/мм <sup>а</sup> ;	2×3,73	2×2,44	2×1,09
- максимальна сила прокатки, МН;	68,7	46	40
- у тому числі питома сила прокатки, МН/мм <sup>а</sup>	0,023	0,013	0,0125
Тип пристрою для проміжного охолодження прокату	байпас (дисківі холодильники з можливістю примусового повітряного охолодження), охолодження до 8 розкатів одночасно	діючий міжклітьовий рольганг, природне охолодження до 2 розкатів одночасно	підйомний пристрій, природне охолодження 1 розкату
Установка для прискореного охолодження	УКО, ламінарна (не експлуатується)	УКО, ламінарна	-
Дільниця для проведення ПФО	обмежений об'єм обробки, не більше 20 %	можливість обробки 100 % прокату	можливість обробки 100 % прокату
Наявність систем автоматизації	Система контролю технологічного процесу	Система контролю технологічних параметрів (система простежування)	Система контролю процесу виробництва (включає контроль технологічного процесу)

<sup>а</sup> питоми показник отримано шляхом розділення початкового показника на довжину бочки робочих валків

Стан 3200 має аналогічні питомі показники потужності зі станом 3600. Стан має найкращу, серед порівняних, систему автоматизації, яка повністю керує як технологією так і процесом виробництва загалом. Ускладнення технологічного процесу обумовлене наявністю однієї кліти та відсутністю установки УКО.

На підставі виконаного аналізу можна зробити висновок, що на всіх трьох станах реалізується технологія термомеханічної прокатки, яка в кожному окремому випадку має свої унікальні технологічні особливості.

Вказані особливості, в підсумку, і формують перелік сортаменту, що виробляється. Але кожен стан має резерви для подальшого вдосконалення технології, устаткування та засвоєння нового сортаменту.

### **1.3.2 Широкоштабові стани гарячої прокатки**

#### **1.3.2.1 Широкоштабовий стан 1700 «ММК ІМЕНІ ІЛЛІЧА»**

В Україні є два діючі широкоштабові стани гарячої прокатки. Стан 1700 металургійного комбінату «ММК ІМЕНІ ІЛЛІЧА» та стан 1680 металургійного комбінату «Запоріжсталь».

Обидва стани мають схоже технологічне устаткування, але виробляють різний (як по переліку марок сталі, так і по якості) сортамент гарячекатаних рулонів.

Розглянемо схему виробництва, основне устаткування та сортамент, що виробляють ці стани.

Широкоштабовий безперервний стан 1700 призначений для виготовлення штаб з вуглецевих та низьколегованих марок сталі товщиною 1,5-9,0 мм, шириною 1000-1540 мм в залежності від сортаменту, в рулонах та з можливістю порізки на листи.

Наразі, стан може виробляти гарячекатані рулоні вагою до 9,0 т на існуючих моталках №№1,2, та вагою до 27 т на новій моталці №3. Моталка № 3 була встановлена у 2018 р. Слід зазначити, що зараз можливе виробництво рулонів, зі

змотуванням на моталці №3, вагою 10-15 т, в залежності від сортаменту. Подальше збільшення ваги наразі обмежене розкочувальними полями чорнової групи клітей.

Поточний стан устаткування та технічних можливостей стану 1700 є тимчасовим, так як стан 1700 знаходиться в стадії модернізації. Наразі завершений тільки перший етап.

В залежності від вимог замовників та стандартів, стан 1700 виробляє продукцію в гарячекатаному стані та з додатковим прискореним охолодженням.

Заготовкою для стану є безперервнолиті сляби, виробництва конвертерного цеху «ММК ІМЕНІ ІЛЛІЧА», також в невеликих об'ємах використовуються сляби «МК «АЗОВСТАЛЬ», товщиною 150-250 мм, шириною 1000-1550 мм, довжиною 2800-6200 мм для нагрівання в печах 3, 4, 5, та довжиною 3800-10500 мм для нагрівання в печі №1, з крокуючими балками. Слід зазначити, що з огляду на існуючі обмеження довжини розкочувальних полів чорнової групи, максимальна довжина слябів не може перевищувати 8900 мм. Наразі технічної можливості переробляти сляби товщиною 250 мм стан не в змозі. Виробництво з таких слябів здійснюється за технологією «редукування». Сляб перекачують в кліті Слябінгу до необхідної товщини підкату, а потім віддають для подальшого виробництва на стан 1700 напряму, тобто транзитом, або через повторний нагрів.

Схема розташування основного устаткування стану наведена на рис. 1.13.

Основне технологічне устаткування стану 1700 включає (див.рис.1.13) чотири методичні печі, три з яких штовхального типу були модернізовані з метою нагрівання слябів розмірами до 250x1550x6200 мм. Одна піч виробництва фірми «Stein Heurtey», Франція, крокуючого типу з можливістю нагрівання слябів розмірами до 250x1600x10500 мм. Сляб товщиною 250 мм застосовується для виробництва тільки в разі редукування на Слябінгу; чорнову групу клітей, яка включає одну кліть «дуо» №01 (чорновий окалиноломатель) та 5 клітей «кварто» (1-4 та 4а), чотири з яких є універсальними (2-4 та 4а). Всі кліті чорнової групи приводяться до дії асинхронними двигунами з постійною швидкістю обертання; теплозберігаючі екрани, для збереження температури штаби перед чистою прокаткою; летючі ножиці для

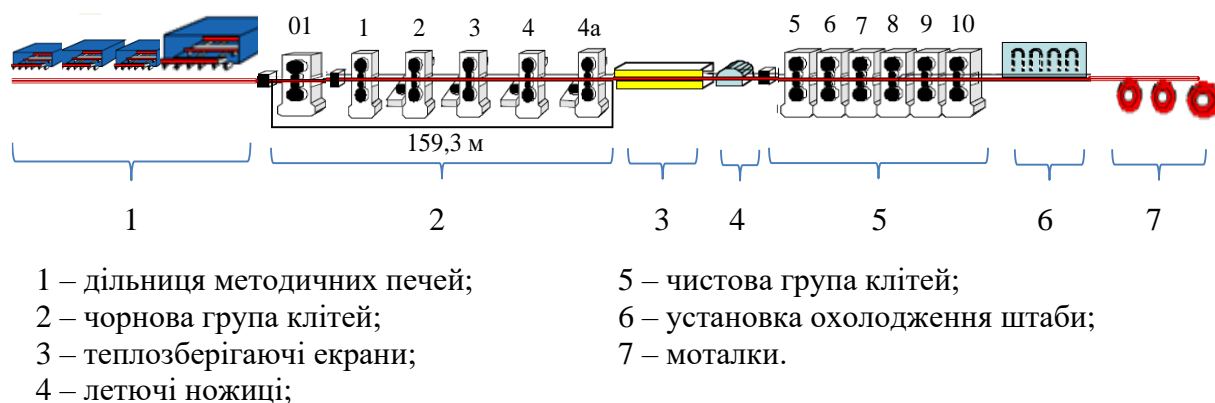


Рисунок 1.13 – Поточна схема розташування основного устаткування стану 1700 «ММК ІМЕНІ ІЛЛІЧА»

обрізки переднього торця штаби перед задачею в чистову групу; чистову групу, що складається з 6-х клітей «кварто» (5-10); 7 гідрозбивів окалини з тиском в межах 80-140 атм.; установку охолодження штаби, яка складається з 14 охолоджувальних секцій; три моталки, дві з яких (№1,2) можуть змотувати рулони вагою до 9 т, одна (№3), остання по ходу прокатки, може змотувати рулони вагою до 27 т; дві установки для обв'язки рулонів після змотування; устаткування для обробки рулонів після прокатки (правка, порізка на листи, обрізка крайок, товарна обв'язка рулонів, листів).

Кліті 8, 9, 10 чистової групи обладнані системою автоматизації «Clesim», системою гідравлічного регулювання противигіну валків та системою зсуву валків.

Згідно з проектом, устаткування стану 1700 може виробляти продукцію з тимчасовим опором в холодному стані не більше ніж 590 МПа.

Слід зазначити, що на початку 70-х років була проведена невдала реконструкція головних ліній клітей №№3, 4, 4а зі збільшенням діаметра валків з 650 до 880 мм. В результаті чого, через нераціональні кути нахилу шпинделів, співвідношення діаметрів шийки і бочки робочих валків, а також виведення подушок робочих валків на станини, обтискна здатність чорнової групи не тільки не збільшилася (не досягнула проектних параметрів), а й зменшилася. При цьому фактичні допустимі енергосилові параметри стали вдвічі нижче за проектні. Повернення до первинних характеристик головних ліній пов'язано з великим обсягом робіт і вважалося недоцільним.

Зовнішній вигляд ділянки стану наведено на рис. 1.14.

Технічні характеристики основного устаткування стану наведені в додатку Г, табл. Г.4.1–Г.4.20.



Рисунок 1.14 – Зовнішній вигляд деяких клітей чорнової групи (ліворуч) та клітей чистової групи (праворуч) стану 1700

Стан 1700 призначений загалом для виробництва прокату у рулонах та листах загального та спеціального конструкційного призначення, способом гарячої прокатки, або гарячої прокатки з додатковим охолодженням перед змотуванням. Також стан виробляє рулони як заготовку для подальшої холодної прокатки.

Останні 5 років на стані активно засвоюється виробництво прокату для подальшого виготовлення труб, прокату для посудин, що працюють під тиском та конструкційного прокату способом термомеханічної прокатки. Наявність необхідного устаткування, а також початок реалізації етапів реконструкції дозволяють на сьогоднішній день надалі засвоювати технологію ТМСП.

Слід зазначити, що існуюча установка для охолодження прокату не призначена для контрольованого охолодження. Серед обмежень можна відмітити можливість установки охолоджувати тільки верхню частину прокату. Існуюча установка хоча і є ламінарною, однак її конструкція не відповідає класичним установкам УКО, що отримали поширення останні 20-30 років. Незважаючи на недоліки існуючої установки для охолодження прокату, вона працює та дає певний результат.

Таким чином, серед характеристик, що забезпечують можливість стану виробляти продукцію термомеханічним способом прокатки, є наступні:

- наявність печі з крокуючими балками та з можливістю точного керування температурою нагріву, низьким перепадом температур по перерізу слябів. Також піч забезпечує повну видачу слябів при технологічних та аварійних простоях, з метою запобігання їх перегріванню;

- наявність системи автоматизації клітей №№ 8-10, що частково забезпечує дотримання термомеханічних режимів;

- наявність системи контролю технологічних параметрів;

- обладнання стану теплозберігаючими екранами дозволяє керувати температурою розкату перед чистовою прокаткою;

- наявність установки охолодження дозволяє застосовувати її для прискореного охолодження штаби;

- система автоматизації чистової групи дозволяє отримувати необхідну різнотовщинність прокату.

Сортамент прокату, що наразі виробляє стан 1700, наведений в табл. 1.7.

Таблиця 1.7 – Основні групи сортаменту прокату, що виробляє стан 1700

Призначення прокату	Стандарт	Марки сталі
Прокат для конструкцій загального та спеціального призначення	ДСТУ 2834; ГОСТ 14637; ГОСТ 1577, ГОСТ 19281	Ст1сп, Ст2сп, Ст3сп, 08, 10, 15, 20, категорії 325-390 (09Г2С, 14Г2, 09Г2Д, 17Г1С, 10ХСНД та інші)
	EN 10025-2	S235-S355 всіх категорій
	ASTM A36/A36M	ASTM A36/A36M

Таким чином, стан 1700 «ММК ІМЕНІ ІЛЛІЧА» поширено виробляє невеликий перелік сортаменту який обмежений технологією гарячої прокатки та гарячої прокатки з додатковим охолодженням. Засвоєння та поширення технології ТМСП суттєво збільшить сортамент стану, що виробляється.

### 1.3.2.2 Широкоштабовий стан 1680 МК «Запоріжсталь»

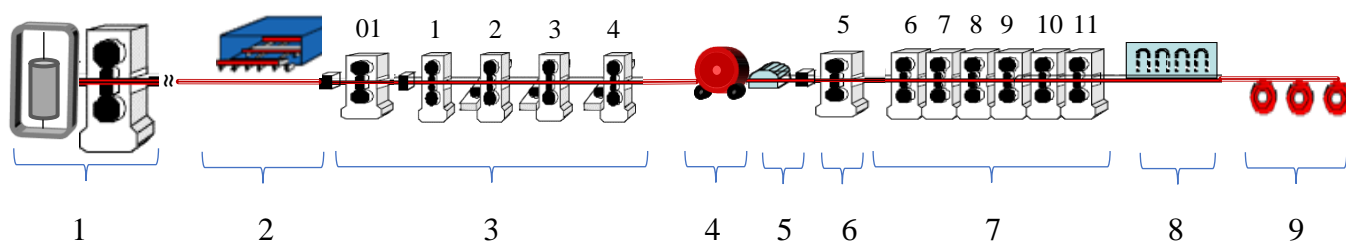
Широкоштабовий безперервний стан 1680 призначений для виготовлення штаб з вуглецевих та низьколегованих марок сталі товщиною 1,8-8 мм, шириною 1000-1500 мм в залежності від сортаменту, в рулонах вагою до 16 т та в листах.

В залежності від вимог замовників та стандартів, стан 1680 виробляє продукцію в гарячекатаному стані та з додатковим прискореним охолодженням.

В якості заготовки на стані 1680 використовуються власні катані сляби, які вироблені зі зливків мартенівського виробництва та прокатані в сляби на слябінгу. 95% слябів зі слябінгу передаються на стан 1680 транзитом, тобто без проміжного нагрівання, 5% слябів йдуть на повторне нагрівання в методичну піч. З точки зору економії ресурсів існуюча концепція роботи стану 1680 є найефективнішою. Але з точки зору якості, поточного рівня технології та сортаменту, що виробляє стан, існуюча схема є суттєво застарілою та має багато обмежень. Також слід зазначити, що більшість міжнародних стандартів забороняють використовувати мартенівську сталь, у тому числі для виробництва продукції способом термомеханічної прокатки.

Схема розташування основного устаткування стану наведена на рис. 1.15.

Основне технологічне устаткування стану 1680 включає (див. рис. 1.15) одну методичну піч штовхального типу для нагріву катаних слябів; чорнову групу клітей включає одну кліть «дуо» №01 (чорновий окалиноломатель) та 4 клітей «кварто» (1-4), три з яких є універсальними (2-4); перемотувальний пристрій (CoilBox) для збереження та усереднення температури штаби перед чистовою прокаткою; летючі ножиці для обрізки переднього торця штаби перед задачею в чистову групу; чистовий окалиноломатель «дуо» (5); чистову групу, що складається з 6-х клітей «кварто» (6-11); установку охолодження штаби; моталки для змотування рулонів вагою до 16 т; устаткування для обробки рулонів після прокатки (правка, порізка на листи, обрізка крайок, товарна обв'язка рулонів, листів).



1 – універсальна кліть слябінгу;  
 2 – методична піч;  
 3 – чорнова група клітей;  
 4 – перемотувальний пристрій (CoilBox);

5 – летючі ножиці;  
 6 – чистовий окалиноломатель;  
 7 – чистова група клітей;  
 8 – установка прискороного охолодження;  
 9 – моталки

Рисунок 1.15 – Поточна схема розташування основного устаткування стану 1680 МК «Запоріжсталь»

Зовнішній вигляд ділянки чорнових клітей та установки CoilBox наведено на рис. 1.16.

Технічні характеристики деякого основного устаткування стану наведені в додатку Г, табл. Г.5.1-Г.5.2.



Рисунок 1.16 – Зовнішній вигляд деяких клітей чорнової групи (ліворуч) та установки CoilBox (праворуч) стану 1680

Стан 1680 був першим безперервним станом гарячої прокатки в Україні, а також на всьому пострадянському просторі. З метою покращення якості прокату у 2007 році на стані встановлено перемотувальний пристрій CoilBox, що дозволило зменшити перепад температури по довжині штаби перед чистовою прокаткою з 50 °С



до 20 °С та знизити поздовжню різність в товщині, по даних технічного звіту комбінату.

Переважну частину сортаменту стану складає продукція, що виробляється згідно з вимогами пострадянських стандартів, технічних умов розроблених комбінатом. Наразі на стані 1680 активно засвоюється виробництво прокату згідно з вимогами EN.

Основним обмеженням для подальшого засвоєння прокату по міжнародних стандартах та відповідного покращення його якості залишається застосування в якості заготовки зливків з властивим їм переліком відповідних дефектів, що переходять на прокат, технологія нагрівання в колодязях, що не забезпечує необхідного рівномірного нагріву по висоті та перерізу зливків та використання 95% катаних слябів транзитом, який має наслідувати на попередніх стадіях виробництва недоліки.

Такий стан речей не може бути покращений за допомогою прокатного устаткування, так як в чистовій групі відсутня система автоматизації з противигіном та зсувом валків, яка наприклад є на стані 1700 «ММК ІМЕНІ ІЛЛІЧА». Однак стан має устаткування CoilBox та установку охолодження, що дозволяє розглядати його для дослідного засвоєння технології ТМСП.

Сортамент прокату, що наразі виробляє стан 1680, наведений в табл. 1.8.

Таблиця 1.8 – Основні групи сортаменту прокату, що виробляє стан 1680

Призначення прокату	Стандарт	Марки сталі
Прокат для конструкцій загального та спеціального призначення	ДСТУ 2834; ТУ У 14-4-426; ГОСТ 14637; ТУ У 14-16-56; ГОСТ 1577, ГОСТ 19281	Ст1-4кп,пс,сп, 08-20кп,пс, 10-20, 09Г2, 09Г2С, 09Г2Д
	ТУ У 27.1-23365425-621;	S235JR, S275JR

Таким чином, стан 1680 МК «Запоріжсталь» виробляє невеликий перелік сортаменту, який обмежений технологією виплавки сталі, технологією гарячої прокатки та гарячої прокатки с додатковим охолодженням. Засвоєння та поширення

технології ТМСР суттєво збільшить сортамент стану, що виробляється, при умовах використання безперервнолитої заготовки стороннього виробництва.

### 1.3.3. Стан Стеккеля

Стан Стеккеля являє собою стан, обладнаний з обох боків пічними моталками, що дозволяють утримувати необхідну температуру в процесі прокатки. Такі стани мають в рази меншу довжину, в порівняння з безперервними широкоштабовими станами, завдяки проміжному змотуванню розкату під час прокатки. Керування температурою підкату в пічних моталках дозволяє отримувати необхідний комплекс властивостей готового прокату в широкому діапазоні, що дозволяє виробляти великий перелік сортаменту, в тому числі прокат спеціального призначення (важкодеформовані електротехнічні та вуглецеві сталі, високоміцні та корозійностійкі мікролеговані сталі) [50, 51, 148, 149, 153, 154].

В Україні станів Стеккеля немає, при цьому в Канаді, Америці, Південній Кореї, Китаї такі стани є поширеними.

Надалі буде розглянуто стан Стеккеля заводу «Ferreira Valsider», Італія, який входить в компанію МЕТІНВЕСТ.

Стан Стеккеля заводу «Ferreira Valsider» призначений для виготовлення:

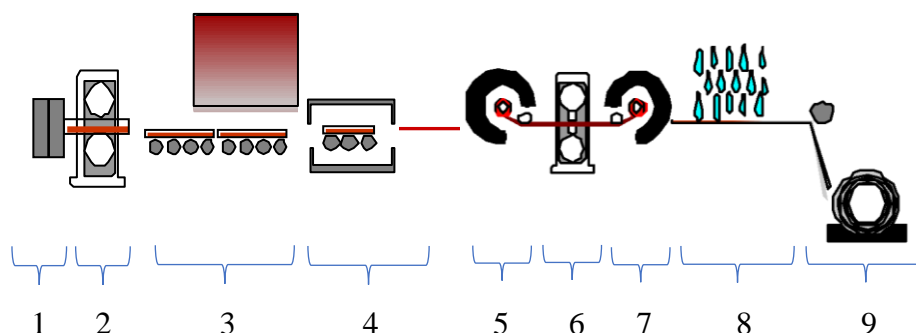
- товстолистого прокату товщиною 8-200 мм, шириною 1500-3000 мм та довжиною 4000-24000 мм, з максимальною вагою 30 т;

- рулонного прокату товщиною 1,8-25 мм, шириною  $\leq 1500$  мм, з максимальною вагою 30 т;

Товстолистий прокат виробляється в чорновій кліті, в якій також виробляється заготовка – катані підкати для безпосередньої прокатки на стані Стеккеля. Далі буде розглянуто лише сортамент, що виробляється в рулонах як кінцева продукція стану Стеккеля.

Заготовкою для стану є безперервнолітні сляби, виробництва «МК «АЗОВСТАЛЬ» та ММК «ІМЕНІ ІЛІЧА», товщиною 150-250 мм, шириною 1000-1500 мм, довжиною до 10000 мм.

Схема розташування основного устаткування стану наведена на рис. 1.17.



- |                                    |   |
|------------------------------------|---|
| 1 – кліть з вертикальними валками; | 5, 7 – пічні моталки стану Стеккеля;    |
| 2 - чорнова кліть 3170;            | 6 – кліть «кварто» 1780 стану Стеккеля; |
| 3 - методична штовхальна піч;      | 8 - установка ламінарного охолодження;  |
| 4 - прохідна роликівна піч;        | 9 - моталка.                            |

Рисунок 1.17 – Поточна схема розташування основного устаткування стану Стеккеля заводу Ferriera Valsider

Основне технологічне устаткування стану Стеккеля включає (див. рис. 1.17) штовхальну піч, що має шість зон для нагрівання слябів, виробництва фірми Bendotti, яка опалюється природним газом, продуктивністю 120 т/год; стан 3170 для прокатування плит (товстолистового прокату) та підкату для стану Стеккеля, і включає реверсивну кліть дуо з силою прокатки до 25 МН, та кліть з вертикальними валками; прохідну семизонну роликівну піч для проміжного підігріву та вирівнювання температури по перерізу підкату, яка опалюється природним газом; стан Стеккеля включає реверсивну кліть кварто 1780 з силою прокатки до 24 МН та печі камерного типу з барабаними моталками, які опалюються природним газом та розташовані з обох боків прокатної кліті; установку для ламінарного охолодження полоси після прокатки довжиною 41 м, яка дозволяє охолодити метал зі швидкістю до 40 °С/с; моталки для змотування полоси товщиною до 25 мм; устаткування для подальшої

обробки прокату (порізка, маркування, ультразвуковий контроль (для товстого листа) та інше).

Стан обладнаний системою автоматичного керування технологічним процесом.

Зовнішній вигляд ділянки стану Стеккеля та установки прискореного охолодження наведено на рис. 1.18.



Рисунок 1.18. – Зовнішній вигляд ділянки стану Стеккеля (ліворуч) та установки прискореного охолодження (праворуч)

Технічні характеристики основного устаткування стану Стеккеля наведені в додатку Г, табл. Г.6.1–Г.6.7.

Основним сортаментом стану Стеккеля є товстолистовий та рулонний прокат конструкційного призначення, у тому числі стійкого до атмосферної корозії, прокат для суднобудування, вироблення деталей для машинобудування та прокат для виготовлення електрозварних труб великого діаметру. Продукція виробляється у стані гарячої прокати, нормалізувальної прокати та термомеханічної прокати.

Сортамент прокату, що зараз виробляє стан Стеккеля заводу Ferriera Valsider, наведений в табл. 1.9.

Таким чином, можливість стану виробляти продукцію високої якості способом термомеханічної прокати забезпечує наявність наступного устаткування:

- прохідна піч, яка забезпечує вирівнювання температури по довжині та перерізу підкату, що дозволяє керувати розподілом властивостей прокату по довжині;

Таблиця 1.9 – Основні групи сортаменту прокату, що виробляє стан 3200

Призначення прокату	Стандарт	Марки сталі
1	2	3
Прокат для подальшого виробництва електрозварних труб для транспортування нафти та газу	API-5L (PSL1, 2)	B, X42, X46, X52, BM, BN, X42R, X42M X42N, X43M, X46N, X52M
Прокат для котлів та посудин, що працюють під тиском, в тому числі при підвищених та низьких температурах	ASTM A285/A285M; ASTM A516/A516M	A, B, C, 55, 60, 65
	EN 10028-2; EN 10028-3	P235 GH, P265 GH, P275 всіх категорій
Прокат для конструкцій загального та спеціального призначення, у тому числі стійкий до атмосферної корозії	ASME A36/A36M; ASTM A242/A242M ASME SA283/SA283M; ASTM A573/A573M; ASTM A588/A588M; ASTM A709/A709M	A36, A242, C, D, 58, 65, A, B, K, 50W Type A,B
	EN 10025-2; EN 10025-4; EN 10025-5; EN 10083-2; EN 10083-3, EN 10149-2	S235, S275, S355 всіх категорій, S275M-S355ML, S355JOW та інші, C35-C45, 28MN6, 27MNCRB5, 33MNCRB5, 33CRMO4, S355MC, S420MC

- пічні моталки, які дозволяють забезпечити дотримання необхідної температури впродовж всього процесу прокатки (ця можливість на стані наразі не використовується в повній мірі, що обмежує сортамент);

- установка прискореного охолодження, яка забезпечує дотримання необхідних термомеханічних температур прокату;

- система автоматизації технологічного процесу, яка дозволяє керувати необхідними термомеханічними параметрами процесу прокатки.

Слід зазначити, що технічні характеристики та унікальність комплексу устаткування стану дозволяють виробляти і більш різноманітний та міцний сортамент ніж той, що обмежений категоріями міцності типу S420 та X52.

### 1.3.4 Порівняння характеристик станів щодо впровадження технології термомеханічної прокатки

Таким чином, три стани, які виробляють гарячекатані рулони, що розглянуті в даному розділі мають свої переваги та недоліки, які необхідно враховувати при розробці технології термомеханічної прокатки, табл. 1.10.

Слід зазначити, що на станах для виробництва штаб, на відміну від товстолистових станів, при термомеханічній прокатці технологічна операція з витримки підкатів перед чистою прокаткою для зниження температури приймає протилежне значення. Тобто, замість зниження температури за допомогою, наприклад, повітряного охолодження на байпасі, рольгангу або за допомогою іншого пристрою, на безперервних станах встановлюють устаткування для збереження температури. Таким устаткуванням можуть бути теплозберігаючі панелі, панелі з підігрівом, установки CoilBox, або їх сумісна комбінація. Винятком є стани Стеккеля, в яких утримання температури здійснюється за допомогою пічних моталок.

Порівняння існуючого устаткування трьох досліджених станів щодо реалізації технології термомеханічної прокатки виявило по кожному з них як переваги, так і напрямки для покращення.

В цілому, питомі показники потужності головних двигунів та сили прокатки трьох станів для виробництва рулонів, що були розглянуті можна порівняти.

Стан Стеккеля має найкращі позиції для подальшого вдосконалення технології ТМСП та засвоєння нового сортаменту завдяки унікальним технічним можливостям.

Стан 1700 «ММК ІМЕНІ ІЛІЧА» зараз в повній мірі може виготовляти продукцію у стані ТМСП, з деякими обмеженнями по категорії міцності сортаменту.

Головним обмеженням є використання існуючої установки для охолодження, яка не дозволяє керувати температурним режимом, а також має можливість охолоджувати тільки одну поверхню прокату.

Стан 1680 МК «Запоріжсталь» безпосередньо може виготовляти продукцію у стані ТМСП з обмеженнями, властивими стану 1700, та з деякими зміненнями

Таблиця 1.10 – Порівняння основних характеристик розглянутих прокатних станів

Найменування параметрів	Технічні дані		
	Стан 1700 «ММК ІМЕНІ ІЛІЧА»	Стан 1680 МК «Запоріж- сталь»	Стан Стеккеля заводу«Ferriera Valsider»
1	2	3	4
Тип нагрівальних пристроїв	методичні штовхальні та з крокуючими балками	методична штовхальна	методична штовхальна
<b>Прокатний стан:</b>			
<b>Чорнова група</b>			
- кількість клітей	5+дуо	4+дуо	1
- тип	кварто	кварто	дуо
- середня довжина бочки робочих валків, мм	1700	1832	3170
- сумарна потужність головного приводу, кВт;	24000	20300	4474,2
- середня потужність кліті в групі, кВт <sup>а</sup>	4000	4060	4474,2
- питома потужність групи клітей, кВт/мм <sup>б</sup> ;	14,12	11,08	1,41
- середня питома потужність кліті в групі, кВт/мм <sup>б</sup> ;	2,35	2,22	1,41
- сумарна сила прокатки, МН	118	93	25
- середня між клітями сила прокатки, МН <sup>а</sup>	19,67	18,6	25
- питома сила прокатки групи, МН/мм <sup>б</sup>	0,069	0,051	0,008
- середня питома сила прокатки, МН/мм <sup>б</sup>	0,012	0,010	0,008
<b>Чистова група</b>			
- кількість клітей	6	6+дуо	
- тип	кварто	кварто	кварто
- сумарна потужність головного приводу, кВт;	45000	30003,65	8948,4
- середня потужність кліті в групі, кВт <sup>а</sup>	7500	4286	8948,4
- питома потужність групи клітей, кВт/мм <sup>б</sup> ;	26,47	17,86	5,027
- середня питома потужність кліті в групі, кВт/мм <sup>б</sup> ;	4,41	2,55	5,027
- сумарна сила прокатки, МН;	118	-	24
- середня між клітями сила прокатки, МН <sup>а</sup>	19,67	-	24
- питома сила прокатки групи, МН/мм <sup>б</sup>	0,069	-	0,013
- середня питома сила прокатки, МН/мм <sup>б</sup>	0,012	-	0,013
Тип пристрою для проміжного утримання температури прокату	теплзберігаючі панелі	перемотувальний пристрій CoilBox	пічні моталки

Продовж. табл. 1.10

1	2	3	4
Установка для прискороного охолодження	охолоджувальна установка ванного типу	охолоджувальна установка ванного типу	УКО, ламінарна
Наявність систем автоматизації	Система контролю технологічним процесом клітей 8-10	-	Система контролю технологічним процесом

<sup>a</sup> показник отримано шляхом розділення суми початкового показника на кількість клітей в групі

<sup>b</sup> показник отримано шляхом розділення суми початкового показника на середню довжину бочки робочих валків

<sup>b</sup> показник отримано шляхом розділення середнього значення початкового показника на середню довжину бочки робочих валків

технології, з огляду на наявність установки CoilBox. Головним обмеженням є використання гарячекатаних слябів зі зливків, а також переважне використання транзитної прокатки.

На підставі виконаного аналізу можна зробити висновок, що безпосередньо на стані 1700 та стані Стеккеля використовується технологія термомеханічної прокатки, яка в кожному окремому випадку має свої унікальні технічні та технологічні особливості. На стані 1680 впровадження технології ТМСП потенційно можливе. Особливості устаткування станів, в підсумку, і формують перелік сортаменту, що виробляється. Кожен стан має резерви для засвоєння сортаменту ТМСП, подальшого вдосконалення технології та устаткування.

#### **1.4 Аналіз сучасних тенденцій вдосконалення устаткування прокатних станів, що виробляють продукцію способом термомеханічної прокатки**

Розглянемо сучасні напрямки вдосконалення устаткування по типах прокатних станів:

Товстолистові прокатні стани

- підвищення потужності робочих клітей [178];
- встановлення систем осьового зсуву валків [178];



- обладнання системами ламінарного охолодження, які в залежності від виробника мають назви «Laminar cooling system» компанії «SMS» або «MULPIC», компанії «Primetals» з максимальною швидкістю охолодження до 45 °C/c (вказані два найвідоміших виробника прокатного устаткування та їх запатентовані продукти) [179];

- встановлення додаткових секцій підвищеного тиску для збільшення швидкості охолодження до 100 °C/c, які застосовуються при виробництві високоміцного сортаменту типу X80 та вище та дозволяють здійснювати загортання з прокатного нагріву [178];

- розширення систем автоматизації станів з метою контролю профіля прокату, площинності, контролю структурних перетворень в процесі прокатки, та якості поверхні [178, 180].

#### Безперервні стани гарячої прокатки

- встановлення проміжних перемотувальних пристроїв, або CoilBox з додатковим екрануванням бокових крайок між чорною та чистою групами клітей, що дозволяє мінімізувати падіння температури, зменшити перепад температури між внутрішніми та зовнішніми вітками, значно скорочує відстань між групами клітей при проектуванні нового стану [181, 182];

- встановлення калібрувального пресу для зменшення ширини слябів перед прокаткою, що дозволяє підвищити універсальність слябів, які використовуються, по ширині [182];

- підвищення потужності робочих клітей [183], встановлення пристрою стабілізації кліті для усунення зазору між подушками та станиною [184], встановлення систем осьового зсуву валків та кліті з перехрещенням валків в горизонтальній площині, що дозволяє контролювати профіль поперечного перерізу штаби [182];

- обладнання системами ламінарного охолодження [179];

- встановлення систем посиленого охолодження для виробництва високоміцних марок сталі типу X80 та вище, двофазних або багатофазних марок сталі,

мартенситних марок сталі [181]. Система може бути встановлена між чорною та чистою групами, між клітьми чистої групи та як додаткова секція до системи ламінарного охолодження. Система дозволяє охолоджувати штабу зі швидкістю до 233 °C/с для товщини 25,4 мм [182];

- розширення систем автоматизації станів з метою контролю профіля прокату, площинності, контролю структурних перетворень в процесі прокатки [185-191], контролю якості поверхні штаби при її виробництві [180].

Комплексним проектним рішенням, яке дозволяє серед інших можливостей поширено використовувати технологію ТМСП, є будівництво ливарно-прокатних модулів, або так званих комплексів ESP (endless strip production), тобто комплексів для виробництва нескінченних штаб [186, 192, 193].

Поміж іншого, сучасна тенденція вдосконалення устаткування для виробництва штабового гарячого прокату спрямована на часткову заміну сортаменту холодного прокату – гарячим. Комплекси сучасного устаткування дозволяють виробляти гарячекатані штаби товщиною від 0,8 мм до 25 мм з толерансом по товщині не більшим, ніж 1 %, що не в змозі забезпечити навіть деякі стани холодної прокатки [181, 192].

Окремо розглянемо дослідження напрямків модернізації широкоштабових станів гарячої прокатки.

Суттєвими недоліками гарячекатаних рулонів, що виробляються в нашій країні, в порівнянні зі світовими виробниками, є мала вага та вузький марочний сортамент.

Частковим вирішенням проблеми з вагою може бути синхронізація роботи клітей стану. У всьому світі широко застосовуються системи синхронізації розливки та гарячої прокатки, які розроблені для досягнення різноманітних цілей [119, 186, 194, 195]. Комплексні системи синхронізації, запропоновані авторами робіт [194, 195], спрямовані на зменшення собівартості прокату, зниження додаткових витрат, підвищення продуктивності виробництва. Локальні системи синхронізації спрямовані на зниження витрат на паливо, наприклад на 20 %, як запропоновано в роботі [186], автоматичне планування виробництва та інше.

Особливу цікавість становить робота [119], в якій автори запропонували рішення по керуванню (комплексна синхронізація роботи прокатного стану) устаткуванням задля здійснення технології безперервної гарячекатаної прокатки рулонів. Також окрему цікавість становить робота [196], в якій запропоновані рішення по синхронізації роботи двигунів, у тому числі на безперервних станах. Ці рекомендації безумовно мають місце при їх впровадженні на відповідному устаткуванні. Застосувати ці рекомендації до існуючого устаткування, наприклад, стану 1700 «ММК ІМЕНІ ІЛЛІЧА» з наявністю двигунів із різною постійною швидкістю обертання неможливо, тож синхронізацію потрібно впроваджувати іншими способами.

Таким чином, різноманітні розробки авторів по синхронізації комплексів ливарно-прокатного виробництва чи окремого устаткування прокатних ліній мають унікальні особливості, які не завжди можуть бути застосовані до існуючого устаткування інших виробників.

Для комплексного вирішення проблеми збільшення ваги та розширення сортаменту необхідно виконати оцінку поточного стану технології та устаткування, та розробити поетапну стратегію модернізації виробництв. Кожен етап модернізації проводиться з метою поступового забезпечення цільових умов для виробництва продукції. Так, в роботі [120] автори пишуть про поетапний розвиток та модернізацію ШСГП з заміною реверсивної чорнової кліті на безперервну групу клітей, встановленням CoilBox, пристрою проміжного охолодження полоси. Автором запропоновано використання прохідної індукційної печі, яка забезпечує рівномірність температури на кінцях розкату. Окремо, автором роботи [52], розглянуто становлення етапу модернізації в якому ще вироблялись рулони з малою вагою. Автор роботи [51] наводить в деталях всі етапи розвитку широкоштабових прокатних станів, останнього покоління яких мають одну або дві чорнові реверсивні кліті та установку CoilBox, або без неї. Слід зазначити циклічність процесів модернізації широкоштабових станів від реверсивних чорнових клітей до

нереверсивних чорнових груп та повернення знову до реверсивних чорнових клітей, але вже з сучасними технічними характеристиками.

Так, сучасні комплекси ШСГП виробляють рулони товщиною до 1,2 мм з вагою до 35 т, а стани «безперервної прокатки» останнього покоління можуть виробляти гарячекатані безперервні штаби товщиною до 0,8 мм [51], що відповідає сучасним потребам переробників прокату.

Окремим питанням є розрахунки проектів модернізації. Відомо багато математичних моделей [53-56, 121-125], які автори рекомендують використовувати для проектування технології. Однак інформація про можливості їх використання для модернізації устаткування відсутня, так як більшість моделей жорстко прив'язана до конкретного прокатного комплексу та не враховує можливість використання у розрахунках додаткового устаткування. Але гнучкі моделі, завдяки яким можливо проектувати як технологію, так і розраховувати будь який комплекс устаткування, є в інжинірингових компанія, та вони мають обмежений доступ.

Таким чином, сучасні широкоштабові стани мають значно ширший, в порівнянні з вітчизняними станами, сортамент та відповідний набір устаткування.

#### Стани Стеккеля

- підвищення потужності робочих клітей, встановлення пристрою стабілізації кліті для усунення зазору між подушками та станиною, встановлення систем осьового зсуву валків та кліті з перехрещенням валків в горизонтальній площині, що дозволяє контролювати профіль поперечного перерізу штаби [197];

- встановлення додаткової чистової групи з двох або трьох клітей [197];

- обладнання системами ламінарного охолодження [197];

- встановлення систем посиленого охолодження для виробництва високоміцних марок сталі типу X80 та вище, двофазних або багатофазних марок сталі, мартенситних марок сталі. Система може бути встановлена між чорною та чистовою групами, між клітями чистової групи та як додаткова секція до системи ламінарного охолодження. Система дозволяє охолоджувати штабу зі швидкістю до 233 °C/c для товщини 25,4 мм [197];

- розширення систем автоматизації станів з метою контролю товщини в тому числі в головній та хвостовій частинах, контролю профіля прокату, площинності, контролю структурних перетворень в процесі прокатки, та контролю якості поверхні штаби при виробництві [180, 197].

Вищим рівнем автоматизації для всіх типів прокатних станів є встановлення оптимізаційних систем планування, контролю виробництва та керування технологією [198, 199].

Вказаний перелік устаткування частково стосується загального покращення якості продукції, що виробляється, та не обмежений технологією ТМСП.

Значення та характеристики устаткування, що вказані, є орієнтовними та розробляються індивідуально в залежності від переліку вимог замовників, з урахуванням сортаменту, місця встановлення, характеристик іншого устаткування, задіяного в технологічному процесі.

### **1.5 Аналіз етапів розробки технології термомеханічної прокатки**

При розробці технології ТМСП, для вибору варіанту процесу, який буде прийнятним та забезпечить питомий результат в технічних умовах конкретного прокатного стану необхідно виконати детальний аналіз кожного з технологічних етапів.

Процес розробки хімічного складу для термомеханічного прокату є початковим процесом розробки технології, який водночас повинен враховувати вплив кожного з наступних технологічних етапів та устаткування на формування кінцевих властивостей прокату.

Хімічний склад сталей для виготовлення термомеханічного прокату відрізняється мікролегуванням елементами, кожен з яких має свій унікальний або комплексний вплив на властивостей готового прокату. Основні елементи, що містяться в сталі для виробництва термомеханічного прокату, наступні: С, Мп, Nb, V, Ti. Для отримання підвищених категорій міцності додатково використовується Мо.

Останнім часом поширено досліджується додаткове використання Cu, Ni, Cr, B. [79, 82, 85, 87].

Вплив вуглецю – сучасні тенденції з виробництва сталей для ТМСП спрямовані на зниження вмісту вуглецю. Для цього є декілька причин: по-перше, зниження вуглецю призводить до підвищення пластичності, ударної в'язкості, опору крихкому руйнуванню, по-друге, зниження вуглецю покращує зварюваність прокату [200, 201]. До того ж вимоги до зварюваності регламентовано стандартами на виробництво продукції та розраховуються згідно з встановленими залежностями  $CE$  та  $CEP_{cm}$  [165-169]. Додатковим ефектом від зниження вмісту вуглецю є підвищення розчинності нітридів та карбонітридів ніобію та ванадію в аустеніті при нагріванні. Завдяки цьому частина ніобію та ванадію може бути переведена в твердий розчин при температурі нагрівання під прокатку, що призведе до подальшого його виділення та запуску іншого механізму впливу на мікроструктуру та зміцнення в процесі прокатки [201].

Вплив ніобію – ніобій гальмує процеси рекристалізації деформованого аустеніту. Основною причиною гальмування рекристалізації аустеніту ніобієм є в тому, що рух дислокацій та границь зерен гальмується розчиненими атомами, а також дисперсною фазою, яка утворюється в інтервалі температур термомеханічної прокатки. Різниця в атомних радіусах ніобію та заліза призводить до спотворення кристалічної решітки твердого розчину та відповідним гальмуванням процесів дифузії. Таким чином ніобій дозволяє подрібнити зерна аустеніту, знизити температуру  $\gamma \rightarrow \alpha$  перетворення та дисперсійно, зміцнити прокат [79, 200, 201].

Вплив ванадію спостерігається при температурах, нижчих за 850 °C, коли відбувається інтенсивне виділення карбонітридів ванадію. При температурах вищих за 900 °C ванадій суттєво не впливає на швидкість рекристалізації аустеніту. При цьому ванадій створює багато часток в процесі  $\gamma \rightarrow \alpha$  перетворення, які забезпечують дисперсійне твердіння. [79, 200]. Керування співвідношенням в сталі Nb/V дозволяє керувати таким параметром готового прокату, як співвідношення  $\sigma_T/\sigma_B$ .

Вплив титану – титан формує нітриди, які є стабільними при високих температурах в аустенітній області та дозволяють контролювати розмір зерна аустеніту при температурі нагрівання перед прокаткою. [200].

Таким чином гальмування рекристалізації аустеніту дозволяє подрібнити кінцеву структуру металу. Це пов'язано з тим, що нерекристалізований аустеніт, який має велику кількість потенційних центрів для зародження нової фази, забезпечує високі швидкості її зародження при  $\gamma \rightarrow \alpha$  перетворенні [201].

Хімічні елементи, які входять до складу аустеніту, такі як вуглець, марганець, мідь, хром, нікель та молібден, знижують температуру початку розпаду аустеніту [201].

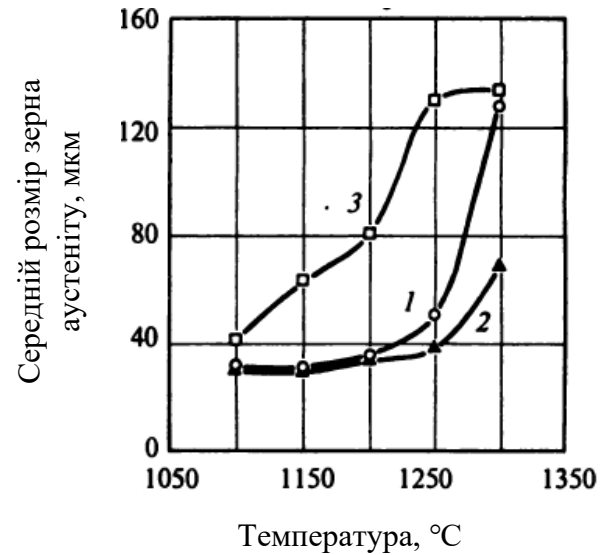
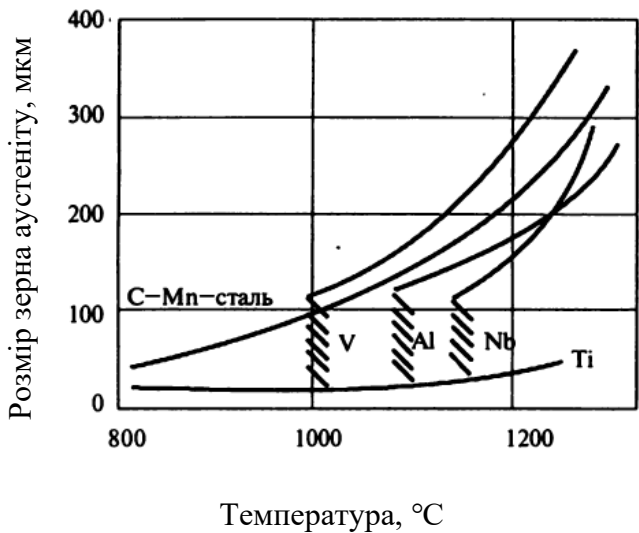
Процес виплавки, додаткові технологічні операції обробки сталі такі, як обробка в печі-ковші, вакуумування та безперервна розливка, спрямовані на забезпечення необхідного хімічного складу, його усереднення в об'ємі, мінімізацію вмісту шкідливих домішок (сірки, фосфору, азоту, водню) та їх сегрегації в центральну частину заготовки для запобігання крихкості металу.

Охолодження слябів після розливки – наразі поширено використовується уповільнене охолодження слябів в стопці тривалістю від 48 до 96 годин для видалення водню.

Прокатка слябів без охолодження здебільшого використовується в ливарно-прокатних модулях з проміжним підігрівом крайок заготовки, або для організації гарячого посаду в печі слябів з метою економії енергоресурсів. Вплив такої технології на формування необхідної мікроструктури та властивості прокату, за рахунок виключення стадії нагрівання заготовки, наразі є дискусійним.

Нагрівання слябів перед прокаткою має декілька напрямків реалізації, один з яких – нагрівання до температури аустенізації 1180-1220 °С, здебільшого застосовується на штабових станах, через збільшені втрати температури при виробництві тонкого сортаменту, другий напрямок – нагрівання до температури аустенізації 1100-1150 °С, який застосовується на товстолистових станах. Температура та тривалість нагрівання слябів є одним з інструментів керування

розміром зерна аустеніту та кількістю мікролегуючих елементів, які перейдуть в твердий розчин для впливу на формування мікроструктури в процесі ТМСП. Приклад впливу окремих та комплексу мікролегуючих елементів на зростання зерна аустеніту в сталях при нагріванні наведено на рис. 1.19, 1.20 [200].



Чорнова прокатка при виробництві продукції способами ТМСП є не тільки технологічною стадією для формозмінення, але і має великий набір можливостей для формування мікроструктури та механічних властивостей, які будуть наслідувані, рис. 1.21 [200]. Завдяки вмісту мікролегуючих елементів, виділенням їх карбонітридних фаз та регулюванню обтиснення на етапі чорнової термомеханічної прокатки відбувається контрольоване гальмування рекристалізації та зменшення розміру зерен аустеніту.

Відомі дослідження мікролегованих марок сталі свідчать, що для отримання якомога більш дрібного розміру зерна аустеніту, ступінь деформації по проходах





Рисунок 1.21 – Співвідношення між діаметром феритного та аустенітного зерен в залежності від технології прокатки: а – двократна товщина; б – трикратна товщина; в – чотирикратна товщина чистового підкату при деформації нижче температури рекристалізації аустеніту [200]

повинен бути не меншим за 10 % [200]. Ці дослідження зроблені більш ніж 20 років тому, та потребують уточнення з врахування хімічного складу, що отримав змін за цей період. Одним з напрямків розвитку технології чорнової термомеханічної прокатки стало використання двостадійної прокатки [17], суть якої полягає на першій стадії в виконанні деформації в температурному діапазоні до початку гальмування рекристалізації.

Друга стадія розраховується таким чином, щоб деформацію в чорновій клітці було здійснено з отриманням температури та товщини, необхідних для початку чистової прокатки без додаткових пауз. Така технологія запобігає протіканню збиральної рекристалізації за рахунок зміщення природнього охолодження підкату в зону, коли рекристалізація не відбувається. Цей спосіб доцільно застосовувати, коли необхідно підвищити долю в'язкої складової.

Природнє охолодження після чорнової прокатки спрямоване на досягнення прокатом необхідної температури перед чистовою прокаткою, яка розраховується в залежності від температури початку  $\gamma \rightarrow \alpha$  перетворення для кожного хімічного складу

сталі, тривалості чистової прокатки, варіанту вибору технології термомеханічної прокатки (з прискореним, або без прискореного охолодження).

Прискорене охолодження після чорнової прокатки - ця технологія набула розвитку останнім часом. Вона використовується для досягнення початкової температури чистової прокатки шляхом прискореного охолодження для зменшення часу протікання збиральної рекристалізації. Цю технологію, при наявності відповідного устаткування, застосовують для охолодження підкатів в товщинах 60-180 мм для отримання кінцевого прокату підвищених категорій міцності [108, 109].

В залежності від наявного устаткування та сортаменту вибирається технологія двостадійної чорнової прокатки, природнього охолодження, або прискореного охолодження підкату, або їх комбінація.

Збереження або вирівнювання температури прокату використовується на штабових станах, або станах Стеккеля для збереження температури відносно довгого підкату (в порівнянні з підкатом для товстолистого прокату) перед чистовою прокаткою. Якщо завданням при виробництві товстолистого прокату було якомога швидке зниження температури для початку чистової прокатки, для запобігання протікання збиральної рекристалізації, то при виробництві штаб актуальним є збереження температури підкату, який здебільшого має порівняльно меншу товщину та, відповідно, більший час охолодження на рольгангу. Для цієї технологічної операції використовуються теплозберігаючі панелі, установки CoilBox, різноманітної конструкції, прохідні печі, на станах Стеккеля – пічні моталки, або комбінація вказаного устаткування.

Чистова прокатка з закінченням прокату при температурі, яка відповідає початку феритного перетворення, здійснюється для отримання відносно-низьких категорій міцності прокату, або більш високої категорії міцності з додатковим використанням мікролегуючих елементів, в умовах відсутності установки прискореного охолодження. Така технологія в більшості застосовується на товстолизових станах та комбінується з проміжним повітряним охолодженням для досягнення підкатом необхідної температури закінчення прокатки.

Чистова одностадійна прокатка на товстолистових та штабових станах повинна закінчуватися на 25-30 °С вище температури початку  $\gamma \rightarrow \alpha$  перетворення, для здійснення подальшого прискореного охолодження. Температура початку  $\gamma \rightarrow \alpha$  перетворення розраховується для кожного хімічного складу згідно з залежністю, уточненою автором роботи [28]. За для забезпечення умов термомеханічного процесу, прокат перед прискореним охолодженням повинен мати розподіл температури по довжині та ширині в межах 25-30 °С.

Чистова одностадійна прокатка з проміжним прискореним охолодженням в більшості використовується на широкоштабових станах для досягнення необхідної температури закінчення чистової прокатки, перед прискореним охолодженням. Проміжне прискорене охолодження здійснюється в процесі прокатки між клітьми безперервної групи.

Прискорене охолодження після чистової прокатки здійснюється для отримання ферито-бейнітної структури, яка має більш високу щільність дислокацій в порівнянні з ферито-перлітною, яка утворюється при охолодження на повітрі, що забезпечує більш високу міцність та в'язкість одночасно з механізмом дисперсійного твердіння. Співвідношення впливу подрібнення зерна та дисперсійного твердіння на приріст границі плинності наведено на рис. 1.22 [200]. Температура закінчення прискореного охолодження, зазвичай, знаходиться в межах 580-500 °С. Швидкість охолодження також є одним з механізмів керування властивостями прокату, рис. 1.23 [200, 202].



Рисунок 1.22 – Співвідношення ефектів подрібнення зерна та дисперсійного твердіння при мікролегуванні сталі Nb, V та Ti [200]



Рисунок 1.23 – Вплив швидкості охолодження на розмір феритного зерна [200, 202]

Прискорене повітряне охолодження застосовується для зменшення шару окалини та покращення якості поверхні в межах температур між закінченням прискореного охолодження та початком уповільненого охолодження прокату.

Уповільнене охолодження здійснюється для видалення водню зі сталі для запобігання появи таких дефектів як «флокени». Дифузія водню відбувається в межах температур 450-100 °C.

Таким чином, при виборі та розробці варіанту технології термомеханічної прокатки необхідно враховувати вплив кожного з її етапів та конструктивно-структурний склад основного технологічного устаткування.

## Висновки

1. Технологія термомеханічної прокатки на сьогодні є однією з найбільш ефективних, наукоємних та тих, що постійно вдосконалюються. Перелік переваг дозволяє використовувати технологію ТМСП для виробництва майже всіх видів прокату, що призначений для конструювання, будівництва, суднобудування,

вироблення судів під тиском, для виробництва трубопроводів та іншого призначення.

2. Порівнянням технології гарячої та нормалізувальної прокатки з термомеханічною прокаткою встановлено, що технологія ТМСП дозволяє виробляти значно ширший асортимент прокату з більш вищим рівнем механічних характеристик, при інших рівних умовах, при цьому отримувати збалансований, між параметрами пластичності та параметрами міцності, комплекс механічних властивостей. Серед додаткових параметрів властивостей, які характеризують властиві суто технології ТМСП, є вуглецевий еквівалент,  $CE$  та  $CE_{Pcm}$ , співвідношення  $\sigma_T/\sigma_B$ , випробування падаючим вантажем DWT, та досягнення високого рівня енергії удару, KV.

3. Дослідження, що стосуються процесів термомеханічної прокатки, мають значну кількість. Актуальними є проблеми вивчення змінення розподілу температури по ширині прокату, встановлення закономірностей змінення температури прокатки при використанні такого устаткування, як CoilBox та пічні моталки на стані Стеккеля, дослідження впливу деформаційних процесів при чорновій прокатці на формування вихідної структури термомеханічного прокату.

4. Набули розвитку та поширення дослідження процесів прокатки методами математичного моделювання за допомогою комп'ютерних технологій. Дослідження напружено-деформаційних процесів термомеханічної прокатки методами скінченних елементів має особливу актуальність в умовах вузьких температурно-деформаційних діапазонів застосування цієї технології.

5. Багато досліджень присвячено лабораторному вивченню процесів ТМСП, в тому числі з використанням сучасного лабораторного устаткування, що підтверджує їх поточну актуальність.

6. В результаті аналізу устаткування вітчизняних та деяких закордонних станів для виробництва товстолистового та рулонного прокату визначено як переваги так і напрямки для покращення, які дозволять підвищити ефективність виробництва та суттєво розширити сортамент прокату, що виробляється за технологією ТМСП. Серед

основних переваг прокатних станів є обладнання їх установками УКО, системами автоматизації технологічних процесів.

7. Визначено, що незважаючи на технічний стан, відсутність деякого устаткування на вітчизняних та деяких закордонних станах застосовується технологія термомеханічної прокатки, яка в кожному окремому випадку має свої унікальні технічні та технологічні особливості. Ці особливості, в підсумку, і формують перелік сортаменту, що виробляється. Встановлено, що кожен з перерахованих станів має резерви для засвоєння сортаменту ТМСП, подальшого вдосконалення технології та устаткування.

8. На підставі даних світових інжинірингових кампаній встановлені сучасні тенденції вдосконалення прокатного устаткування, які спрямовані на підвищення потужності прокатних клітей, обладнання установками прискореного охолодження з підвищеною швидкістю, встановлення додаткових охолоджувальних секцій для багатостадійного охолодження, підвищення рівнів автоматизації, що спрямовано на забезпечення перспективних вимог до продукції, а також на подальше вдосконалення технології ТМСП.

9. Встановлено, що при виборі та розробці варіанту технології термомеханічної прокатки необхідно враховувати вплив кожного з її етапів та конструктивно-структурний склад основного технологічного устаткування на формування механічних властивостей готової продукції.

## РОЗДІЛ 2

### ВИБІР НАПРЯМКІВ І МЕТОДИК ПРОВЕДЕННЯ ДОСЛІДЖЕНЬ

#### 2.1 Систематизація технологічних етапів процесів термомеханічної обробки плоского металопрокату

Для визначення перспективних напрямків і методів досліджень необхідно узагальнити технологічні етапи процесу термомеханічної прокатки, враховуючи конструктивні особливості та структурний склад основного технологічного устаткування.

Основою систематизації технологічних етапів процесів ТМСП можуть служити різні нормативні документи та узагальнені наукові праці, які дозволяють охопити широкий перелік можливих варіантів в залежності від сортаменту та конструктивно-структурного складу устаткування для його виробництва [3, 50, 76, 152, 163-166, 200].

Запропоновану систематизацію розроблено, виходячи з принципу від початку виплавки сталі з певним хімічним складом, закінчуючи остаточним охолодженням готового прокату, табл. 2.1, на підставі результатів досліджень процесу термомеханічної прокатки з урахуванням перспективних напрямків його розвитку [3, 5-7, 18-30, 39, 76, 77, 79-82, 85, 86, 88, 89, 93, 94, 96, 107, 108-118]. Систематизацію розроблено наступним чином: для кожного виду прокатної продукції (товстий лист та рулон) у міру збільшення категорії міцності прокату наведені варіанти технологічних операцій в загальному термомеханічному процесі, які підібрані на підставі літературних джерел та власних досліджень.

Вибір з таблиці найбільш прийнятної комбінації технологічних операцій (процесів) з одного боку полегшує задачу, так як перелік може бути вибрано на підставі переліку устаткування, який є, з іншого боку становить складну задачу через багату кількість комбінацій сортаменту (розмірна частина, хімічний склад, категорія міцності прокату) та устаткування з різними технічними характеристиками.

Таблиця 2.1 – Систематизація технологічних етапів процесів ТМСП

Етап/Процес	Варіант технології по видах прокату														
	товстий лист									рулон					
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	1	2	3	4	5	6
Категорія міцності прокату	В → X120									В → X70					
Виплавка сталі (розробка хімічного складу)	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Безперервна розливка	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Охолодження слябів		X	X	X	X	X	X	X	X	X	X			X	X
Прокатка слябів без охолодження (гарячий посад/транзит/підігрів/ливарно-прокатний модуль)	X											X	X		
Нагрівання-аустенізація слябів		X	X	X	X	X	X	X	X	X	X			X	X
Чорнова прокатки	одна стадія	X	X	X	X					X	X	X	X	X	
	дві стадії з проміжним повітряним охолодженням					X	X	X	X						X
Природне охолодження після чорнової прокатки	X	X	X	X	X	X	X								
Прискорене охолодження після чорнової прокатки								X	X						
Збереження-вирівнювання температури підкату										X	X	X	X	X	X
Чистова прокатка	одностадійна в феритній області	X	X												
	одностадійна, в тому числі:			X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
	з проміжним повітряним охолодженням (або двостадійна)	X	X												
Прискорене охолодження	з проміжним прискореним охолодженням												X	X	X
	водою			X		X				X					
Прискорене повітряне охолодження				X		X	X	X		X	X	X	X	X	
Прискорене повітряне охолодження							X	X						X	
Уповільнене охолодження		X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	



## 2.2 Вибір та описання методів теоретичних досліджень

Для вирішення основного завдання дослідження щодо розширення сортаменту плоскої металопродукції з підвищеним рівнем механічних властивостей, яка виробляється способом термомеханічної прокатки, велике значення має отримання рівномірності розподілу механічних властивостей як по площі прокату так і по товщині.

При термомеханічній прокатці, при заданому хімічному складі, основними технологічними параметрами, які контролюються, а відповідно, і впливають на формування комплексу кінцевих механічних властивостей, є температура та тривалість нагрівання заготовки перед прокаткою, температура початку та закінчення чорнової прокатки, ступінь деформації по проходах, температура початку та закінчення чистової прокатки, відношення товщини чистової заготовки до кінцевої товщини прокату, температура початку та закінчення прискореного охолодження, швидкість прискореного охолодження, тривалість уповільненого охолодження.

Для забезпечення рівномірності розподілу механічних властивостей по площі термомеханічного прокату необхідно розуміння відповідного розподілу температури. При розробці технології термомеханічної прокатки, розрахунок розподілу температури по площі прокату неможливо виконати за допомогою відомих інженерних методів, таких як, наприклад, метод В. Тринкса, В.А. Тягунова, М.А. Зайкова, Ю.Д. Железнова, Б.Л. Цифриновича [58, 129]. Розрахунки даними методами дозволяють встановити тільки середньомасову температуру прокату та не враховують змінення впливу процесів теплообміну на різних його ділянках. При термомеханічній прокатці вирішення цієї проблеми ускладнене врахуванням спільного впливу конвекційного та променевого теплообміну та оцінки співвідношення цього впливу на змінення розподілу температури на різних ділянках прокату.

Для вирішення задачі з оцінки розподілу температури по ширині прокату ефективним є метод елементарних теплових балансів (метод скінченних різниць).

Метод застосовується у разі завдання складних граничних умов, наприклад циклу нагрівання – охолодження або інших. [203]. Суть методу полягає в розділенні дослідного матеріалу, в нашому випадку це підкат, на елементарні шари вздовж ширини, а час охолодження - на елементарні відрізки часу, по яких і виконуються розрахунки з урахуванням тепло-фізичних властивостей матеріалу по кожному шару.

Одним з механізмів, який забезпечує спадкову рівномірність розподілу механічних властивостей по товщині термомеханічного прокату, є керування процесом рекристалізації через забезпечення відповідних температурно-деформаційних умов чорнової стадії прокатки. Встановити такі умови можливо експериментальним методом шляхом засвердлювання в заготовку зразків металу, та дослідженням змінення їх стану (форми) після кожного проходу, здійсненого при певних температурно-деформаційних умовах. Цей спосіб є витратним та потребує велику кількість експериментів та макродосліджень після їх проведення. Інший спосіб – це здійснення деформації в широкому діапазоні температурно-деформаційних умов, та подальше загартування зразків, яке можна зробити за допомогою, наприклад, лабораторного комплексу типу Gleeble [204], що також потребує проведення додаткових мікро та макродосліджень.

Вирішити поставлену проблеми можливо за допомогою методу скінченних елементів (МСЕ) [205, 206]. Метод МСЕ застосовується як інструмент дослідження та проектування у різних сферах науки та техніки, процеси обробки металів тиском не є виключенням. Метод МСЕ дозволяє дослідити процеси пластичного деформування металів без проведення натурних експериментів. Поширення застосування цього методу набуло розвитку з розширенням можливостей комп'ютерної техніки та розробкою спеціалізованих програмних продуктів які дозволяють виконувати проектування на базі методу скінченних елементів серед яких ANSYS, LSDYNA, Abacus та інші.

Суть методу скінченних елементів полягає в моделюванні об'єкту шляхом його розбиття на окремі ділянки, тобто скінченні елементи. В кожному скінченному елементі поведінка об'єкту описується за окремим набором вибраних функцій, які

являють собою напруження та переміщення (деформацію) у вказаному елементі. Ці набори функцій задаються у такій формі, щоб задовільнити умовам безперервності характеристик, які вони описують, у всьому об'єкті. Перевагами методу є зручність формування рівнянь і можливість представлення складних умов напруження [205, 206].

Опис методології створення математичної моделі в системі Abaqus CAE наведено в додатку Д.

При створенні математичної моделі прийняті наступні умови: – в якості інструменту валка було обрано аналітично тверде тіло; – симетрична збірка, яка включала верхній валок та половину розкату, обрано з метою скорочення часу розрахунку; – в якості закону тертя обрано закон сухого тертя, коефіцієнт тертя розраховано згідно з залежністю, отриманою в роботі [207]; – температура металу по проходах розрахована аналітичним способом.

Метод математичної фізики застосовано для дослідження рекристалізаційних процесів, які відбуваються при термомеханічній прокатці, на підставі наявної інформації по розміру зерна аустеніту та відповідних температурно-деформаційних умов. Так для дослідження фізичних процесів рекристалізації застосовано наступні математичні методи інтерполяції [208-211]: – лінійна інтерполяція, яка полягала в отриманні рівняння прямої для кожного з відрізків, що поєднує дві точки між собою; – квадратична інтерполяція, яка описується функцією з квадратичного тричлена. Інтерполяція проводиться по трьох найближчих точках; – інтерполяція кубічними сплайнами, в основі якої є парабола; – глобальна інтерполяція, вирішенням якої є вирішення системи поліноміальних рівнянь. Методи інтерполяції даних по розміру зерна аустеніту, які використано в роботі та запропоновані авторами робіт [135, 208], наведено в додатку Е.

Важливим елементом дослідження силових процесів прокатки залишається метод фізичного моделювання при прокатці свинцевих зразків в лабораторних умовах. Подальшим розвитком цього методу досліджень може бути поєднання його

в комплексі з методом подоби та методом аналогій для дослідження сучасних марок сталі, в тому числі тих, що виробляються способом термомеханічної прокатки.

Таким чином, комплексне дослідження силових процесів прокатки на свинцевих зразках з встановленням переліку марок сталей-аналогів та температурно-деформаційних умов їх застосування можна скласти з наступних етапів.

Метод аналогій використано для визначення переліку марок сталей, які є аналогами зі свинцем, на підставі порівняння їх реологічних властивостей та умов обробки (температура деформації, швидкість та ступінь обтиснення).

Для встановлення зв'язку між реологічними властивостями марок сталі-аналогів та свинцем, з урахуванням умов обробки, використано метод подоби. В якості критерію подоби використано подобу коефіцієнтів регресії поліноміальних залежностей 4-го рівня визначення істинного опору деформації кожної марки сталі-аналога та свинцю.

Метод фізичного моделювання застосовано для вивчення силових характеристик процесу прокатки марок сталі-аналогів на підставі отримання результатів прокатки свинцю в лабораторних умовах.

### **2.3 Методика проведення експериментальних лабораторних та промислових досліджень**

Експериментальні дослідження спрямовано на дослідження реологічних властивостей свинцю, порівняння даних промислових експериментів з результатами моделювання, перевірку розроблених та застосованих теоретичних підходів при розробці та впровадженні технології, отримання необхідного рівня механічних властивостей прокату.

Дослідження реологічних властивостей свинцю проводились в умовах лабораторії кафедри ОМТ ДВНЗ «ПДТУ». Дослідження проводилося через стиснення свинцевих зразків (свинець марки ССу по ГОСТ 1292) на гідравлічній універсальній випробувальній машині моделі Р-20, максимальною силою 0,2 МН, швидкістю ходу штоку 2 мм/с, рис. 2.1.



Рисунок 2.1 – Зовнішній вигляд гідравлічної універсальної випробувальної машини моделі Р-20

При випробуваннях на стиснення використовувались 9 зразків циліндричної форми. Розміри зразків наведено в табл. 2.2.

Таблиця 2.2 – Розміри дослідних зразків

Параметр зразка	Номер дослідного зразка								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Діаметр, $D_0$ , мм	19,5	19,5	19,5	19,5	19,5	19,5	19,5	19,5	19,5
Висота, $H_0$ , мм	21,3	23	25	28	31	34,9	38	40	42

Виконуючи по черзі осаджування зразків, за 5 підходів, до кінцевої висоти  $H_k = 19,5$  мм, контактні поверхні яких були попередньо змащені індустріальною оливою марки І-20А, фіксували силу стиснення  $P$ , Н. Температура випробувань  $20$  °С, швидкість деформації  $u = 1$  с<sup>-1</sup>.

Для визначення коефіцієнту тертя  $f$  між контактними поверхнями, два циліндричних свинцевих зразка з діаметром  $D_0 = 19,5$  мм та висотою  $H_0 = 20,3$  мм додатково осаджували до кінцевої висоти  $H_k = 14,5$  мм, також фіксувалася сила стиснення  $P$ , Н.

Середню силу стиснення для кожного зразку визначали наступним чином:

$$P_{\bar{x}} = \frac{P_1 + P_2 + P_3 + P_4 + P_5}{5}, \quad (2.1)$$

де  $P_{1...5}$  – сила стиснення за кожне осаджування зразку, Н.

Допуски на відхилення сили стиснення визначали з залежності:

$$\Delta P = \frac{(P_1 - P_{\bar{x}})^2 + (P_2 - P_{\bar{x}})^2 + (P_3 - P_{\bar{x}})^2 + (P_4 - P_{\bar{x}})^2 + (P_5 - P_{\bar{x}})^2}{5}, \quad (2.2)$$

для умов:

$$P_{\bar{x}} - \Delta P \leq P_{\bar{x}} \leq P_{\bar{x}} + \Delta P. \quad (2.3)$$

Обробку результатів експерименту виконано по методиці [212, 213], яку наведено в додатку Є.

Експериментальні промислові дослідження проводилися в умовах діючого прокатного виробництва на «ММК ІМЕНІ ІЛЛІЧА», «МК «АЗОВСТАЛЬ», заводі Trameal та Ferriera Valsider, Італія.

Перелік основного устаткування, на якому проводилися дослідження та його характеристики наведені в додатках:

Стан 3600 «МК «АЗОВСТАЛЬ» – додаток Г.2.

Стан 3200 заводу Trameal, Італія – додаток Г.3.

Стан 1700 «ММК ІМЕНІ ІЛЛІЧА» – додаток Г.4.

Стан Стеккеля заводу Ferriera Valsider, Італія – додаток Г.6.

Дослідження механічних властивостей прокату та металографічні дослідження виконано стандартизованими методами в умовах атестованих випробувальних та дослідних лабораторій «ММК ІМЕНІ ІЛЛІЧА», «МК «АЗОВСТАЛЬ» та заводу Ferriera Valsider.

В роботі використано стандартні методи математичної статистики та теорій вірогідності для обробки експериментальної інформації, що наведені в спеціальній літературі [214-216]: – для отримання аналітичних залежностей, встановлення зв'язку між технологічними факторами, хімічним складом та механічними властивостями, по результатах експериментів, використано регресійний аналіз та кореляційний аналіз. Для опису отриманих рівнянь використовували лінійну модель, експоненціальну модель, квадратичну модель, степеневу модель та кубічну модель; – оцінку впливу технологічних факторів на параметри якості прокату виконувалась на підставі закону Парето та критерія згоди Пірсона; – стабільність технологічного процесу оцінювалась

за допомогою розподілу Пуассона, визначення середніх значень, стандартного відхилення, правила 3-х сигм. Обробку статистичної інформації виконували в пакетах прикладних програм Statistika та MS Excel.

## **Висновки**

1. З метою вибору варіанту реалізації технології ТМСП, в залежності від сортаменту, технологічних підходів та конструктивно-структурного складу основного технологічного устаткування систематизовано технологічні етапи процесів термомеханічної прокатки для виробництва товстолистового та рулонного прокату. Встановлено можливість генерування нових технологічних схем.

2. Для вирішення поставлених завдань з розширення сортаменту продукції з підвищеним рівнем механічних властивостей доцільне використання комплексного підходу, що передбачає проведення попередніх експериментів, розробку уточнених моделей оцінки розподілу температури по ширині штаби, напружено-деформаційного стану підкатів, рекристалізаційних процесів, механічні та металографічні випробування готової продукції.

3. Для теоретичних досліджень обрано наступні методи: метод елементарних теплових балансів може дозволити виконати уточнення математичної моделі розподілу температури по ширині штаби, оцінити можливі відхилення температури від допустимих границь впровадження технології ТМСП, а також прогнозувати змінення розподілу температури по проходах; метод скінченних елементів, за допомогою комп'ютерного моделювання з використанням спеціалізованого програмного забезпечення може дозволити провести імітаційний експеримент з встановлення умов зменшення нерівномірності деформації по товщині підкату при чорновій та чистовій прокатці, що є одним з елементів керування властивостями прокату в процесах ТМСП; поєднання методів подоби, фізичного моделювання та аналогій дозволить встановити перелік марок сталі які є аналогами зі свинцем, температурно-деформаційні умови їх аналогії та отримати можливість прогнозувати

силові характеристики їх прокатки в тому числі при термомеханічних режимах, для реальних умов виробництва; методи математичної фізики дозволять виконати інтерполяцію даних по розміру зерна аустеніту при певних температурно-деформаційних умовах та отримати інструмент для керування процесом термомеханічної прокатки на чорновій стадії.

4. Для дослідження механічних властивостей прокату виробленого термомеханічним способом прокатки обрано метод аналізу мікроструктури, метод аналізу неметалевих включень, метод визначення розміру зерна фериту, метод випробувань на розрив, метод випробувань на холодний вигін, метод випробувань на ударну в'язкість, роботу удару, метод випробування на розтягнення при підвищених температурах, метод випробувань на розтягнення у  $Z$  напрямку по товщині.

5. Методи математичної статистики та теорії вірогідності застосовано для обробки результатів експериментів, визначення вагомих технологічних факторів та встановлення достовірності отриманих результатів.



### РОЗДІЛ 3

## ТЕОРЕТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСІВ ЗМІНЕННЯ ТЕМПЕРАТУРНОГО ПОЛЯ ШТАБИ ТА ПРОЦЕСІВ РЕКРИСТАЛІЗАЦІЇ ДЛЯ ПРОГНОЗУВАННЯ МЕХАНІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ДЛЯ УМОВ ТЕРМОМЕХАНІЧНОЇ ПРОКАТКИ

**3.1 Вдосконалення математичної моделі змінення температурного поля нерівномірно нагрітої штаби, що охолоджується, для умов термомеханічної прокатки**

**3.1.1 Отримання вдосконалених залежностей для розрахунку необхідної форми нерівномірного температурного поля методами математичного моделювання**

Метою цього дослідження є пошук такої форми температурного поля, яке повинен мати підкат по ширині після нагрівання, щоб безпосередньо перед прокаткою, яку проводять в кліті стану Стеккеля (рис. 1.17), він мав необхідний градієнт розподілу температур.

Шляхом математичного моделювання зміни температурного поля нерівномірно нагрітої штаби, що охолоджується, розподіл температур по ширині підкату при нагріванні в пічній моталці має бути отримано з урахуванням часу, що проходить від кінця нагріву штаби до початку її деформування на стані Стеккеля.

Для розробки математичної моделі зміни температурного поля в часі був обраний метод елементарних теплових балансів. Обраний метод вимагає умовної дискретизації обсягу штаби і часового проміжку від закінчення нагрівання до початку деформування. Розглядали одновимірну модель, тобто щільність теплового потоку  $q$  є функцією тільки координати  $x$  по горизонтальній осі штаби і часу  $t$ . Перепадами температури по товщині нехтували у зв'язку з тим, що підкат є термічно тонким тілом, тобто число Біо  $Bi < 0,25$  [217, 218].

Полосу, що нагрівалася, рис. 3.1 [135], умовно розбивали на елементарні об'єми (шари) призматичної форми довжиною  $\Delta x$  та площею  $F = h_0 \times l$ .

При умові симетричної відносно осі  $y$  форми температурного поля, рис. 3.1, половина ширини штаби становить  $B_0 = 2B_{0n}$ , де  $B_{0n}$  – відстань між середнім поперечним перерізом і зниженням з мінімальної (на крайці підкату) температури. Розміри  $\Delta x$  вибираємо невеликими в порівнянні з шириною заготовки  $B_{0n}$  [135].

Приймаємо наступні допущення [135]:

- ізотермічні поверхні в межах одного призматичного елемента є паралельні площині, рівновіддалені один від одного;

- середній тепловий потік, що проходить за елементарний проміжок часу через будь-яку поверхню, пропорційний початковому значенню градієнта температур за цей час;

- теплоємність елемента зростає (убуває) пропорційно збільшенню (зниженню) температури в середній точці його обсягу, теплової потік поширюється від більш нагрітих елементів до менш нагрітих елементів.

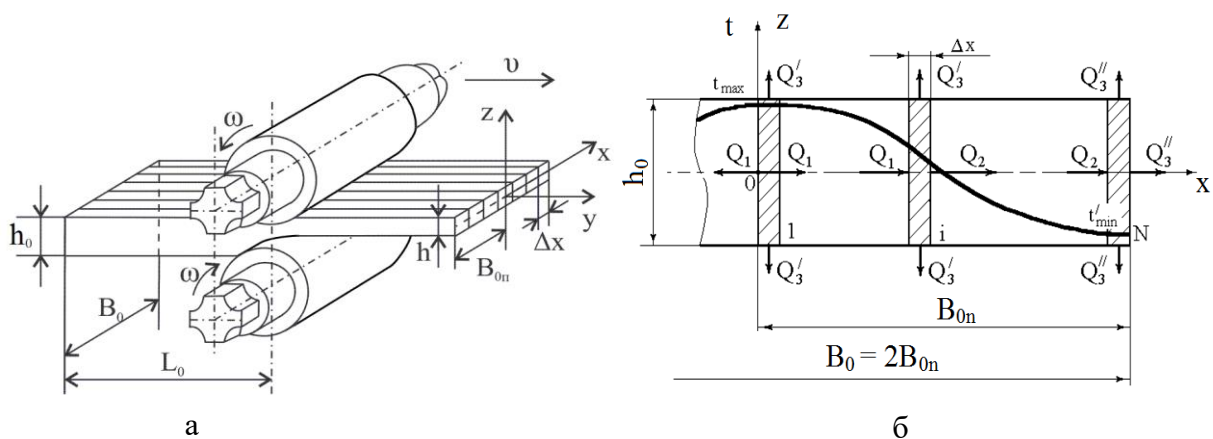


Рисунок 3.1 – Розрахункова схема до моделювання температурного поля в підкаті, розбивка на шари (а) та епюра розподілу теплових потоків по ширині (б) [135]

Кількість елементарних об'ємів при розгляді половини ширини підкату [135]:

$$N = \frac{B_{0n}}{\Delta x}, \quad (3.1)$$

тоді порядковий номер кожного елемента  $\Delta x$  позначали як  $i = 1; 2; \dots; N$ . Тобто елемент

по середині ширини полоси має порядковий номер 1, а елементу на кромці підкату відповідає порядковий номер  $N$ .

Час від закінчення нагрівання заготовки до початку її деформування позначали через  $\tau$  та розбивали на  $M$  елементарних проміжків  $\Delta\tau$  [135]:

$$M = \frac{\tau}{\Delta\tau}, \quad (3.2)$$

при цьому кожному елементарному проміжку часу  $\Delta\tau$  надавали свій порядковий номер  $j = 1; 2; \dots; M$ . Враховуючи, що специфікою задачі, яка розглядається є «зворотній розрахунок», то  $M$  – індекс розрахованого першого (початкового), а 1 – індекс розрахованого останнього (шуканого) проміжку часу з якого починається охолодження. Величина  $\tau_{(j)} = \sum_{j=1}^{j=1;2;\dots;M} j \cdot \Delta\tau$  підлягає визначенню.

Введемо позначення для температур (тут та всюди в градусах Цельсія, °C):  $t_{i;j}$  – температура довільного шару в будь-якому проміжку часу, де  $i$  – номер довільного шару,  $j$  – номер проміжку часу. При заданій формі температурного поля, яку необхідно мати підкату перед деформуванням, рішення задачі буде полягати в пошуку залежності температури  $i$ -го шару  $t_{i;j-1}$  (в проміжку часу  $j - 1$ ) від значення температури цього та сусіднього шару в попередній розрахунковий проміжок часу  $j$ .

Елементарна кількість теплоти  $\partial Q$ , яка проходить по нормалі через елементарну ділянку, згідно з основним законом теплопровідності (закону Фур'є) в диференціальній формі [135]:

$$\partial Q = -\lambda \frac{\partial t}{\partial x} \partial F \cdot \partial \tau, \quad (3.3)$$

де  $\lambda$  – коефіцієнт теплопровідності для матеріалу полоси при заданих умовах, Вт/м·град;  $\partial F$  – елементарна площа перерізу, нормально до якій проходить тепловий потік;  $\frac{\partial t}{\partial x}$  – градієнт температур у напрямку осі  $x$ ;  $\partial \tau$  – елементарний проміжок часу.

Тепловий потік, який виходить із поверхні крайки підкату в довкілля при температурах термомеханічної прокатки (ТМСП) складається з променевого та конвекційного.

Променевий тепловий потік підпорядковується закону Стефана-Больцмана [135]:

$$\partial Q = \sigma [(t + 273)^4 - (t_{o.c} + 273)^4] \cdot \partial F \cdot \partial \tau, \quad (3.4)$$

де  $\sigma = \varepsilon_{ct} \sigma_0$  – коефіцієнт випромінювання чорного тіла, тут  $\varepsilon_{ct} = 0,8$  – ступінь чорноти тіла (полоси), за умов, що випромінювання здійснюється у простір, який значно перевищує розмір полоси,  $\sigma_0 = 5,77 \cdot 10^{-8}$  Вт/(м<sup>2</sup>·град<sup>4</sup>) – постійна Стефана–Больцмана для абсолютно чорного тіла;

$t_{o.c}$  – температура довкілля (в розрахунках прийнято  $t_{o.c} = 20$  °С).

Конвекційний тепловий потік підпорядковується закону Ньютона-Рихмана:

$$\partial Q = \alpha (t - t_{o.c}) \cdot \partial F \cdot \partial \tau, \quad (3.5)$$

де  $\alpha$  – коефіцієнт тепловіддачі, Вт/(м<sup>2</sup>·К).

Відповідно до сучасного уявлення теорії теплопереносу, передача тепла від тіл нагрітих вище температури червоного світіння відбувається головним чином випромінюванням. Вплив конвекційного механізму теплопередачі зі зниженням температури поверхні заготовки збільшується. Особливістю стану Стеккіля є те, що впродовж процесу прокатки температуру можна утримувати на необхідному рівні завдяки наявності двох пічних моталок, тобто на рівні необхідному для здійснення термомеханічного процесу. Тому, при постановці завдання враховували теплопередачу випромінюванням та конвекцією.

Складемо рівняння теплового балансу в кінцево-різничній формі для довільного елементарного об'єму  $i$  в момент часу  $j$ , використовуючи рівняння (3.3)-(3.5) [135]:

- кількість тепла, яке входить в ліву грань елемента:

$$Q_1 = \lambda \frac{t_{i-1;j} - t_{i;j}}{\Delta x} \cdot h_0 \cdot B_0; \quad (3.6)$$

- кількість тепла, яке виходить через праву грань елемента:

$$Q_2 = \lambda \frac{t_{i;j} - t_{i+1;j}}{\Delta x} \cdot h_0 \cdot B_0; \quad (3.7)$$

- кількість тепла, яке виходить випромінюванням через бокову (вільну прямокутну) поверхню довільного елемента [135]:

$$Q'_3 = \sigma [(t_{i;j} + 273)^4 - (t_{o.c} + 273)^4] \cdot h_0 \cdot \Delta x; \quad (3.8)$$

- кількість тепла, яке виходить конвекцією через бокову (вільну прямокутну)

поверхню довільного елемента:

$$Q'_4 = \alpha (t_{i,j} - t_{o.c}) \cdot h_0 \cdot \Delta x; \quad (3.9)$$

- кількість тепла, яке випромінюється через крайку підкату [135]:

$$Q''_3 = \sigma \left[ (t_{N,j} + 273)^4 - (t_{o.c} + 273)^4 \right] \cdot h_0 \cdot \Delta x + \sigma \left[ (t_{N,j} + 273)^4 - (t_{o.c} + 273)^4 \right] \cdot h_0 \cdot B_0 = \sigma \left[ (t_{N,j} + 273)^4 - (t_{o.c} + 273)^4 \right] \cdot (h_0 \cdot \Delta x + h_0 \cdot B_0); \quad (3.10)$$

- кількість тепла, яке передається конвекцією через крайку підкату:

$$Q''_4 = [\alpha (t_{i,j} - t_{o.c}) \cdot h_0 \cdot \Delta x] + [\alpha (t_{i,j} - t_{o.c}) \cdot h_0 \cdot B_0] = [\alpha (t_{i,j} - t_{o.c}) \cdot h_0 \cdot (\Delta x + B_0)]; \quad (3.11)$$

Якщо прийняти змінення питомої ентальпії [135]:

$$\Delta h = \rho_3 \cdot c \cdot \Delta t, \quad (3.12)$$

Тоді змінення ентальпії шару (елементарного об'єму) [135]:

$$\Delta H = \rho_3 \cdot c \cdot (t_{i,j-1} - t_{i,j}) \cdot h_0 \cdot B_0 \cdot \Delta x, \quad (3.13)$$

де у формулах (3.12), (3.13):

$\Delta h$ , Дж/м<sup>3</sup> і  $\Delta H$ , Дж – змінення питомої ентальпії и ентальпії елементарного об'єму відповідно;

$\rho_3$  – щільність матеріалу заготовки при заданій температурі, кг/м<sup>3</sup>;

$c$  – теплоємність матеріалу заготовки при заданій температурі, Дж/(кг·град).

Початкові умови [135]:

$$t_{i,M} = t(x; 0) = t(x). \quad (3.14)$$

Граничні умови [135]:

$$\left\{ \begin{aligned} \frac{\partial t(0; \tau_{(j)})}{\partial x} &= 0; \quad t_{1;M} = t(0; 0) = t_{max}; \quad t_{1;1} = t(0; \tau_{(M)}) \leq t_{max(km)}; \quad t_{N;M} = \\ t(L_{0n}; 0) &= t'_{min} \end{aligned} \right\}. \quad (3.15)$$

Для забезпечення умов теплового балансу сусідніх шарів заготовки, значення коефіцієнту теплопровідності  $\lambda$  слід брати при середній температурі сусідніх елементарних об'ємів в момент часу  $j$ , а щільність  $\rho_3$  і теплоємність  $c$  – при температурі шару, який розглядається в момент часу  $j$ .

Тепловий баланс довільного елементарного шару заготовки:

$$(Q_1 - Q_2 - Q'_3 - Q'_4) \cdot \Delta\tau = \Delta H, \quad (3.16)$$

або, з врахуванням (3.6) – (3.9):

$$\left\{ \lambda \frac{t_{i-1;j} - t_{i;j}}{\Delta x} \cdot h_0 \cdot B_0 - \lambda \frac{t_{i;j} - t_{i+1;j}}{\Delta x} \cdot h_0 \cdot B_0 - \sigma \left[ (t_{i;j} + 273)^4 - (293)^4 \right] \cdot h_0 \cdot \Delta x - \alpha (t_{i;j} - 20) \cdot h_0 \cdot \Delta x \right\} \cdot \Delta\tau = \rho_3 \cdot c \cdot (t_{i;j-1} - t_{i;j}) \cdot h_0 \cdot B_0 \cdot \Delta x. \quad (3.17)$$

З рівняння (3.17) не складно отримати наступне:

$$t_{i;j-1} - t_{i;j} = \frac{\Delta\tau}{\rho_3 \cdot c \cdot h_0 \cdot B_0 \cdot \Delta x} \cdot \left\{ \lambda \frac{t_{i-1;j} - 2t_{i;j} + t_{i+1;j}}{\Delta x} \cdot h_0 \cdot B_0 - \sigma \left[ (t_{i;j} + 273)^4 - (293)^4 \right] \cdot h_0 \cdot \Delta x - \alpha (t_{i;j} - 20) \cdot h_0 \cdot \Delta x \right\}. \quad (3.18)$$

Враховуючи, що коефіцієнт теплопровідності  $a_m$ , м<sup>2</sup>/с, матеріалу визначається як [135]:

$$a_m = \lambda / \rho_3 \cdot c, \quad (3.19)$$

то рівняння (3.18) можна переписати в наступному вигляді:

$$t_{i;j-1} = t_{i;j} + \frac{a_m \cdot \Delta\tau}{\Delta x^2} (t_{i-1;j} - 2t_{i;j} + t_{i+1;j}) - \frac{a_m \cdot \Delta\tau}{\lambda B_0} \cdot \sigma \left[ (t_{i;j} + 273)^4 - (293)^4 \right] - \frac{a_m \cdot \Delta\tau}{\lambda B_0} \cdot \alpha (t_{i;j} - 20). \quad (3.20)$$

Тоді отримаємо кінцеву розрахункову формулу для довільного проміжного ( $i$  – го) шару заготовки:

$$t_{i;j-1} = t_{i;j} + Fo_{\Delta x} (t_{i-1;j} - 2t_{i;j} + t_{i+1;j}) - Fo_{\Delta x} \cdot \frac{\sigma \cdot \Delta x^2}{\lambda \cdot B_0} \cdot \left[ (t_{i;j} + 273)^4 - (293)^4 \right] - Fo_{\Delta x} \cdot \frac{\alpha \cdot \Delta x^2}{\lambda \cdot B_0} (t_{i;j} - 20), \quad (3.21)$$

де  $Fo_{\Delta x} = a_m \cdot \Delta\tau / \Delta x^2$  – критерій Фур'є для елементарного об'єму шириною  $\Delta x$ .

Рівняння теплового балансу шару з максимальною теплоємністю ( $i=1$ ) складаємо аналогічно формулам (3.17) – (3.18), з врахуванням того, що тепло у даного елементарного об'єму виходить з двох кромки (правої та лівої). Приймаємо для симетричної скінченно-різницевої форми записи  $i-1 = i+1 = 2$ , тоді:

$$\left\{ 2 \cdot \lambda \frac{t_{2;j} - t_{1;j}}{\Delta x} \cdot h_0 \cdot B_0 - \sigma \left[ (t_{1;j} + 273)^4 - (293)^4 \right] \cdot h_0 \cdot \Delta x - \alpha (t_{1;j} - 20) \cdot h_0 \cdot \Delta x \right\} \cdot \Delta \tau = \rho_3 \cdot c \cdot (t_{1;j-1} - t_{1;j}) \cdot h_0 \cdot B_0 \cdot \Delta x; \quad (3.22)$$

Тоді, температура шару з максимальною теплоємністю:

$$t_{1;j-1} = t_{1;j} + 2 \cdot \lambda \frac{t_{2;j} - t_{1;j}}{\Delta x^2 \rho_3 c h_0 B_0} \cdot h_0 \cdot B_0 \Delta \tau - \sigma \frac{[(t_{1;j} + 273)^4 - (293)^4]}{\Delta x \rho_3 c h_0 B_0} \cdot h_0 \cdot \Delta x \Delta \tau - \alpha \frac{(t_{1;j} - 20)}{\Delta x \rho_3 c h_0 B_0} \cdot h_0 \cdot \Delta x \cdot \Delta \tau. \quad (3.23)$$

Після проведення простих перетворень рівняння (3.23), з врахуванням формули (3.19), можна записати кінцеву розрахункову формулу для елементарного об'єму з порядковим номером  $i = 1$ :

$$t_{1;j-1} = t_{1;j} + 2 \cdot Fo_{\Delta x} (t_{2;j} - t_{1;j}) - \sigma \cdot Fo_{\Delta x} \cdot \Delta x^2 \frac{[(t_{1;j} + 273)^4 - (293)^4]}{\lambda B_0} - Fo_{\Delta x} \cdot \Delta x^2 \cdot \alpha \frac{(t_{1;j} - 20)}{\lambda B_0}; \quad (3.24)$$

Тепловий баланс шару на кромці з порядковим номером  $i = N$ , враховуючи, що тут тепло додатково виходить випромінюванням та конвекцією через поверхню торця:

$$(Q_2 - Q_3'' - Q_4'') \cdot \Delta \tau = \Delta H. \quad (3.25)$$

Тоді, з врахуванням залежностей (3.7), (3.10), (3.11) і (3.13) можна записати:

$$\left\{ \lambda \frac{t_{N;j} - t_{N+1;j}}{\Delta x} \cdot h_0 \cdot B_0 - \sigma \left[ (t_{N;j} + 273)^4 - (293)^4 \right] \cdot h_0 (\Delta x + B_0) - \left[ \alpha (t_{i;j} - t_{o.c}) \cdot h_0 \cdot (\Delta x + B_0) \right] \right\} \cdot \Delta \tau = \rho_3 \cdot c \cdot (t_{N;j-1} - t_{N;j}) \cdot h_0 \cdot B_0 \cdot \Delta x. \quad (3.26)$$

Після перетворень, аналогічних (3.15) – (3.21), отримаємо наступну формулу для шару на кромці с порядковим номером  $i = N$ :

$$t_{N;j-1} = t_{N;j} + \lambda \frac{t_{N;j} - t_{N+1;j}}{\Delta x^2 \rho_3 \cdot c \cdot h_0 \cdot B_0} \cdot h_0 \cdot B_0 \cdot \Delta \tau - \sigma \frac{[(t_{N;j} + 273)^4 - (293)^4]}{\Delta x \cdot \rho_3 \cdot c \cdot h_0 \cdot B_0} \cdot h_0 (\Delta x + B_0) \cdot \Delta \tau - \left[ \alpha \frac{(t_{i;j} - t_{o.c})}{\Delta x \cdot \rho_3 \cdot c \cdot h_0 \cdot B_0} \cdot h_0 \cdot (\Delta x + B_0) \cdot \Delta \tau \right]; \quad (3.27)$$

після деяких спрощень:

$$t_{N;j-1} = t_{N;j} + \lambda \frac{t_{N;j} - t_{N+1;j}}{\Delta x^2 \rho_3 \cdot c} \cdot \Delta \tau - \sigma \frac{[(t_{N;j+273})^4 - (293)^4]}{\Delta x \cdot \rho_3 \cdot c \cdot B_0} \cdot (\Delta x + B_0) \cdot \Delta \tau - \left[ \alpha \frac{(t_{N;j} - t_{0.c})}{\Delta x \cdot \rho_3 \cdot c \cdot B_0} \cdot (\Delta x + B_0) \cdot \Delta \tau \right]; \quad (3.28)$$

об'єднань параметрів:

$$t_{N;j-1} = t_{N;j} + a_m \frac{t_{N;j} - t_{N+1;j}}{\Delta x^2} \cdot \Delta \tau - \sigma \cdot a_m \frac{[(t_{N;j+273})^4 - (293)^4]}{\lambda \cdot \Delta x \cdot B_0} \cdot (\Delta x + B_0) \cdot \Delta \tau - \left[ \alpha \cdot a_m \frac{(t_{N;j} - t_{0.c})}{\lambda \cdot \Delta x \cdot B_0} \cdot (\Delta x + B_0) \cdot \Delta \tau \right]; \quad (3.29)$$

$$t_{N;j-1} = t_{N;j} + F_{O_{\Delta x}} \cdot (t_{N;j} - t_{N+1;j}) - \sigma \cdot F_{O_{\Delta x}} \cdot \Delta x \cdot \frac{[(t_{N;j+273})^4 - (293)^4]}{\lambda \cdot B_0} \cdot (\Delta x + B_0) - \left[ \alpha \cdot F_{O_{\Delta x}} \cdot \Delta x \cdot \frac{(t_{N;j} - 20)}{\lambda \cdot B_0} \cdot (\Delta x + B_0) \right]; \quad (3.30)$$

$$t_{N;j-1} = t_{N;j} + F_{O_{\Delta x}} \left\{ (t_{N;j} - t_{N+1;j}) - \sigma \cdot \Delta x \cdot \frac{[(t_{N;j+273})^4 - (293)^4]}{\lambda \cdot B_0} \cdot (\Delta x + B_0) - \left[ \alpha \cdot \Delta x \cdot \frac{(t_{N;j} - 20)}{\lambda \cdot B_0} \cdot (\Delta x + B_0) \right] \right\}; \quad (3.31)$$

або у наступному вигляді:

$$t_{N;j-1} = t_{N;j} + F_{O_{\Delta x}} \left\{ (t_{N;j} - t_{N+1;j}) - \frac{\Delta x \cdot (\Delta x + B_0)}{\lambda \cdot B_0} \left( \sigma \cdot [(t_{N;j} + 273)^4 - (293)^4] - \alpha \cdot (t_{N;j} - 20) \right) \right\}. \quad (3.32)$$

Рекурентні залежності (3.2), (3.21), (3.24), (3.32) складають основу розрахунку необхідної форми нерівномірного температурного поля методами математичного моделювання.



### 3.1.2 Отримання залежностей для безперервного розрахунку фізичних та теплофізичних властивостей матеріалу

Величина температур штаби  $t_{i;j-1}$ ,  $t_{1;j-1}$ , та  $t_{N;j-1}$  може коливатися в широких межах в залежності від обраного варіанту нагрівання для реалізації технології гарячої, нормалізувальної або термомеханічної прокатки. При цьому, фізичні і теплофізичні властивості матеріалу є функцією температури. В більшості джерел залежності  $\rho_s$ ,  $\lambda$ ,  $c$  від температури  $t$  задані таблицями, тобто є дискретними, однак для автоматизованих розрахунків температурних полів необхідно мати їх безперервні характеристики.

Сталь, що досліджується в даній роботі є низьковуглецевою, тому надалі розрахунки фізичних та теплофізичні властивості будуть виконуватись для сталей такого типу або їх існуючих аналогів в дослідженнях авторів.

Залежність для безперервного розрахунку щільності сталі  $\rho_s$ ,  $\text{кг/м}^3$ , що прокатується отримана на підставі наступного рівняння [217]:

$$\rho_s = \frac{\rho_0}{1+3\beta t}, \quad (3.33)$$

де  $\rho_0$  – щільність сталі при кімнатній температурі,  $\text{кг/м}^3$ ;  $\beta$  – коефіцієнт лінійного розширення.

Щільність сталі при температурі  $t = 0^\circ\text{C}$  розраховуємо на підставі залежності [217]:

$$\rho_0 = 7876 - 40C - 16Mn - 73Si - 164S - 117P + 11Cu + 4Ni + Cr + 95W - 120Al + 100As, \quad (3.34)$$

де  $C, Mn, Si \dots$  – вміст вуглецю, марганцю, кремнію та інших елементів в сталі, %.

Для визначення залежності коефіцієнту лінійного розширення  $\beta$  від температури  $t$ , виконано обробку дискретних даних по вуглецевій сталі, типу 08 [219], результати якої наведено на рис. 3.2.

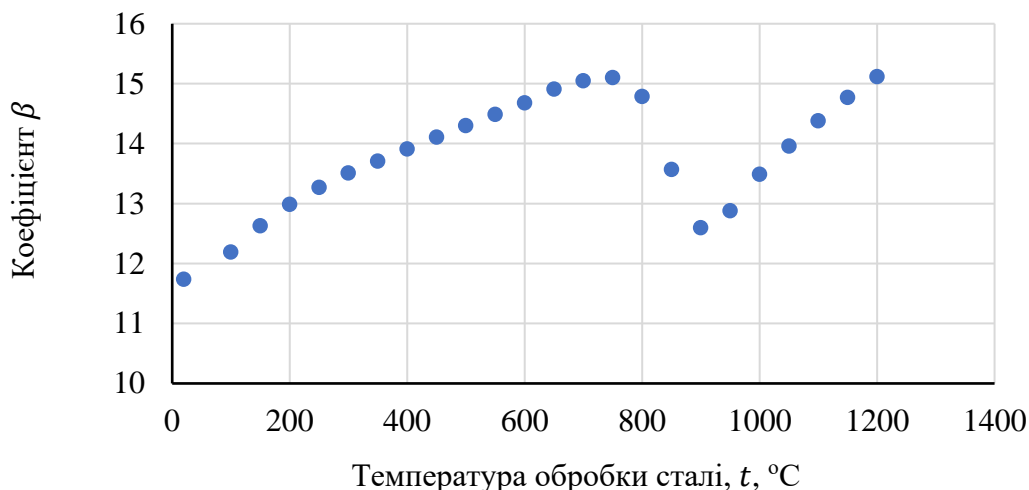


Рисунок 3.2 – Результати обробки дискретних даних по визначенню залежності коефіцієнту лінійного розширення  $\beta$  від температури  $t$

Згідно з рис. 3.2, залежність коефіцієнту  $\beta$  можна розділити на 3 діапазони змінення. Перший діапазон – це збільшення  $\beta$  при зростанні температури від 50 °C до 750 °C, другий діапазон – це зменшення  $\beta$  при зростанні температури вище 750 °C до 900 °C, третій діапазон – це збільшення  $\beta$  при зростанні температури вище 900 °C до 1200 °C.

Відповідно до змінення кожної межі, встановлені залежності для визначення коефіцієнту лінійного розширення по трьох діапазонах температур, рис. 3.3.

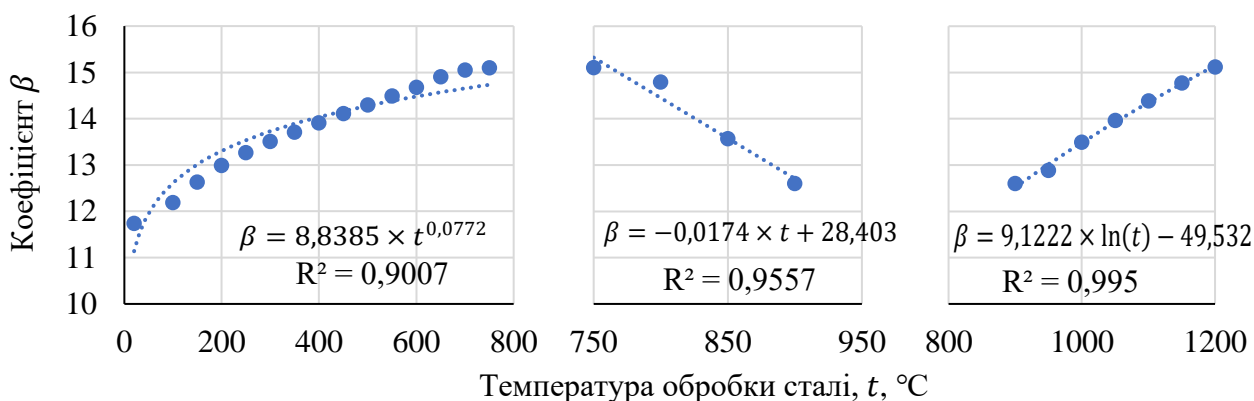


Рисунок 3.3 – Визначення залежності коефіцієнту лінійного розширення  $\beta$  від температури  $t$  по трьох діапазонах температур

Встановлення трьох залежностей замість одної не є проблемою для

автоматичного обчислення, до того ж, такий розподіл дозволяє отримати коефіцієнт вірогідності апроксимації  $R^2$  більший за 0,90. Таким чином, коефіцієнт лінійного розширення  $\beta$  визначаємо за допомогою наступних залежностей:

- при температурі обробки сталі від 50 °С до 750 °С

$$\beta = 8,8385 \times t^{0,0772}, \quad (3.35)$$

- при температурі обробки сталі >750 °С до 900 °С

$$\beta = -0,0174 \times t + 28,403, \quad (3.36)$$

- при температурі обробки сталі >900 °С до 1200 °С

$$\beta = 9,1222 \times \ln(t) - 49,532, \quad (3.37)$$

Для встановлення залежності безперервного змінення середньої теплоємності вуглецевої сталі  $c$ , кДж/(кг×К) виконано обробку даних [218], результати якої наведені на рис. 3.4.

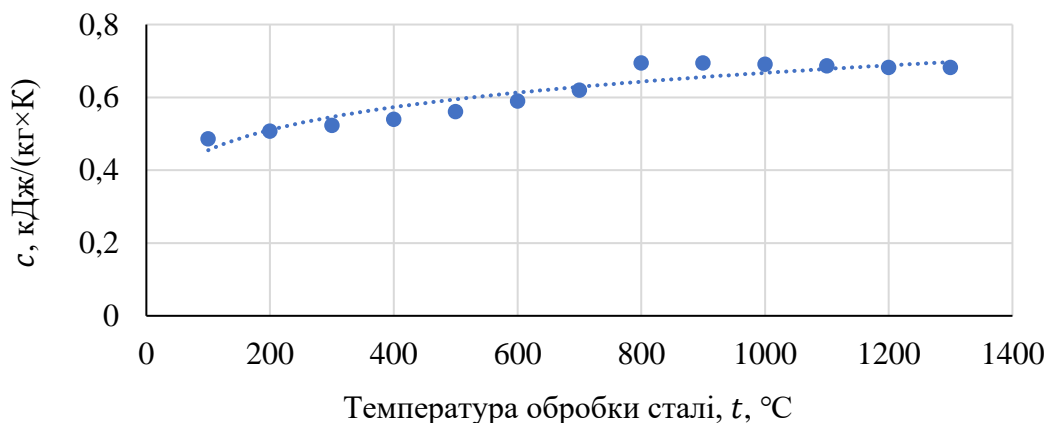


Рисунок 3.4 – Результати обробки даних по зміненню середньої теплоємності вуглецевої сталі  $c$  в залежності від температури  $t$

По аналогії з результатами обробки щільності, змінення теплоємності також можна розділити на діапазони з метою збільшення коефіцієнту вірогідності апроксимації  $R^2$ .

Першій діапазон змінення  $c$  при температурі від 100 °С до 800 °С, другий - при температурі більшим за 800 °С до 1300 °С. Результати обробки наведено на рис. 3.5.

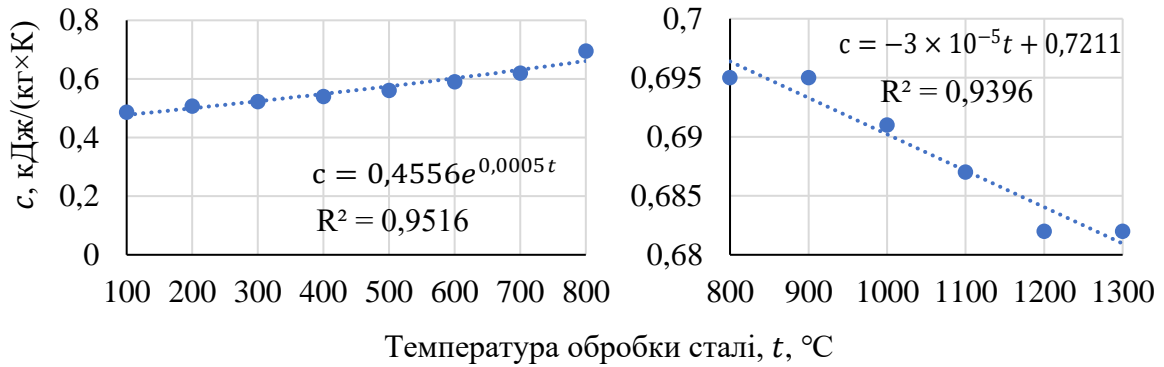


Рисунок 3.5 – Визначення залежності теплоємності  $c$  від температури  $t$

Середню теплоємність вуглецевої сталі  $c$  визначаємо наступним чином:

- при температурі обробки сталі від 100  $^{\circ}\text{C}$  до 800  $^{\circ}\text{C}$

$$c = 0,4556e^{0,0005t}, \quad (3.38)$$

- при температурі обробки сталі  $>800$   $^{\circ}\text{C}$  до 1300  $^{\circ}\text{C}$

$$c = -3 \times 10^{-5}t + 0,7211 \quad (3.39)$$

Отримання залежності для розрахунку коефіцієнту теплопровідності  $\lambda$ ,  $\text{Вт}/(\text{м}\cdot\text{K})$  для маловуглецевих сталей виконувалося по аналогічних методиках.

Результати обробки даних по встановленню залежності коефіцієнту теплопровідності  $\lambda$  від температури сталі  $t$  наведено на рис. 3.6.

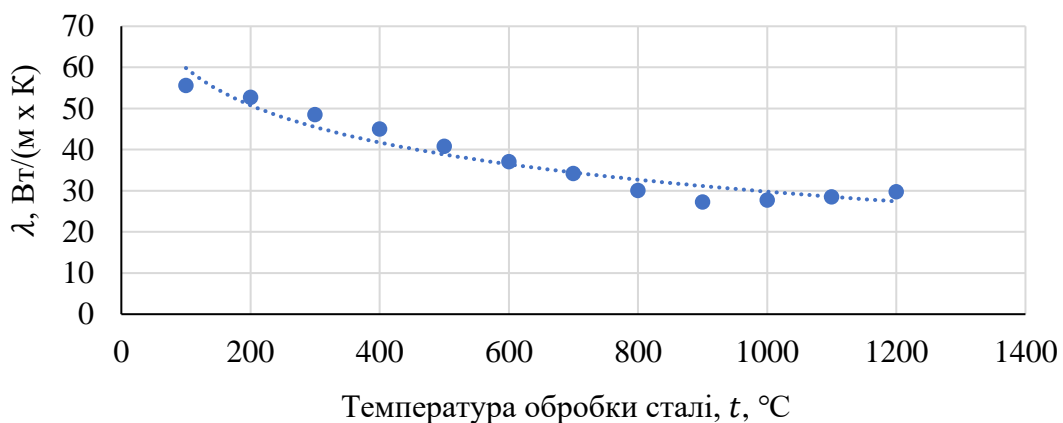


Рисунок 3.6 – Результати обробки даних по змінненню коефіцієнту теплопровідності  $\lambda$  від температури сталі  $t$

При розділенні даних, рис. 3.6, на два температурні діапазони, від 100  $^{\circ}\text{C}$  до 900  $^{\circ}\text{C}$ , та від 900  $^{\circ}\text{C}$  до 1200  $^{\circ}\text{C}$ , отримаємо наступні залежності, рис. 3.7.

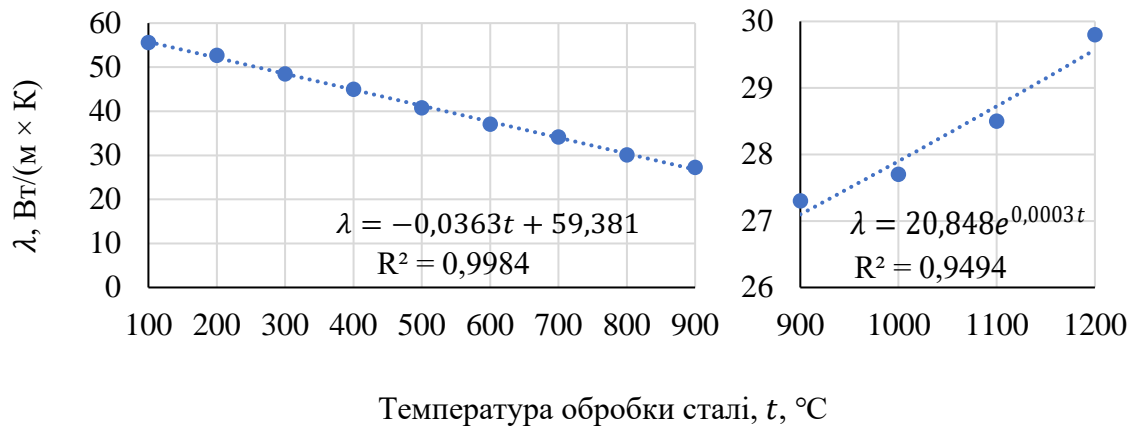


Рисунок 3.7 – Визначення залежності теплопровідності  $\lambda$  від температури  $t$ , по діапазонах

Коефіцієнт теплопровідності по діапазонам температур визначаємо наступним чином:

- при температурі обробки сталі від 100 °C до 900 °C

$$\lambda = -0,0363t + 59,381, \quad (3.40)$$

- при температурі обробки сталі >900 °C до 1200 °C

$$\lambda = 20,848e^{0,0003t} \quad (3.41)$$

Розрахунок завершують при досягненні часу входження штаби до осередку деформації.

Для забезпечення стійкого розрахунку по формулах (3.21), (3.24), (3.32) та мінімізації і накопичення похибки, слід задовільнити умови критерія Фур'є [135]:

$$Fo_{\Delta x} < \frac{1}{2}. \quad (3.42)$$

Розмір  $\Delta x$  вибирають довільно, однак бажано, щоб  $N$  було не менше ніж 10...15. Тоді для значення  $\Delta t$  повинна виконуватись вимога [135]:

$$\Delta t < \frac{1}{2} \cdot \frac{\Delta x^2}{a_m}. \quad (3.43)$$

Розрахунки температур по формулах (3.21), (3.24), (3.32) здійснюють при вибраному з умов (3.43) значенні  $\Delta t$ . З метою оптимізації виконують такі ж самі

розрахунки при значенні  $\Delta\tau' = \Delta\tau/2$  і виконують порівняння отриманих температур по всіх шарах з попередніми результатами. Якщо значення  $t_{i;j-1}$ ,  $t_{1;j-1}$ , та  $t_{N;j-1}$ , які розраховані при  $\Delta\tau$  та при  $\Delta\tau'$ , відрізняються менше ніж на 1 %, то розрахунки ведуть при останньому значенні  $\Delta\tau'$ ; якщо різниця більша ніж 1 % – розрахунки повторюють при новому значенні  $\Delta\tau'' = \Delta\tau'/2$ , потім проводять таке ж саме порівняння і так далі.

### 3.1.3 Реалізація моделі, оцінка впливу на результати розрахунку вдосконалення математичної моделі

При термомеханічній прокатці важливо мати розподіл температур, який не повинен перевищувати 25 °С по ширині, що на кінцевій стадії обробці сталі забезпечить мінімальну анізотропію механічних властивостей по ширині прокату.

Апробація розробленої математичної моделі з метою оцінки розподілу температур по ширині підкату після нагрівання, перед термомеханічною прокаткою на стані Стеккеля, виконана при наступних умовах:

- матеріал штаби – сталь категорії Х65 відповідно до вимог стандарту API-5L;
- розміри штаби: товщина –  $h_0 = 40$  мм, ширина –  $B_0 = 2B_{0n} = 1510$  мм;
- температура нагрівання штаби в пічній моталці  $t = 825$  °С;
- час між виходом штаби з пічної моталки до початку її прокатування становить 8 с.

Хімічний склад сталі, що використовувалась в дослідженні наведений в табл. 3.1.

Таблиця 3.1 – Хімічний склад сталі, що використовувалась в дослідженні

Марка сталі	Хімічний склад, %														
	C	Mn	Si	S	P	Al	Nb	V	Cu	Ni	Cr	Mo	Ti	N	B
X65	0,09	1,4	0,23	0,002	0,011	0,036	0,03	0,066	0,02	0,02	0,03	0,01	0,015	0,007	0,0005

Результати моделювання відповідають умовам рівняння (3.42).

Розмір  $\Delta\tau$  який використовується в моделі становить 0,00028 час, що задовольняє вимогам формули (3.43), по якій  $\Delta\tau$  повинно бути менше за 0,047 час.

Базовий розподіл температури штаби на половині ширини, після нагрівання в пічній моталці, який буде використовуватися для подальшого математичного моделювання, наведений в табл. 3.2.

Таблиця 3.2 – Базовий розподіл температури штаби на половині ширини після нагрівання в пічній моталці для термомеханічних режимів

Відстань від крайки до середини штаби, мм	75,5	151	226,5	302	377,5	453	528,5	604	679,5	755	792,75
Температура, °С	825	825	826	827	827	829	830	830	831	832	833

Результати моделювання наведені на рис. 3.8. Згідно з початковими умовами, розрахунок проводили для половини ширини штаби. Для візуалізації, результати розрахунку симетрично спроектовані на другу половину ширини.

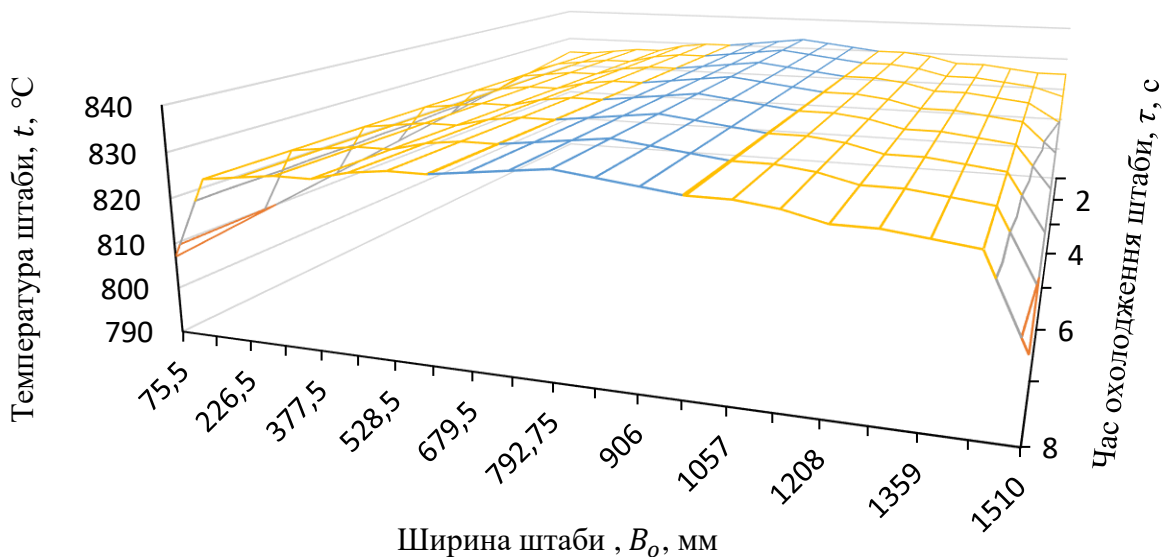


Рисунок 3.8 – Результати моделювання змінення температури штаби по режимах ТМСР

По результатах моделювання видно (див. рис. 3.8), що більш інтенсивне охолодження спостерігається на бокових крайках штаби.

Згідно з початковими умовами, після виходу штаби з пічної моталки, різниця між температурою в середині ширини штаби та на кромці становить 8 °С. Після моделювання змінення розподілу температур перед другим проходом (змінення

температури за проміжок часу між виходом з пічної моталки та входом в кліть для здійснення другого проходу), різниця між температурою в середині ширини штаби та на кромці збільшилась до  $25,8\text{ }^{\circ}\text{C}$ , що вже межує з допустимим рівнем у  $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Якщо продовжити моделювання змінення розподілу температури перед третім проходом, без врахування впливу змінення розподілу температур в пічній моталці, різниця між температурою в середині ширини штаби та на кромці ще збільшиться і складе  $44\text{ }^{\circ}\text{C}$ , що перевищує умови виконання термомеханічної прокатки, рис. 3.9.

Слід зазначити, що поточний технологічний регламент пічних моталок стану Стеккеля спрямований на забезпечення встановленого температурного режиму, без змінення розподілу температур по ширині. Також необхідно відмітити, що в процесі безпосередньої прокатки, через додатковий вплив охолодження валків та при контакті з валками збільшиться і без того велика різниця розподілу температури по ширині штаби.

Розподіл температур, який буде мати полоса перед третім проходом наведено на рис. 3.9.

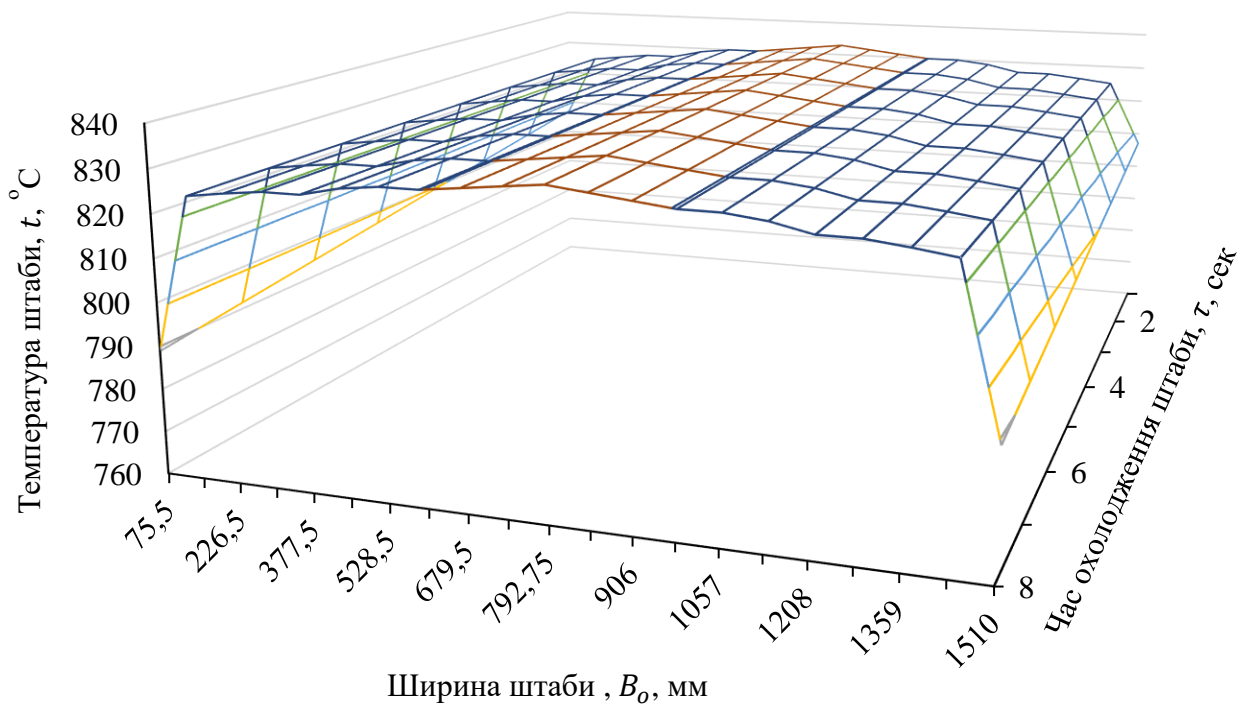


Рисунок 3.9 – Результати моделювання розподілу температури по ширині штаби перед третім проходом в стані Стеккеля



Для мінімізації впливу на механічні властивості штаби більш охолоджених бокових кромek, необхідно скорегувати режим нагрівання зі зміненням розподілу температур по перерізу пічної моталки, або встановити екранування бокових кромek між пічною моталкою та станом.

З метою окремої оцінки врахування конвекції виконано математичне моделювання температури штаби по ширині в проміжок часу між виходом з печі та началом прокатування в стані Стеккеля. Результати моделювання наведені на рис. 3.10.

Таким чином, в діапазоні температур, що досліджується ( $790\text{ }^{\circ}\text{C} - 830\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) та відповідають режимам чистової прокатки при ТМСР, втрати тепла конвекцією на крайці штаби, шириною 151 мм, становлять 93 %, тобто з загального зниження температури на крайці, яке становить  $17,93\text{ }^{\circ}\text{C}$ , зниження за рахунок конвекції становить  $16,72\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Ближче до центру штаби вплив конвекції суттєво зменшується та становить від 4,8 % до 0,11 %.

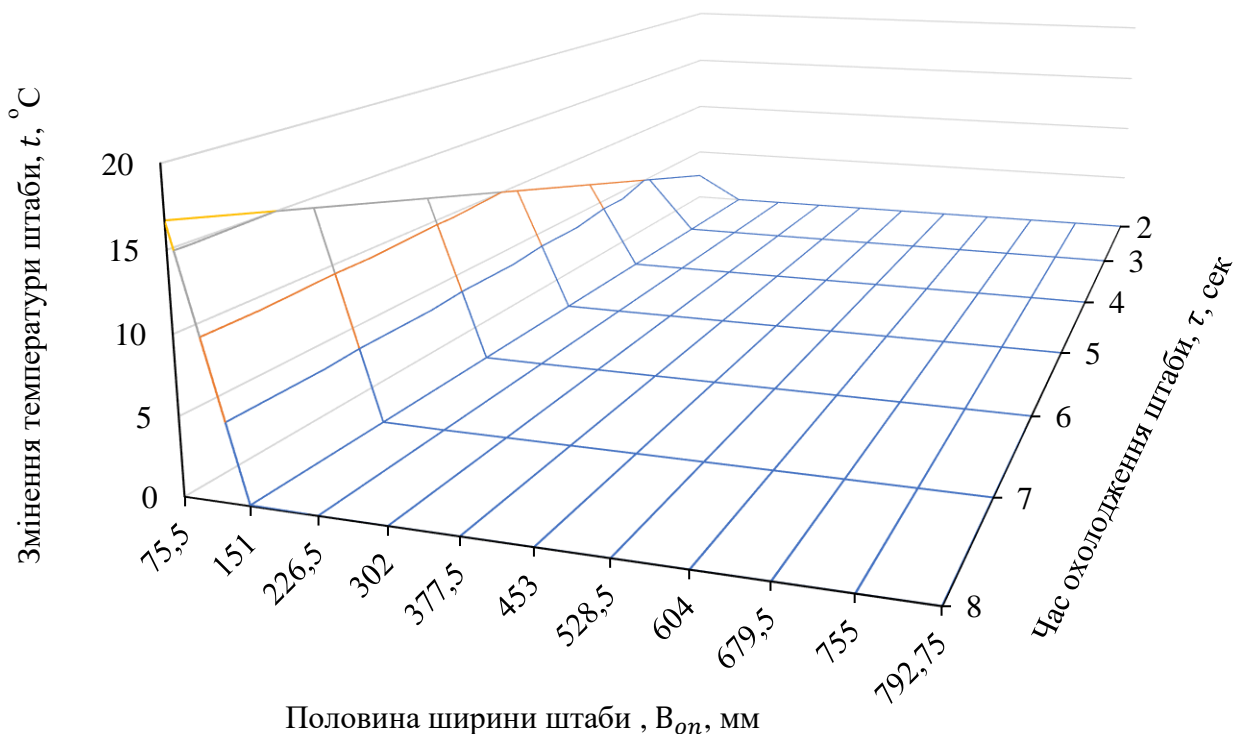


Рисунок 3.10 – Результати оцінки впливу конвекції при моделюванні температури штаби по режимах ТМСР

Для порівняння впливу конвекції при гарячій прокатці в діапазоні температур 1050 °С -1100 °С виконане моделювання при наступних первинних умовах:

- матеріал штаби – сталь категорії X65 відповідно до вимог стандарту API-5L;
- розміри штаби: товщина –  $h_0 = 40$  мм, ширина –  $B_0 = 2B_{0n} = 1400$  мм;
- температура нагрівання штаби в пічній моталці  $t = 1100$  °С;
- час між виходом штаби з пічної моталки до початку її прокатування становить 140 с.

Хімічний склад сталі, що використовувалась в дослідженні наведений в табл. 3.1.

Розмір  $\Delta t$  який використовується в моделі становить 0,039 час, що задовольняє вимогам формули (3.43), по якій  $\Delta t$  повинно бути менше за 0,13 час.

Базовий розподіл температури штаби на половині ширини після нагрівання в пічній моталці, який буде використовуватися для подальшого математичного моделювання, наведений в табл. 3.3.

Таблиця 3.3 – Базовий розподіл температури штаби на половині ширини після нагрівання в пічній моталці для режимів гарячої прокатки

Відстань від крайки до середини штаби, мм	50	100	150	200	250	300	350	400	450	500	550	600	650	700	725
Температура, °С	1090	1092	1094	1095	1096	1096	1098	1098	1098	1099	1100	1100	1100	1101	1103

Результати моделювання наведені на рис. 3.11.

По результатах моделювання видно, що так само як і при моделюванні по режимах ТМСР, при гарячекатаних режимах більш інтенсивне охолодження спостерігається на бокових крайках штаби.

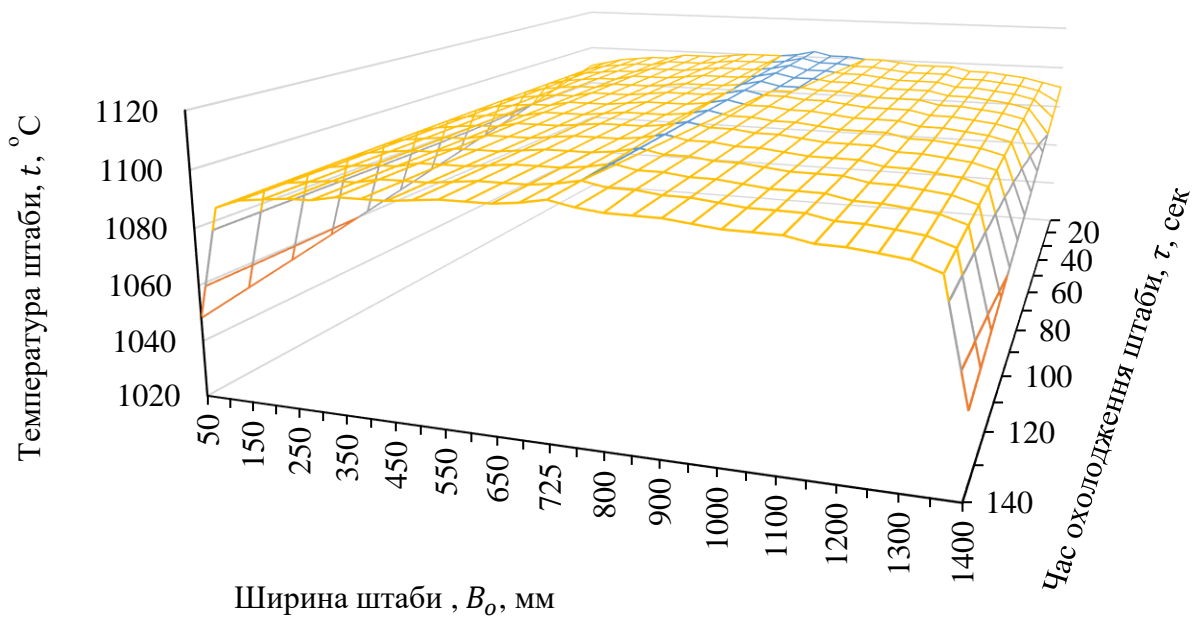


Рисунок 3.11 – Результати моделювання змінення температури штаби по гарячекатаних режимах

Результати оцінки впливу конвекції при моделюванні температури штаби по режимах гарячекатаної прокатки наведені на рис. 3.12.

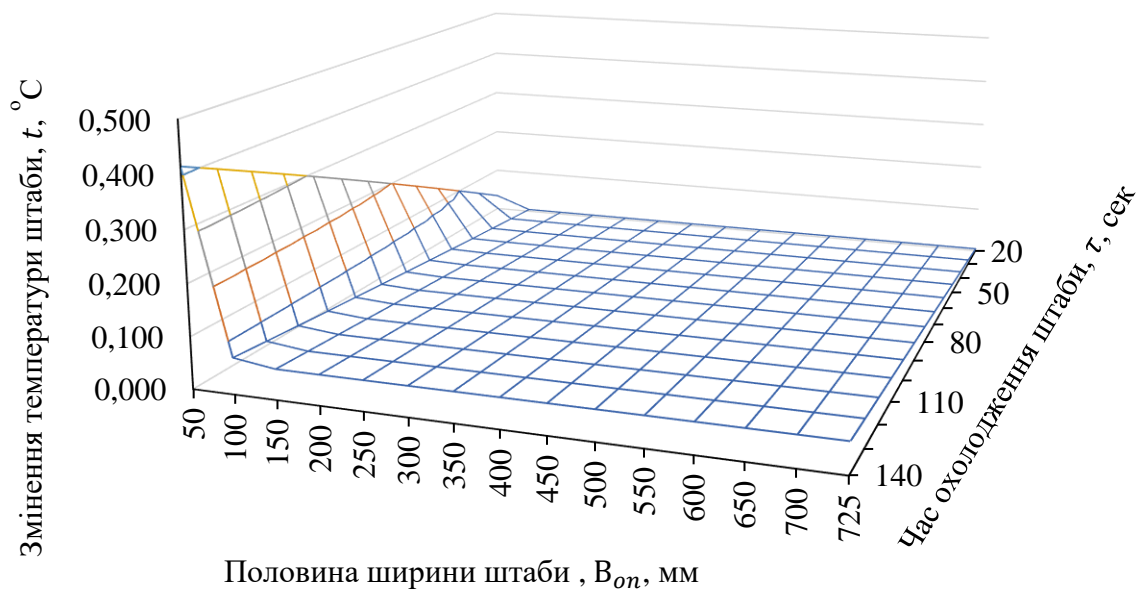


Рис. 3.12 – Результати оцінки впливу конвекції при моделюванні температури штаби по гарячекатаних режимах

Таким чином, в діапазоні температур, що досліджується (1050 °С–1100 °С), які відповідають гарячекатаним режимам, втрати тепла конвекцією на крайці штаби становлять лише 1 %, тобто з загального зниження температури на крайці, яке становить 41,69 °С, зниження за рахунок конвекції становить лише 0,42 °С. Відповідно до цього підтверджено необхідність враховувати вплив втрат тепла конвекцією при зниженні температури з 1100 °С до 800 °С.

При порівнянні температур на крайці штабі після третього проходу, розрахованих з врахування конвекції та без неї, які становлять 788 °С та 823 °С відповідно, різниця складе 4 %, що є похибкою між двома методами розрахунку та вказує на зниження похибки при розрахунку запропонованим методом.

По результатах виконаного дослідження, вдосконалено математичну модель зміни розподілу температурного поля штаби по ширині за рахунок врахування конвекційного теплового потоку.

Виконано оцінку впливу конвекції при моделюванні зміни розподілу температури штаби по ширині по режимах ТМСР, який на крайці шириною від 0 до 151 мм становить від 76 % до 93 %, тоді як по режимах гарячої прокатки, вплив конвекції становить лише 1%.

Встановлено, що більш інтенсивне охолодження спостерігається на бокових крайках штаби.

Запропоновано рішення для вирівнювання температури бокових крайок через корегування режиму нагріву в пічній моталці, шляхом регулювання роботи пічних пальників, що розташовані біля вхідного/вихідного вікна, або екранування прокату на рольгангах при прокатці.

Вдосконалену модель можливо використовувати для розрахунків зміни розподілу температури плоского прокату, який виробляється по режимах гарячої прокатки, термомеханічної прокатки та її різноманітних варіантів реалізації (високо температурної та низько температурної), а також нормалізувальної прокатки.

## 3.2 Апроксимація діаграм рекристалізації для прогнозування механічних властивостей в залежності від температурно-деформаційних умов прокатки

### 3.2.1 Використання програмного забезпечення для розробки технології термомеханічної прокатки

Рекристалізація є розповсюдженим процесом, який формує структуру металів та сплавів, а, відповідно, і їх структурно чутливі механічні та фізичні властивості [220]. Керування процесом рекристалізації дозволяє отримувати необхідний розмір аустенітного зерна та, відповідно, успадкованого зерна фериту, необхідні механічні властивості.

Для прогнозування механічних властивостей прокату в залежності від розміру зерна поширено використовуються залежності Холла-Петча. Відомо, що середня площа зерна  $S$  залежить від температури  $t$  та ступеню деформації  $e$ , тобто:  $S = f(t, \varepsilon)$  [208]. Знаючи площу  $S$  зерна, можна розрахувати його діаметр:  $D = \sqrt{4 \cdot S / \pi}$ . Співвідношення Холла-Петча для розрахунку опору деформації  $\sigma_T$  та твердості по Віккерсу  $HV$  мають наступний вигляд [135, 208]:

$$\sigma_T = \sigma_0 + k / \sqrt{D}; \quad (3.44)$$

$$HV = HV_0 + K / \sqrt{D}, \quad (3.45)$$

де  $\sigma_0$  – напруження, яке характеризує опір пластичної деформації з боку кристалічної решітки, МПа;  $k$  – коефіцієнт, який характеризує внесок в зміцнення з боку границь зерен;  $HV_0$  – твердість монокристалу по Віккерсу;  $K$  – коефіцієнт, який характеризує твердість монокристалу.

На підставі запропонованих методів інтерполяції, додаток Е, автором роботи [135, 208] розроблено програмне забезпечення в пакеті Borland C ++ Builder 4 (програма «Recrystallization»), для розрахунку та визначення необхідного ступеня деформації при чорновій прокатці низьковуглецевих марок сталі, яке використано при розробці технології ТМСР. По-кроковий розрахунок та визначення ступеня деформації за допомогою програмного забезпечення наведено нижче [135, 208].

При натисканні на заставку програми відкривається вкладка «Вихідні дані», рис. 3.13 [135, 208]. У лівій частині вікна наведено приклад типової діаграми рекристалізації низьковуглецевої сталі, а в правій частині вікна - таблиця даних діаграми.

Для введення і редагування вихідних даних використовують панель навігації, розташовану в правому нижньому кутку вікна. Для розрахунку розміру зерна натискають кнопку «Перейти до розрахунку розміру зерна», яка розташована під таблицею вихідних даних [135, 208].

Вкладка «Розрахунок розміру зерна» представлена на рис. 3.14 [135, 208]. Як приклад задаємо дані діаграми рекристалізації по рис. 3.13 і виконуємо їх аналіз для температури рекристалізації 1000 °С. Користувач може вибрати один або всі види інтерполяції. При температурі 1000 °С діаграму рекристалізації, рис. 3.14, можна умовно розбити на 4 ділянки: 1) при ступені деформації від 0 до 10 % - лінійна ділянка, що характеризується інтенсивним пропорційним зменшенням площі зерна; 2) при ступені деформації від 10 до 20 % - ділянка з менш інтенсивним зменшенням площі зерна; 3) при ступені деформації від 20 до 70 % - майже лінійна ділянка яка характеризується постійною площею зерна; 4) при ступеня деформації від 70 до 80 % - ділянка з логарифмічною залежністю.

Найбільш точною, в нашому випадку, є лінійна та квадратична інтерполяція, тому, що при заданій кількості ділянок розбиття заміна відрізків кривої прямолінійними сполученими ділянками та квадратичною функцією дає ламану, близьку до передбачуваної кривої. При ступені деформації  $\varepsilon=10-20\%$  спостерігається менш інтенсивне зменшення площі зерна, після чого, при подальшому підвищенні ступеня деформації, зерно залишається майже однаковим, тому спостерігається невелика осциляція при інтерполяції кубічними сплайнами в межах  $\varepsilon=8-20\%$ , а при глобальній інтерполяції – на ділянці  $\varepsilon = 70-80\%$ .

В результаті розрахунків при  $t = 1000\text{ °С}$  та  $\varepsilon = 15\%$  маємо: середню площу зерна  $S = 11550\text{ мкм}^2$ , діаметр зерна  $D = 121,27\text{ мкм}$ , рис. 3.14. Аналогічний аналіз можна провести для будь якої температури та ступеня деформації, в межах,

позначених діаграмою. Наприклад, при  $\varepsilon = 15 \%$  розраховували площу та діаметр зерна для інших температур:

– при  $t = 800 \text{ }^\circ\text{C}$  –  $S = 2600 \text{ мкм}^2$ ,  $D = 57,54 \text{ мкм}$ ;

– при  $t = 850 \text{ }^\circ\text{C}$  –  $S = 4800 \text{ мкм}^2$ ,  $D = 78,18 \text{ мкм}$ ;

– при  $t = 900 \text{ }^\circ\text{C}$  –  $S = 10000 \text{ мкм}^2$ ,  $D = 112,84 \text{ мкм}$ ;

– при  $t = 1100 \text{ }^\circ\text{C}$  –  $S = 13000 \text{ мкм}^2$ ,  $D = 128,66 \text{ мкм}$ .

Таким чином, при ступені деформації  $\varepsilon = 15 \%$  зі збільшенням температури збільшуються розміри зерна аустеніту. Також деформація у  $15 \%$  при температурі  $1000 \text{ }^\circ\text{C}$  забезпечує наближення розміру зерна до мінімального, яке можна отримати при деформації у  $20 \%$ . При користуванні отриманими даними, для розробки технології, слід враховувати змінення виду діаграм рекристалізації при різних температурах, щоб уникнути меж обтиснення з інтенсивним збільшенням площі зерна.

Вкладка «Діаграми рекристалізації», рис. 3.15, містить побудовані діаграми рекристалізації для визначення середнього розміру ( $S$ ) та діаметру зерна ( $D$ ) при різноманітних температурах ( $t$ ) і ступенях деформації ( $\varepsilon$ ) [135, 208]. Користувач може відображати криві на вибір та оцінювати діапазон змінення розмірів зерна [135, 208].

Вкладка «Розрахунок міцності та твердості», рис. 3.16, містить розрахунок границі плинності ( $G_T = \sigma_T$ ) та твердості по Віккерсу ( $HV$ ) при заданому діаметрі зерна ( $D$ ). На вкладці відображується діаметр зерна, попередньо розрахований при заданих  $t$  та  $\varepsilon$  на вкладці «Розрахунок розміру зерна», рис. 3.14. Для розрахунку границі плинності (в нашому випадку це опір деформації)  $G_T$  по формулі Холла-Петча необхідно натиснути на кнопку «Розрахунок по формулі Холла-Петча». У формі, що з'явилась задають константи:  $G_0 = \sigma_0$  та  $K = k$ , після того натискають кнопку «Перейти до розрахунку». Для розрахунку твердості ( $HV$ ) по формулі Холла-Петча задають константи:  $HV_0 = HV_0$  та  $K$ , після того натискають кнопку «Перейти до розрахунку» [135, 208].

При діаметрі зерна  $D = 121,27 \text{ мкм}$  ( $t = 1000 \text{ }^\circ\text{C}$  та  $e = 15 \%$ ) і константах, опір деформації дорівнює  $G_T = 64,086 \text{ МПа}$ , а твердість по Віккерсу –  $HV = 38$ , рис. 3.16.

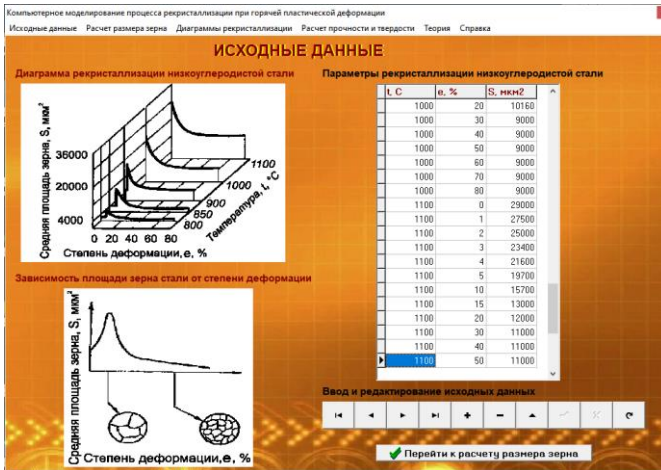


Рисунок 3.13 – Вкладка «Вихідні дані» [135, 208]

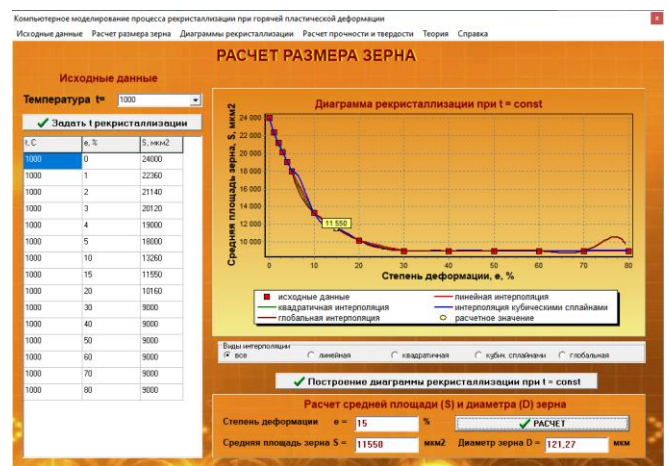


Рисунок 3.14 – Вкладка «Розрахунок розміру зерна», побудова діаграми рекристалізації при  $t = 1000\text{ }^{\circ}\text{C}$  та розрахунок розміру зерна при  $\epsilon = 15\text{ }%$

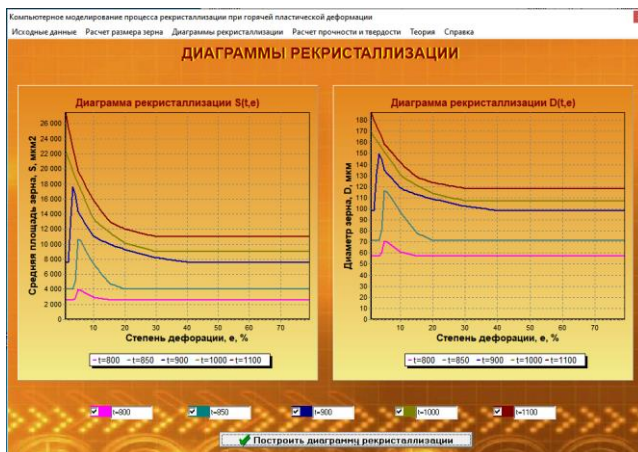


Рисунок 3.15 – Вкладка «Діаграми рекристалізації» [135, 208]

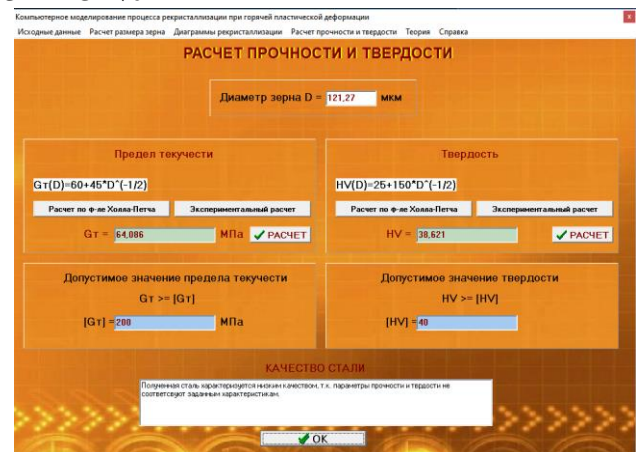


Рисунок 3.16 – Вкладка «Розрахунок міцності та твердості», розрахунок  $G_T$  и  $HV$  при діаметрі зерна  $D = 121,27$  мкм з використанням формули Холла-Петча

Порівняння отриманих значень з мінімально допустимими ( $[G_T] = 200$  МПа і  $[HV] = 40$ ) для низьковуглецевих марок сталі та виконанням співвідношення:  $G_T \geq [G_T]$  и  $HV \geq [H_V]$ , в даному випадку, користуватися не треба, так як отримані параметри стосуються тільки проміжного етапу чорнової стадії термомеханічної прокатки.

При наявності дослідних даних по діаметру зерна та механічних властивостях



прокату, їх можна обробити скориставшись кнопкою «Експериментальний розрахунок». Користувач може самостійно вибирати тип апроксимуючої залежності для експериментальних даних, а може, натисненням кнопки «Найкраща апроксимація», вибрати апроксимуючу залежність, для якої величина середньоквадратичної помилки  $\Delta$  є мінімальною [135, 208].

Як приклад, проведено апроксимацію дослідних даних [204, 221] для мікролегованої сталі категорії міцності X65 при температурі 1050 °С, та отримали наступні залежності, за допомогою розробленого програмного забезпечення [135, 208]:

– лінійна апроксимація:

$$G_T = -0,593D + 113,559; \Delta = 0,7282; \quad (3.61)$$

– квадратична апроксимація:

$$G_T = 0,008D^2 - 1,203D + 124,448; \Delta = 0,4956; \quad (3.62)$$

– кубічна апроксимація:

$$G_T = 0,001D^3 - 0,12D^2 + 3,404D + 70,846; \Delta = 0,3893; \quad (3.63)$$

– експоненціальна апроксимація:

$$G_T = 1,575 \cdot \exp(0,121D); \Delta = 258,8828; \quad (3.64)$$

– ступенева апроксимація:

$$G_T = 1,061D^{1,312}; \Delta = 52,7802; \quad (3.65)$$

Таким чином, в результаті проведених розрахунків отримано, що найкращою апроксимуючою моделлю, для вказаного прикладу, є кубічна залежність, так як для неї величина середньоквадратичної помилки мінімальна та становить  $\Delta = 0,3893$ .

Для економії часу можна скористатися кнопкою «Найкраща апроксимація» і програма автоматично вибере найкращу апроксимуючу залежність з переліку запропонованих [135, 208].

Розроблене [135, 208] програмне забезпечення успішно використано для обробки та аналізу даних при розробці режимів термомеханічної прокатки.

### 3.2.2 Дослідження процесів рекристалізації в умовах термомеханічного процесу прокатки низьколегованих маловуглецевих марок сталі

Низьколеговані, або мікролеговані маловуглецеві марки сталі широко використовуються в технології термомеханічної прокатки завдяки тому, що мають в своєму складі особливий набір хімічних елементів. Сучасний комплекс мікролегуєчих елементів складають такі як Nb, V, Ti, Mo, Cu, Ni, Cr, B. Мікролеговані елементи, що додаються, мають комплексний вплив на властивості сталей починаючи з процесу аустенізації, тобто нагрівання перед прокаткою, деформації та впродовж всього процесу прокатки, а також після її завершення, коли остаточно формуються механічні властивості готового продукту.

Для використання всіх можливостей мікролегованих сталей в процесі прокатки дуже важливими є дослідження процесу їх рекристалізації до початку її гальмування. Збільшена деформація в період між процесом аустенізації та початком гальмування рекристалізації забезпечує отримання більш дрібного зерна аустеніту, та відповідно, успадкованого зерна фериту. Таке технічне рішення дозволяє мати необхідний комплекс властивостей міцності та пластичності, а особливо частку в'язкої складової при ударних випробуваннях на рівні не менш ніж 95 %, в залежності від категорії міцності сталі.

Визначення температури початку гальмування рекристалізації здійснюється по відомій залежності автора [222]:

$$T_{95\%}(\text{°C}) = 887 + 464C - 357Si + 363Al + 890Ti + (6645Nb - 664\sqrt{Nb}) + (732V - 230\sqrt{V}) \quad (3.66)$$

В даному розділі виконали обробку результатів досліджень автора роботи [204] по визначенню розміру зерна аустеніту в процесі рекристалізації сталі марки 06Г2БД (Х65), що були проведені на зразках товщиною 20-29 мм.

Хімічний склад дослідної марки сталі [204] та результати розрахунку температури початку гальмування рекристалізації наведені в табл. 3.4.

Таблиця 3.4 – Хімічний склад сталі, яка використовувалась в дослідженні [204]

Марка сталі	Хімічний склад, %										T <sub>95%</sub> , °C
	C	Mn	Si	S	P	Al	Nb	Cu	Mo	N	
06Г2ДБ (Х65)	0,055	1,50	0,35	0,002	0,01	0,026	0,034	0,21	0,010	0,0057	900,5

Температура нагрівання перед прокаткою таких марок сталі становить в межах від 1150 °C до 1180 °C. Тобто в інтервалі температур від 900 °C, табл. 3.4, до 1150 °C, при прокатці повинна відбуватися інтенсивна деформація, з метою отримання якомога більш дрібного розміру зерна аустеніту. Щоб встановити нижню межу деформації, яка забезпечує зменшення аустенітного зерна, необхідно отримати залежність на підставі відповідних дослідних даних.

В результаті обробки даних, отриманих автором роботи [204] по розміру зерна аустеніту при температурі 1050 °C, з різними ступенями деформації, рис. 3.17, отримана залежність площі зерна аустеніту від ступеня деформації (3.67) та діаметру зерна аустеніту від ступеня деформації, рис. 3.18, залежність (3.68).

Для порівняння результатів обробки даних [204] (див. рис. 3.17), наведений відомий графік авторів роботи [200], рис. 3.19.

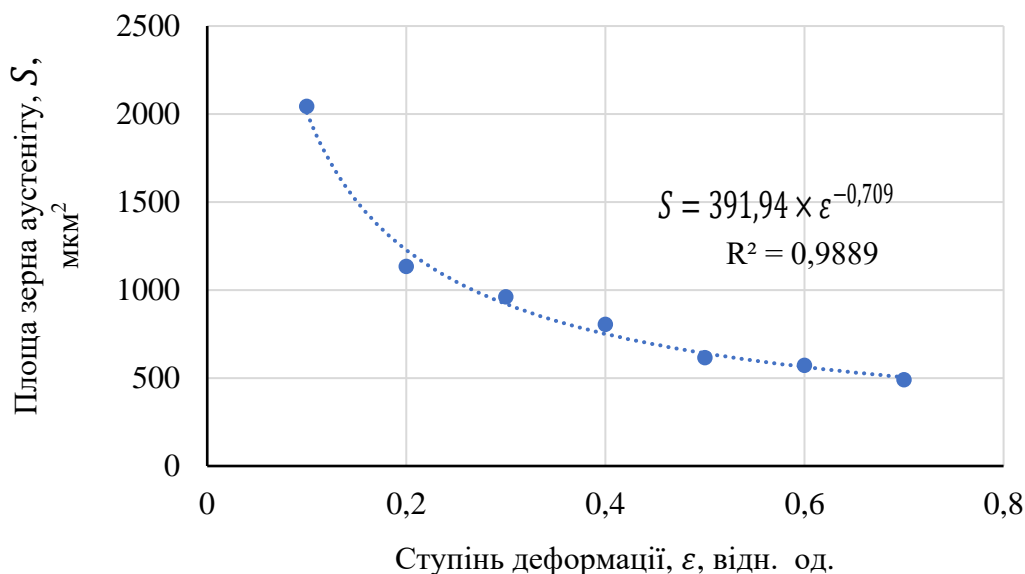


Рисунок 3.17 – Залежність площі зерна аустеніту від ступеня деформації сталі марки 06Г2ДБ (Х65)

$$S = 391,94 \times \varepsilon^{-0,709}, \quad (3.67)$$

де  $\varepsilon$  – ступінь деформації, відн. од.

$$D = 22,339 \times \varepsilon^{-0,355}. \quad (3.68)$$

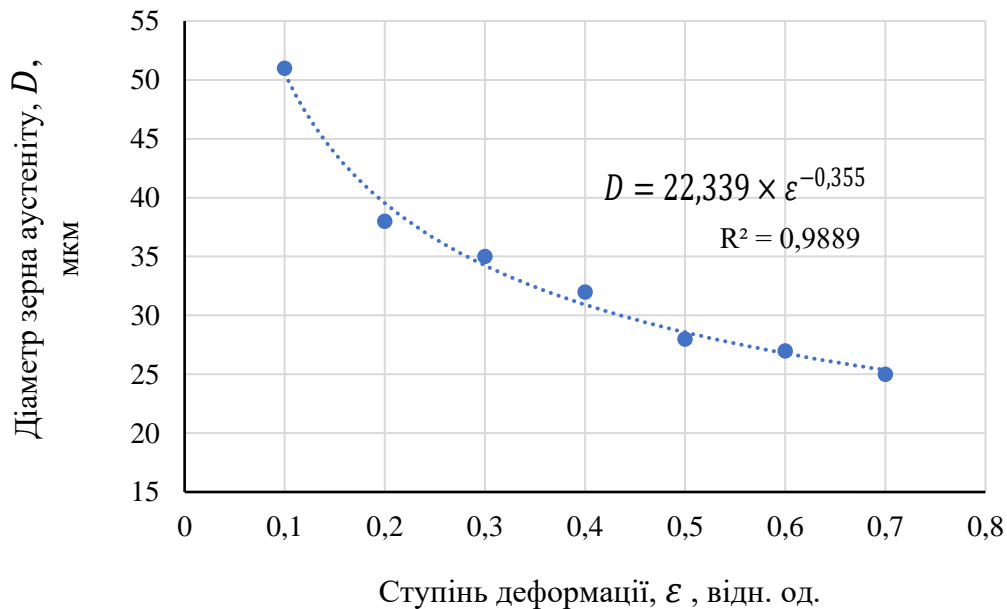


Рисунок 3.18 – Залежність діаметру зерна аустеніту від ступеня деформації сталі марки 06Г2ДБ (Х65)

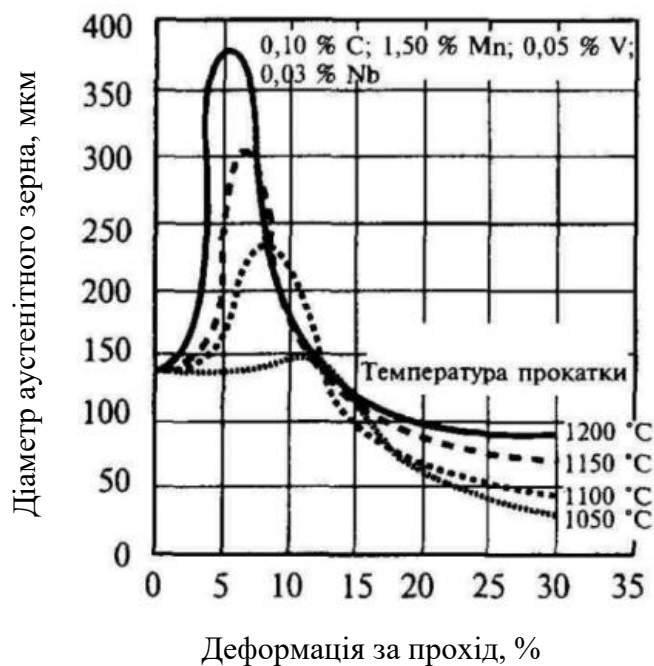


Рисунок 3.19 – Розмір рекристалізованого зерна аустеніту при чорновій прокатці мікролегованої сталі [200]

Слід зазначити схожість динаміки змінення діаметру зерна аустеніту на обох рисунках при порівняних температурах (рис. 3.18 та рис. 3.19). Різниця у розмірі зерна при однакових деформаціях може бути пов'язана з різним хімічним складом сталі та різними температурами аустенізації.

Для встановлення залежності опору деформації від діаметру зерна аустеніту необхідні дані по відповідним механічним випробуванням. Нажаль, автор роботи [204] такі дослідження не проводив. Замість цього, використані дані роботи [223, 224], по результатах високотемпературних пластометричних досліджень сталі категорії міцності X70, що є найбільш наближеною до марки 06Г2ДБ (X65). Хімічний склад сталі категорії міцності X70, що була досліджена, наведений в табл. 3.5.

Таблиця 3.5 – Хімічний склад сталі категорії міцності X70, що досліджена пластометричним методом

Марка сталі	Хімічний склад, %											
	C	Mn	Si	S	P	Al	Ti	Mo	Nb	V	N	B
X70	0,1	1,68	0,25	0,005	0,011	0,036	0,02	0,01	0,048	0,078	0,005	0,001

Для розрахунку опору деформації, на підставі дослідних даних [223], була отримана наступна залежність [224]:

$$\sigma_{t(X70)} = 3661,2 \exp(-0,0047t) \times (0,1126 \ln(\varepsilon) + 0,9543) \times (2,1583u^{0,126}) \times (0,1344 \exp^{0,0021t}), \quad (3.69)$$

де  $t$  – температура деформації, °C;  $\varepsilon$  – ступінь деформації, %;  $u$  – швидкість деформації,  $s^{-1}$ .

Залежність (3.69) вдосконалена в порівнянні з попередньою формулою уточненням впливу властивостей, що успадковані з попередніх процесів обробки металу (аустенізація, природне та примусове охолодження перед прокаткою), як фактор спадковості  $K_n$ , що виражений в формулі як множник  $(0,1344 \exp^{0,0021t})$ . Використання цієї формули в порівнянні з [223] дозволяє знизити похибку при розрахунку опору деформації з 9 % до 7,4 %.

Відповідно до умов, при яких було отримано розміри зерна аустеніту [204], рис. 3.17, на підставі залежності (3.69), виконано розрахунок опору деформації, результати наведені в табл. 3.6.

Показники в формулі Холла-Петча (3.44) [225, 226]  $\sigma_0$  та  $k$ , звичайним методом визначаються з залежності між показником механічних випробувань, в нашому випадку це опір деформації  $\sigma_t = \sigma_T$ , та розміром зерна  $\frac{1}{\sqrt{D}}$ . При чому,  $\sigma_0$  визначається з екстраполяції прямолінійної залежності  $\sigma_t$  до значення  $\frac{1}{\sqrt{D}}=0$ , що відповідає нескінченно великому розміру зерна. Коефіцієнт  $k$  визначається як тангенс кута нахилу лінійної залежності між  $\sigma_t$  та  $\frac{1}{\sqrt{D}}$  [225, 226].

Таблиця 3.6 – Дослідні дані та розрахунок опору деформації

t, °C	$\varepsilon$ , відн. од.	D, мкм	$\frac{1}{\sqrt{D}}$	S, мкм <sup>2</sup>	u, с-1	$\sigma_t$ , МПа
1050	0,1	51	0,14	2042,825	1	84,06
1050	0,2	38	0,16	1134,118	1	89,46
1050	0,3	35	0,17	962,115	1	92,63
1050	0,4	32	0,18	804,250	1	94,87
1050	0,5	28	0,19	615,754	1	96,61
1050	0,6	27	0,19	572,557	1	98,03
1050	0,7	25	0,20	490,875	1	99,23

Для розрахунку показників  $\sigma_0$  та  $k$  для дослідної сталі марки 06Г2ДБ (Х65), виконано обробку даних, табл. 3.6, результати якої наведені на рис. 3.20.

Таким чином, показник  $\sigma_0$  становить 48,383 МПа, показник  $k$  становить 257,19 МПа  $\times$  мкм<sup>-1/2</sup>.

На підставі отриманих показників виконано розрахунок опору деформації по формулі Холла-Петча по всьому діапазону досліджених даних. Результати наведені на рис. 3.21.

Залежність опору деформації сталі марки 06Г2ДБ (Х65), розрахованої по формулі Холла-Петча від діаметру зерна аустеніту має наступний вигляд:

$$\sigma_t = -0,5869D + 113,34. \quad (3.70)$$

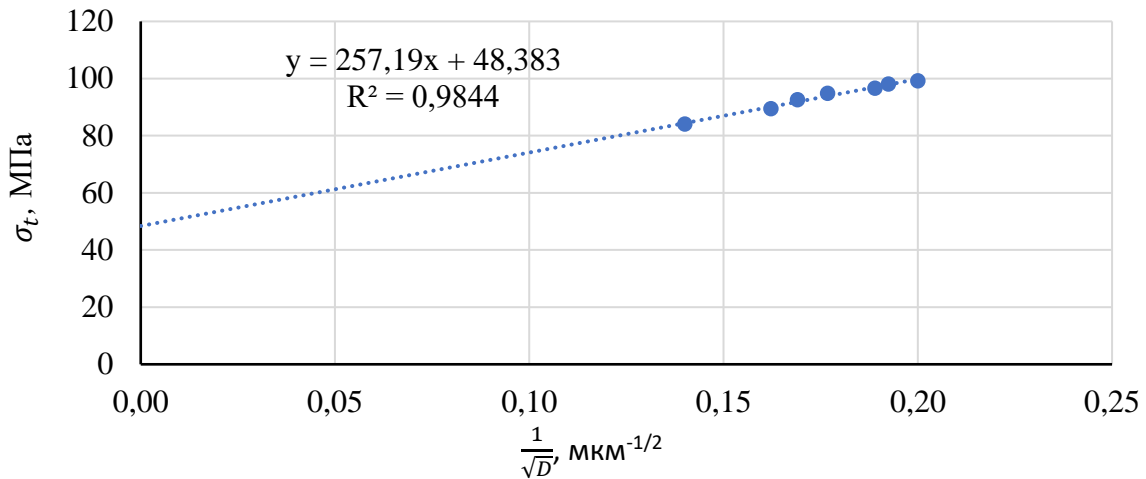


Рисунок 3.20 – Залежність  $\sigma_t$  від  $\frac{1}{\sqrt{D}}$  для розрахунку показників  $\sigma_0$  та  $k$ , які використовуються в формулі Холла-Петча

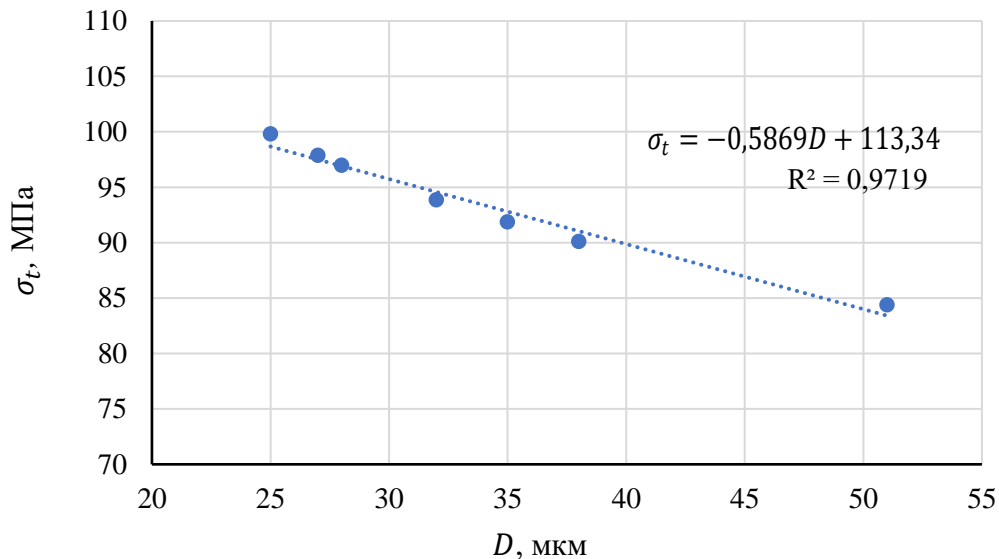


Рисунок 3.21 – Залежність  $\sigma_t$ , розрахованої по формулі Холла-Петча від діаметру зерна аустеніту

Таким чином, для розрахунку опору деформації сталі марки 06Г2ДБ (Х65) може бути використане співвідношення Холла-Петча (3.44) з відповідними отриманими показниками  $\sigma_0$  та  $k$ , або залежність (3.70).

На підставі отриманих результатів можна зазначити, що найбільш інтенсивне зменшення розміру зерна аустеніту, при чорновій прокатці, відбувається при деформації від 10 % до 20 %, тобто з 51 мкм до 38 мкм, що становить 50 %. При подальшому збільшенні деформації інтенсивність зменшення зерна знижується.

Деформація від 20 % до 70 % зменшує зерно аустеніту лише з 38 мкм до 25 мкм, що сумарно також становить 50 %.

З метою отримання якомога більш дрібного розміру зерна аустеніту при чорновій прокатці мікролегованих марок сталі, зокрема сталі марки 06Г2ДБ (Х65), ступінь деформації за прохід повинен бути близьким до 20 %, або більшим. В більш ранніх дослідженнях [200] вважалося, що при схожих умовах (температура деформації 1050 °С) для зменшення зерна аустеніту достатньо деформації у 10 %.

Підвищена деформація повинна здійснюватися від початку чорнової прокатки до температури гальмування рекристалізації, для сталі марки 06Г2ДБ (Х65) ця температура становить 900,5 °С, що забезпечує ефективне зменшення розміру зерна. Виключенням є стадія прокатки з розбивкою ширини або довжини, при яких обмеженням може бути максимальний кут захоплення, потужність та обертаючий момент головного двигуна прокатного стану.

Слід зазначити, що в залежності від розмірів заготовки та марки сталі, при чорновій прокатці, товстолистовий стан 3600 «МК «АЗОВСТАЛЬ» забезпечує ступінь деформації до 30 %, а стан 3000 «ММК ІМЕНІ ІЛЛІЧА» до 40 %. Широкоштабовий стан 1700 «ММК ІМЕНІ ІЛЛІЧА» та стан 1680 МК «Запоріжсталь» дозволяють виконувати деформацію до 20-30 %. Таким чином, технічні можливості вітчизняних станів забезпечують дотримання підвищених умов деформації, що дозволяє розробляти технологію та виробляти продукцію, яка відповідає сучасним технологічним тенденціям та вимогам з якості.

## **Висновки**

1. Урахування впливу конвекційного теплового потоку дозволяє визначати нерівномірність розподілу температур, яке отримує штаба при проміжному охолодженні на рольгангу в умовах термомеханічного процесу прокатки. Результати розрахунків є основою для проектування технології підтримання температури смуги в пічних моталках станів Стеккеля для умов ТМСР процесу.



2. Встановлено, що для умов здійснення чистової термомеханічної прокатки, вплив конвекції на змінення температурного поля на крайці штаби шириною до 151 мм становить від 76 % до 93 %. Ближче до центру штаби вплив конвекції на змінення температури суттєво зменшується та становить від 4,8 % до 0,11 %. Для режимів гарячої прокатки вплив конвекції на змінення температурного поля на крайці становить лише 1 %.

3. Встановлено, що після охолодження штаби на рольгангу впродовж трьох чистових проходів, в температурному діапазоні процесу ТМСР, різниця між температурою центральної частини штаби та крайкою збільшується з початкових 8 °С до 44 °С, що перевищують прийняті для ТМСР початкові умови перепаду в 25 °С перед прискореним охолодженням. Запропоновано, для вирівнювання температури бокових крайок, корегування режиму нагрівання в пічній моталці стану Стеккеля шляхом регулювання роботи пічних пальників, що розташовані біля вхідного/вихідного вікна

4. Встановлено, що ступінь деформацій при чорновій прокатці має суттєвий вплив на розмір зерна аустеніту, що визначає такі успадковані механічні властивості як межа плинності, тимчасовий опір, енергія удару, доля в'язкої складової. Зокрема встановлено, що найбільш інтенсивне зменшення розміру зерна аустеніту сталей категорії міцності Х65 при температурі 1050 °С, яка передує температурі початку гальмування рекристалізації, відбувається при деформації від 10 % до 20 %, тобто з 51 мкм до 38 мкм, що становить 50 % в загальнодослідженому діапазоні. Подальше збільшення деформації з 20 % до 70 % є менш ефективним так як зменшує зерно аустеніту лише з 38 мкм до 25 мкм, що сумарно також становить 50 % в загальнодослідженому діапазоні.

5. Встановлено, що з метою отримання якомога більш дрібного розміру зерна аустеніту, при чорновій прокатці мікролегованих марок сталі категорії міцності Х65 та подальшого успадкованого зерна фериту, ступінь деформації за прохід повинен бути  $\geq 20$  %, раніше вважалось, що достатнім є ступінь деформації у 10 %.

## РОЗДІЛ 4

### ДОСЛІДЖЕННЯ СИЛОВИХ ПРОЦЕСІВ ПРОКАТКИ МЕТОДАМИ ФІЗИЧНОГО МОДЕЛЮВАННЯ

#### 4.1 Проведення експерименту, обробка експериментальних даних

Фізичне моделювання, як один із способів дослідження процесів прокатки, дозволяє в лабораторних умовах отримати дані по процесах, які в реальних умовах поточного виробництва є неможливими або потребують суттєвих витрат.

Серед таких трудомістких досліджень можна розглядати процеси, які відбуваються при чорновій гарячій прокатці сталі. Важливим етапом, який супроводжує фізичне моделювання є дослідження, пов'язані з пошуком матеріалу-аналога, властивості якого повинні відображувати властивості дослідної сталі.

Метою даного дослідження є пошук умов та марок сталі, властивостям яких відповідає свинець, як матеріал-аналог, для використання його в подальшому фізичному моделюванні. Характеристики лабораторного устаткування для дослідження реологічних властивостей свинцю, умови експерименту, розміри та кількість зразків наведено в пункті 2.3.

Результати розрахунку середньої сили стиснення для кожного із зразків наведено в табл. 4.1.

Таблиця 4.1 – Сила стиснення по підходах та результати розрахунку середньої сили стиснення зразків

Номер зразка	Сила стиснення, Н					
	$P_1$	$P_2$	$P_3$	$P_4$	$P_5$	$P_{\bar{x}}$
1	6410	6390	6380	6420	6400	6400
2	7190	7210	7180	7200	7220	7200
3	7600	7580	7620	7610	7590	7600
4	7700	7690	7680	7670	7660	7680
5	8460	8470	8500	8480	8490	8480
6	9304	9294	9284	9264	9274	9284
7	9890	9870	9860	9900	9880	9880
8	10740	10700	10710	10720	10730	10720
9	11540	11560	11570	11580	11550	11560

Результати розрахунку допусків по зразках наведено в табл. 4.2.

Таблиця 4.2 – Результати розрахунку допусків по зразках

Номер зразка	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$\Delta P$	200	200	200	200	200	200	200	200	200

Обробку результатів експерименту виконано по методиці [212, 213], яку наведено в додатку Є.

Результати обробки експерименту та відповідні розрахунки по зразках зведені в табл. 4.3.

Результатом обробки експериментальних даних є отримання істинного опору деформації, який виконували по п'яти різних методиках [212, 213], у тому числі по методиці С.І. Губкіна, Е. Зибеля; по методиці А.Ф. Головіна; по методиці Е.Л. Ункова; по методиці К. Рейшетера та по методиці Липмана, для встановлення задовільного результату розрахунків.

Результати розрахунків по формулах (Є.21) та (Є.22) є близькими, а умови їх використання відповідають (ступінь деформації не перевищує 0,6-0,8 відн. од.) умовам проведення експерименту. Розрахунок по формулі (Є.24) дав трохи вищі результати, а її використання рекомендовано у випадках великого обтиснення із значним утворенням бочки. У використаній формулі (Є.26) закладено коефіцієнт тертя 0,5, який перевищує розрахований в межах експерименту та дорівнює 0,18. Розрахунки по формулах (Є.23) та (Є.26) мають порівняльно нижчі результати.

Таким чином, для подальшого дослідження будемо використовувати результати розрахунків істинного опору деформації по формулі (Є.21).

Таблиця 4.3 – Результати розрахунків по експерименту зі стиснення зразків

СВИНЦЮ

Найменування параметру	№ зразку / результати розрахунків								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Початковий діаметр зразків, $D_0$ , мм	19,5	19,5	19,5	19,5	19,5	19,5	19,5	19,5	19,5
Початкова висота зразків, $H_0$ , мм	21,3	23	25	28	31	34,9	38	40	42
Кінцева висота, $H_k$ , мм.	19,5	19,5	19,2	19,2	19,3	19,4	19,9	19,5	19
Ступінь деформації, $\varepsilon$ , відн. од.	0,0845	0,1521	0,232	0,3142	0,3774	0,4441	0,4763	0,5125	0,54
Ступінь деформації $ln, e$ , відн. од.	0,0882	0,1650	0,2639	0,3772	0,4738	0,5872	0,6468	0,7184	0,79
Середня сила стиснення, $P_{\bar{x}}$ , Н	6400	7200	7600	7680	8480	9284	9880	10720	11560
Коефіцієнт тертя, $f$	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18
Середній тиск: $q_1$ , МПа, $q_2$ , МПа	21,441 19,629	24,121 20,450	25,461 19,554	25,729 17,643	28,409 17,687	31,103 17,289	43,150 22,597	45,964 22,407	48,770 22,060
Величина осаджування, $\Delta h$ , мм	1,8	3,5	5,8	8,8	11,7	15,5	18,1	20,5	23,0
Діаметр на контактній поверхні бочки, $D_k$ , мм	20,0	21,0	22,0	22,5	23,5	25,3	25,5	26,0	27,2
Ідеальний діаметр, $D_{id}$ , мм	20,380	21,178	22,251	23,548	24,714	26,155	26,946	27,928	28,992
Начальний переріз зразка, $F_0$ , мм <sup>2</sup>	298,49	298,49	298,49	298,49	298,49	298,49	298,49	298,49	298,49
Максимальний переріз в місці випучення, $F_{max}$ , мм <sup>2</sup>	326,68	362,86	411,66	471,19	530,66	593,65	637,61	687,78	754,38
Радіус максимального перерізу зразка, $r_{max}$ , мм	10,2	10,75	11,45	12,25	13,0	13,75	14,25	14,8	15,5
Радіус контактної поверхні зразка з бойками, $r$ , мм	10,0	10,5	11,0	11,25	11,75	12,65	12,75	13,0	13,6
Радіус кривизни бочки зразка, $\rho$ , мм	237,6	190,1	102,4	46,0	37,2	42,7	33,0	26,4	23,7
Середній діаметр, $d_{\bar{x}}$ , мм	20,404	21,203	22,278	23,576	24,743	26,185	26,978	27,962	29,027
Ідеальна площа перерізу, $F_{id}$ , мм <sup>2</sup>	326,04	352,07	388,66	435,30	479,44	536,98	569,99	612,3	659,83
Об'єм зразка, $V$ , мм <sup>3</sup>	6358,0	6865,4	7462,4	8357,9	9253,4	10417,5	11342,8	11939,8	12536,8
Істинний опір деформації по формулі (Є.21) $\sigma$ , МПа	17,22	18,22	17,78	17,28	17,61	18,56	20,44	21,0	20,83
Істинний опір деформації по формулі (Є.22) $\sigma$ , МПа	18,28	18,94	18,5	17,94	18,22	19,17	21,0	21,56	21,44
Істинний опір деформації по формулі (Є.23) $\sigma$ , МПа	14,72	16,11	16,61	15,39	15,5	16,06	16,89	18,01	18,56
Істинний опір деформації по формулі (Є.24) $\sigma$ , МПа	19,28	19,61	19,39	19,26	19,6	20,27	22,10	22,49	22,59
Істинний опір деформації по формулі (Є.26) $\sigma$ , МПа	16	17	17,17	16	16,44	17,11	18,89	19,33	19,61

## 4.2 Аналіз результатів експерименту, рекомендації по маркам сталі-аналогам

По отриманих результатах експерименту, побудуємо графік залежності сили стиснення від ступеня деформації із розрахованими відхиленнями, рис. 4.1. Для визначення переліку сталей та умов, при яких вони є аналогами свинцю та можуть бути використані для фізичного моделювання процесів пластичного формозмінення, побудовано криві зміцнення, рис. 4.2.

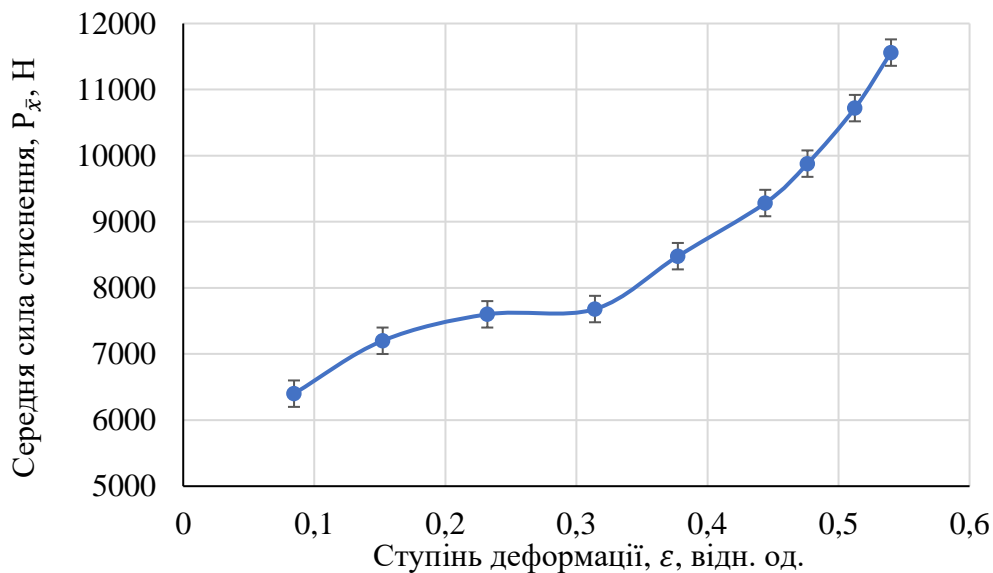


Рисунок 4.1 – Залежності сили стиснення від ступеня деформації

Для порівняння аналогів вибрані марки сталі, що є більш наближеними по своїх властивостях, при відповідних умовах (температура деформації 1200 °С, швидкість деформації  $u = 1 \text{ c}^{-1}$ , ступінь деформації від 0,1 відн. од. до 0,54 відн. од.), до властивостей свинцю. Дані умови є наближеними до режимів, які є на перших проходах чорнової прокатки.

Розрахунок істинного опору деформації для марок сталі (сплаву) - аналогів виконували по наступних методиках, табл. 4.4.

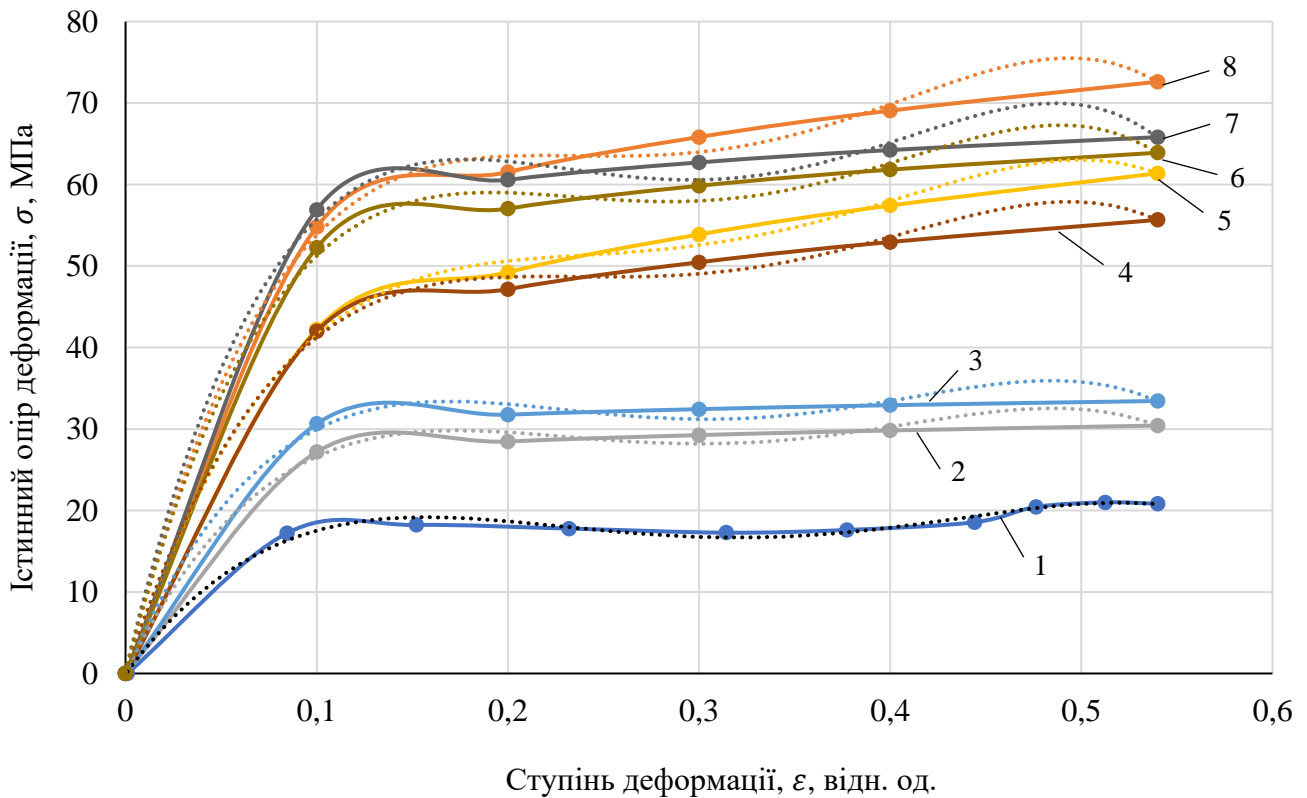


Рисунок 4.2 – Порівняння кривих зміцнення свинцю при температурі 20 °C (1) та марок сталі (сплавів) - аналогів 0X18МФТ (2), 15X25Т (3), DD11 (4), 65Г (5), X80 (6), X70 (7), Ст3сп (8) при температурі 1200 °C, пунктиром вказані лінії тренду

Таблиця 4.4 – Перелік марок сталі (сплаву) - аналогів та методик, за якими виконували розрахунки істинного опору деформації

Марка сталі (сплаву)- аналога	Нормативний документ	Метод розрахунку істинного опору деформації	Посилання
Ст3сп	ДСТУ 2651	Л.В. Андреюка, Г.Г. Тюленева	[129]
0X18МФТ	спецсплав		[129]
15X25Т	ГОСТ 5632		[129]
65Г	ГОСТ 14959		[129]
DD11	EN10111	Л.В. Андреюка, Г.Г. Тюленева (по хімічному складу)	[129]
X70	API-5L	дослідна залежність	[224]
X80	API-5L	дослідна залежність	[57, 223]

На підставі рис. 4.2 отримано поліноміальні залежності істинного опору деформації від ступеня деформації для свинцю, а також для марок сталі (сплаву) - аналогів з відповідною величиною вірогідності апроксимації  $R^2$ , (4.2)-(4.9) [227].

У загальному вигляді поліноміальна залежність 4-го рівня має наступний вигляд:

$$\sigma = a_0x^4 + a_1x^3 + a_2x^2 + a_3x + a_4, \quad (4.1)$$

де  $a_0 \dots a_4$  – коефіцієнти поліному.

Залежність істинного опору деформації свинцю від ступеня деформації:

$$\sigma_{Pb} = -3059,9x^4 + 4073,8x^3 - 1832x^2 + 321,82x - 0,1057; R^2 = 0,992. \quad (4.2)$$

Залежність істинного опору деформації сплаву 0X18МФТ від ступеня деформації:

$$\sigma_{X18MFT} = -4696x^4 + 6004,8x^3 - 2647,8x^2 + 474,28x + 0,1175; R^2 = 0,996. \quad (4.3)$$

Залежність істинного опору деформації сталі марки 15X25Т від ступеня деформації:

$$\sigma_{15X25T} = -5378,2x^4 + 6870,1x^3 - 3022,6x^2 + 537,27x + 0,1351; R^2 = 0,996. \quad (4.4)$$

Залежність істинного опору деформації сталі марки DD11 від ступеня деформації:

$$\sigma_{DD11} = -6445,7x^4 + 8308,4x^3 - 3722,3x^2 + 706,37x + 0,1572; R^2 = 0,998. \quad (4.5)$$

Залежність істинного опору деформації сталі марки 65Г від ступеня деформації:

$$\sigma_{65G} = -6026x^4 + 7796,2x^3 - 3529,2x^2 + 694,54x + 0,1448; R^2 = 0,998. \quad (4.6)$$

Залежність істинного опору деформації сталі марки (категорії міцності) X80 від ступеня деформації:

$$\sigma_{X80} = -8385x^4 + 10783x^3 - 4811,5x^2 + 891,99x + 0,2053; R^2 = 0,997. \quad (4.7)$$

Залежність істинного опору деформації сталі марки (категорії міцності) X70 від ступеня деформації:

$$\sigma_{X70} = -9558,6x^4 + 12251x^3 - 5427,5x^2 + 984,91x + 0,2371; R^2 = 0,996. \quad (4.8)$$

Залежність істинного опору деформації сталі марки Ст3сп від ступеня деформації:

$$\sigma_{Ст3сп} = -8411,1x^4 + 10835x^3 - 4857x^2 + 921,64x + 0,2051; R^2 = 0,998. \quad (4.9)$$

Результати оцінки відхилень в розрахунках по отриманих залежностях (4.2)-(4.9) в порівнянні з розрахунком істинного опору деформації  $\sigma_i$  по методиках, вказаних в табл. 4.4, та для свинцю по формулі (Є.21), наведені в табл. 4.5, 4.6.

Таблиця 4.5 – Оцінки відхилень в розрахунках істинного опору деформації марок сталі (сплаву) - аналогів

Матеріал	Параметр	Ступінь деформації, од					відхилення, %		
		0,1	0,2	0,3	0,4	0,54	мін	мах	середнє
0X18MФТ	$\sigma_i$ , МПа	27,18	28,47	29,25	29,82	30,43	-3,93	3,62	0,10
	$\sigma_{X18MФТ}$ , МПа	26,60	29,59	28,19	30,27	30,37			
	відхилення, %	2,12	-3,93	3,62	-1,51	0,20			
15X25Т	$\sigma_i$ , МПа	30,63	31,76	32,43	32,92	33,44	-4,04	3,77	0,12
	$\sigma_{15X25Т}$ , МПа	29,97	33,04	31,21	33,43	33,35			
	відхилення, %	2,17	-4,04	3,77	-1,55	0,26			
DD11	$\sigma_i$ , МПа	42,00	47,16	50,46	52,94	55,66	-3,26	2,54	-0,38
	$\sigma_{DD11}$ , МПа	41,24	48,69	49,18	53,86	56,37			
	відхилення, %	1,83	-3,26	2,54	-1,74	-1,26			
65Г	$\sigma_i$ , МПа	42,21	49,23	53,87	57,42	61,38	1,80	9,91	6,46
	$\sigma_{65Г}$ , МПа	38,03	48,35	51,22	53,06	56,42			
	відхилення, %	9,91	1,80	4,93	7,61	8,08			
X80	$\sigma_i$ , МПа	52,24	57,04	59,84	61,83	63,91	-1,73	9,46	4,04
	$\sigma_{X80}$ , МПа	47,30	58,02	58,53	58,22	61,06			
	відхилення, %	9,46	-1,73	2,19	5,84	4,46			
X70	$\sigma_i$ , МПа	56,91	60,57	62,71	64,23	65,82	-3,14	9,31	3,28
	$\sigma_{X70}$ , МПа	51,61	62,47	61,90	60,73	63,52			
	відхилення, %	9,31	-3,14	1,30	5,45	3,49			
Ст3сп	$\sigma_i$ , МПа	54,80	61,52	65,83	69,07	72,62	-0,21	9,65	5,20
	$\sigma_{Ст3сп}$ , МПа	49,51	61,65	63,53	64,40	68,03			
	відхилення, %	9,65	-0,21	3,49	6,76	6,32			

Таким чином, можна побачити збільшення як максимальних відхилень так і середнього відхилення в міру віддалення або «зниження» ступеню аналогічності (100–відхилення, %) матеріалу від свинцю.

Для поширення результатів експерименту, як інструменту для фізичного моделювання процесів прокатки, для марок сталі (сплаву) - аналогів розраховано коефіцієнти пропорційності:

$$n_i = \frac{a_{i \text{аналог}}}{a_{i Pb}}, \quad (4.10)$$

де  $a_{i Pb}$  – відповідний коефіцієнт регресії в залежності істинного опору деформації свинцю від ступеня деформації;  $a_{i \text{аналог}}$  – відповідний коефіцієнт регресії в



залежності істинного опору деформації марки сталі (сплаву) - аналогу від ступеня деформації.

Таблиця 4.6 – Оцінки відхилень в розрахунках істинного опору деформації свинцю

Матеріал	Параметр	Ступінь деформації, од									відхилення, %		
		0,085	0,152	0,232	0,314	0,377	0,444	0,476	0,513	0,54	мін	мах	середнє
Свинець	$\sigma_i$ , МПа	17,22	18,22	17,78	17,28	17,61	18,56	20,44	21,0	20,83	-5,15	5,29	0,20
	$\sigma_{PB}$ , МПа	16,31	19,16	17,96	16,69	17,32	19,29	20,28	20,92	20,76			
	відхилення, %	5,29	-5,15	-0,99	3,40	1,64	-3,93	0,80	0,37	0,35			

Результати розрахунку коефіцієнтів пропорційності наведено в табл. 4.7.

Таблиця 4.7 – Розраховані коефіцієнти пропорційності для марок сталі (сплаву) - аналогів

Марка сталі (сплаву)-аналога	Коефіцієнт пропорційності $n_i$ , для відповідного коефіцієнту поліному				
	$n_0$	$n_1$	$n_2$	$n_3$	$n_4$
0X18MTФ	1,535	1,474	1,445	1,474	-1,112
15X25Г	1,758	1,686	1,650	1,669	-1,278
DD11	2,107	2,039	2,032	2,195	-1,487
65Г	1,969	1,914	1,926	2,158	-1,370
X80	2,740	2,647	2,626	2,772	-1,942
X70	3,124	3,007	2,963	3,060	-2,243
Ст3сп	2,749	2,660	2,651	2,864	-1,940

За допомогою отриманих коефіцієнтів пропорційності, результати подальших експериментів з прокатки свинцевих зразків можна перерахувати на відповідну марку сталі(сплав) - аналог для наступних умов: температура деформації 1200 °С, швидкість деформації  $u = 1 \text{ c}^{-1}$ , ступінь деформації від 0,1 відн. од. до 0,54 відн. од.

Слід зазначити, що більшість сучасних марок сталі при чорновій прокатці обробляються при температурах 1200-1000 °С, в тому числі марки, що виробляються способом ТМСР. З метою розширення можливостей для фізичного моделювання, виконано додаткові розрахунки істинного опору деформації марок сталі (сплаву) - аналогів при температурах від 1200 °С до 1000 °С зі ступенем деформації від

0,1 відн. од. до 0,54 відн. од., додаток Ж, табл. Ж.1. Змінення істинного опору деформації по результатах розрахунків наведено на рис. 4.3.

Для встановлення залежностей впливу змінення температури на істинний опір деформації з врахуванням ступеня деформації, по кожній з досліджених марок сталі (сплаву) – аналогів, розраховано коефіцієнти змінення істинного опору деформації  $K_\sigma$ . В якості базового прийнято істинний опір деформації при температурі  $t=1200$  °С, для кожного ступеня деформації. Результати розрахунків наведені в додаток Ж, табл. Ж.2.

Ідентичність розрахованих коефіцієнтів змінення істинного опору деформації  $K_\sigma$  в залежності від температури  $t$ , для різних ступенів деформації дозволило встановити залежності впливу змінення температури на істинний опір деформації для кожної з дослідних марок сталі (сплаву) - аналогів, рис. 4.4.

На підставі отриманих залежностей, рівняння для розрахунку коефіцієнтів змінення істинного опору деформації  $K_\sigma$  будуть мати наступний вигляд [228]:

для сплаву 0X18MTФ

$$K_\sigma = 2 \times 10^{11} \times t^{-3,64}; R^2 = 1, \quad (4.11)$$

де  $t$  - температура деформації, °С;  $R^2$  - величина вірогідності апроксимації.

для сталі марки 15X25T

$$K_\sigma = 2 \times 10^{11} \times t^{-3,7}; R^2 = 1. \quad (4.12)$$

для сталі марки DD11

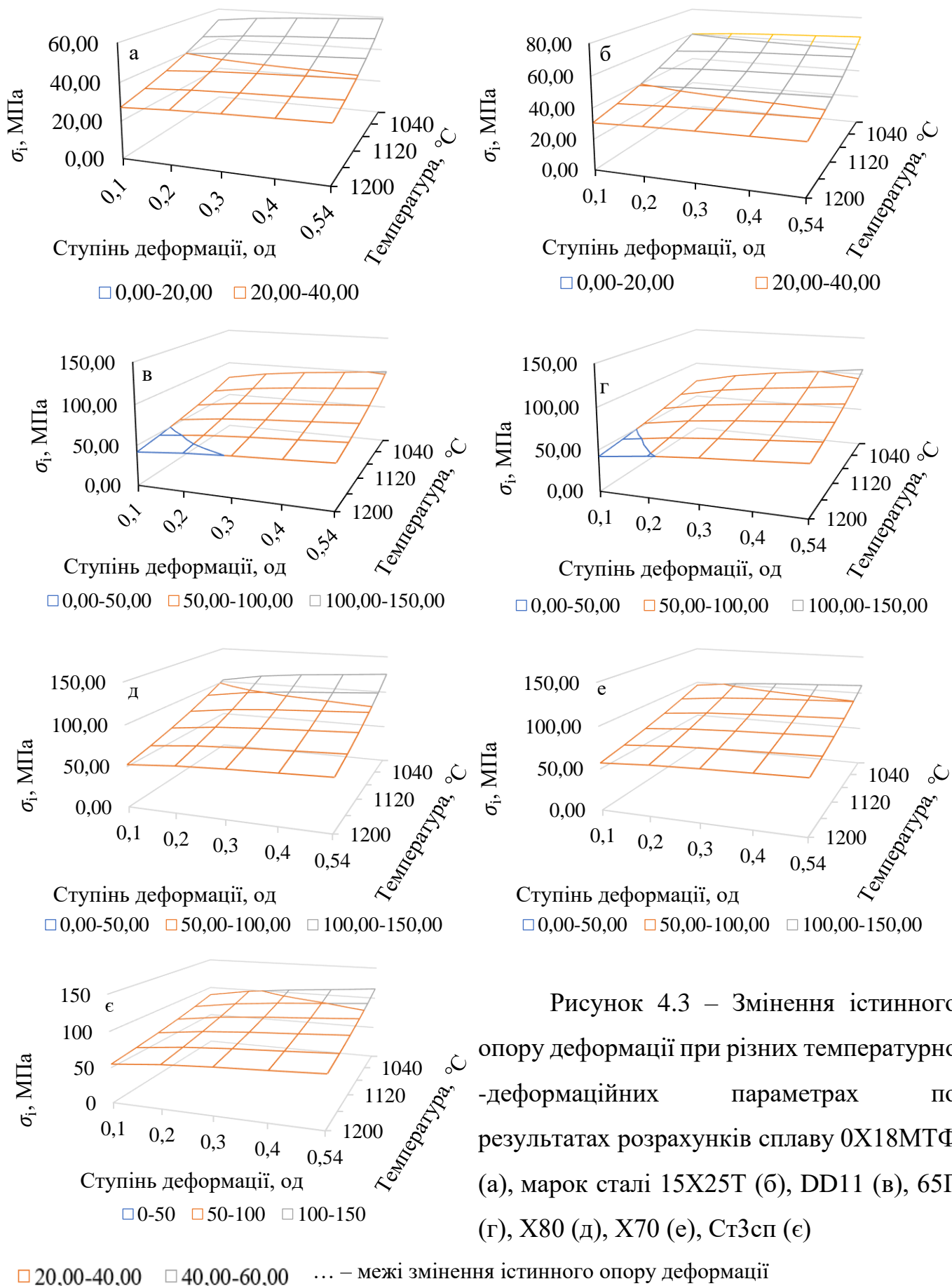
$$K_\sigma = 2 \times 10^{10} \times t^{-3,33}; R^2 = 1. \quad (4.13)$$

для сталі марки 65Г

$$K_\sigma = 2 \times 10^9 \times t^{-3,02}; R^2 = 1. \quad (4.14)$$

для сталі марки (категорії міцності) X80

$$K_\sigma = 3 \times 10^{11} \times t^{-3,703}; R^2 = 0,999. \quad (4.15)$$



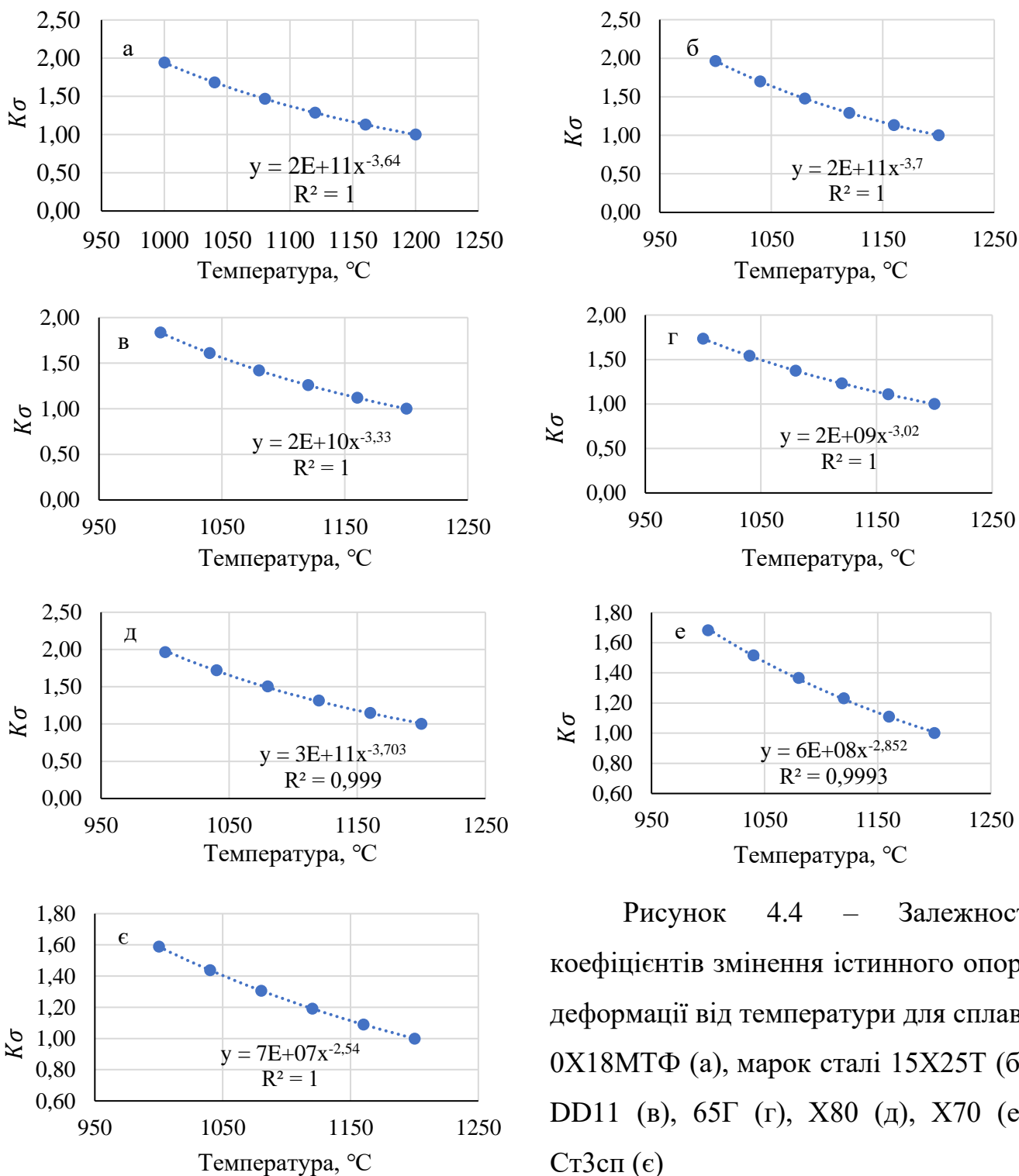


Рисунок 4.4 – Залежності коефіцієнтів змінення істинного опору деформації від температури для сплаву 0X18MTФ (а), марок сталі 15X25T (б), DD11 (в), 65Г (г), X80 (д), X70 (е), СтЗсп (е)

для сталі марки (категорії міцності) X70

$$K_\sigma = 6 \times 10^8 \times t^{-2,852}; R^2 = 0,9993. \quad (4.16)$$

для сталі марки СтЗсп

$$K_\sigma = 7 \times 10^7 \times t^{-2,54}; R^2 = 1. \quad (4.17)$$

Таким чином, використання отриманих коефіцієнтів пропорційності, табл. 4.7, сумісно з рівняннями (4.11)-(4.17) дозволяє моделювати процеси прокатки та перераховувати результати експериментів зі свинцем на сплав 0X18МФТ та марки сталі марок 15X25Т, DD11, 65Г, X80, X70, Ст3сп при наступних умовах: температура деформації 1200-1000 °С, швидкість деформації  $u = 1 \text{ c}^{-1}$ , ступінь деформації 0,1-0,54 відн. од. Дані умови відповідають параметрам гарячої прокатки в чорнових клітках товстолистових та широкоштабових станів, що дозволяє використовувати отримані результати у подальшому дослідженні чорнових процесів, в тому числі термомеханічної прокатки.

### **4.3 Порівняння розрахованих на підставі експерименту даних з фактичними результатами прокатки на стані 3600 «МК «АЗОВСТАЛЬ»**

З метою перевірки якості отриманих результатів для застосування при подальшому фізичному моделюванні виконано порівняння фактичних даних по параметрах прокатки на стані 3600 «МК «АЗОВСТАЛЬ» з даними, отриманими по результатах розрахунку по коефіцієнтах пропорційності (див. табл. 4.7) та коефіцієнтів змінення істинного опору деформації  $K_\sigma$ , рівняння (4.11)-(4.17).

Для перевірки використано дані чорнової прокатки товстих листів з кінцевими розмірами 17,5×3268×12200 мм зі сталі категорії міцності X70, плавка №1302503, партія 9063, з розмірами слябу в холодному стані 300×1850×3003 мм, табл. 4.8.

В таблиці 4.8, розрахована, згідно з методикою [58], сила прокатки (через істинний опір деформації та середній тиск), отримана шляхом розрахунку істинного опору деформації згідно з залежністю (4.2), коефіцієнти регресії якої було скорегована через коефіцієнти пропорційності (див. табл. 4.7) та з врахуванням рівняння (4.16). Кінцева залежність, яка була використана для розрахунку має наступний вигляд:

$$\sigma_{pb} = (-3059,9 \times 3,124x^4 + 4073,8 \times 3,007x^3 - 1832 \times 2,963x^2 + 321,82 \times 3,060x - 0,1057 \times (-2,243)) \times 6 \times 10^8 \times t^{-2,852}. \quad (4.18)$$

Таблиця 4.8 – Порівняння результатів чорнової прокатки товстих листів розмірами 17,5×3268×12200 мм зі сталі категорії міцності X70 з розрахованими даними

№ п/п	Фактичні параметри прокатки				Розраховані параметри прокатки	
	Товщина розкату, Н, мм	Ширина розкату, В, мм	Температура розкату, t, °С	Сила прокатки, МН	Сила прокатки, МН	Похибка, %
0	302	3042,7				
1	277	3042,7	1126	24,67	25,22	-2,24
2	258	3042,7	1120	30,52	20,12	34,04
3	238	3042,7	1117	29,44	22,33	24,13
4	219	3042,7	1114	31,35	22,31	28,84
5	203	3042,7	1110	26,93	19,72	26,79
6	180	2787,3	1107	29,75	26,73	10,14
7	159	3431,0	1102	33,28	32,22	3,18
8	139	3431,0	1098	34,33	32,54	5,21
9	121	3431,0	1093	34,80	31,59	9,22
10	112	3431,0	1087	23,97	18,03	24,79
11	99,1	3431,0	1081	29,25	26,82	8,32
12	85,6	3431,0	1073	32,96	29,41	10,78
13	73,6	3431,0	1064	31,08	28,68	7,72
14	64,4	3431,0	1054	30,04	25,22	16,05
15	57,1	3431,0	1042	26,30	22,60	14,09
16	51,2	3431,0	1028	24,82	20,46	17,58

Порівняння фактичної сили прокатки та розрахованої наведено на рис. 4.5.

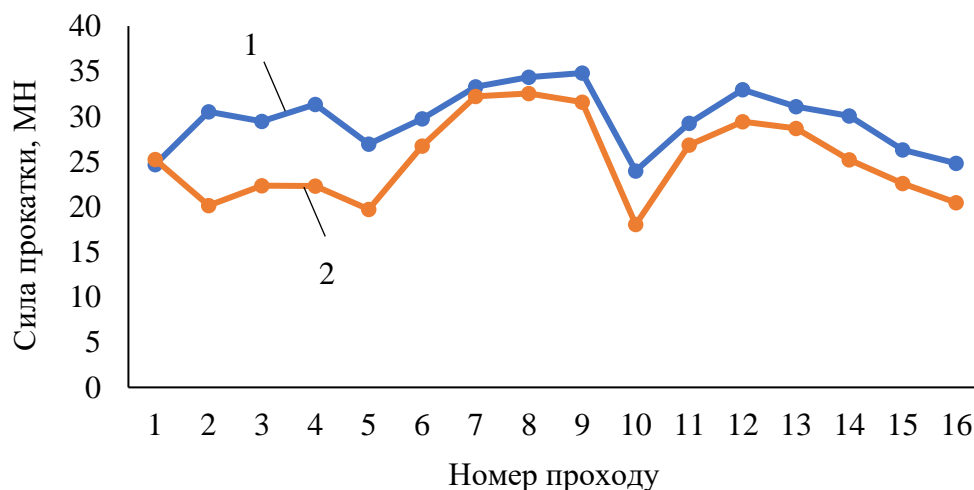


Рисунок 4.5 – Порівняння фактичної сили (1) отриманої при чорновій прокатці товстих листів з кінцевими розмірами 17,5×3268×12200 мм зі сталі марки X70 та розрахованої (2)

Підвищена розбіжність між фактичними та розрахованими даними (див. табл. 4.8, рис. 4.5) спостерігається у 2-5 проходах, в яких безпосередньо здійснювалась розбивка розкату по ширині, та, яка може бути пов'язана з нерівномірним нагріванням або переохолодженням торців слябів.

Загальна середня похибка по всіх проходах становить 14,9 %. Якщо не враховувати вплив розбивки розкату по ширині у 2-5 проходах, тоді середня похибка становить 11,6 %, що є задовільним рівнем.

Таким чином, при порівнянні фактичних даних по результатах чорнової прокатки товстих листів з кінцевими розмірами  $17,5 \times 3268 \times 12200$  мм зі сталі категорії міцності X70 на стані 3600 «МК «АЗОВСТАЛЬ» з даними, розрахованими на підставі отриманих коефіцієнтів пропорційності (див. табл. 4.7) та коефіцієнтів змінення істинного опору деформації, рівняння (4.16), середня похибка становить 11,6 %, що дозволяє використовувати отримані дані для подальшого фізичного моделювання процесів гарячої прокатки.

## Висновки

1. По результатах лабораторних досліджень, в умовах лабораторії кафедри ОМТ ДВНЗ «ПДТУ» встановлено реологічні властивості свинцю при температурі деформації  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ , швидкості деформації  $u = 1\text{ c}^{-1}$ , ступені деформації від 0,1 відн. од. до 0,54 відн. од. Визначено, що при температурі деформації  $1200\text{ }^{\circ}\text{C}$ , швидкості деформації  $u = 1\text{ c}^{-1}$  та ступені деформації від 0,1 відн. од. до 0,54 відн. од. опір деформації сплаву 0X18MTФ та марок сталі 15X25T, DD11, 65Г, X80, X70, СтЗсп є наближеним до свинцю.

2. Для отриманих поліноміальних залежностей визначення істинного опору деформації свинцю та марок сталі (сплаву) - аналогів, шляхом апроксимації лабораторних даних та відомих дослідних даних, встановлено, що середнє відхилення при розрахунку по яких склало від -0,38 % до 5,20 %.

3. Перехід від свинцю до сталей можливий за допомогою коефіцієнтів пропорційності. Розраховано коефіцієнти пропорційності  $n_i$ , які дозволяють розраховувати опір деформації марок сталі (сплаву) – аналогів на підставі отриманого опору деформації свинцю з метою подальшого фізичного моделювання силових процесів прокатки.

4. Отримано залежності для розрахунку коефіцієнтів змінення істинного опору деформації  $K_\sigma$ , які дозволяють розширити температурні можливостей для фізичного моделювання для кожної з марок сталі (сплаву) – аналогів з 1200 °С до 1200-1000 °С. Вказаний діапазон відповідає температурним параметрами чорнової прокатки для більшість сучасних марок сталі, в тому числі тих, що виробляються методом ТМСР.

5. Комплекс залежностей з коефіцієнтів пропорційності та коефіцієнтів змінення істинного опору деформації  $K_\sigma$  дозволяє моделювати процеси прокатки з використанням свинцевих зразків, середня похибка по яких не перевищує 11,6 %, що перевірено на фактичних даних по результатах чорнової термомеханічної прокатки на стані 3600 «МК «АЗОВСТАЛЬ» товстих листів зі сталі категорії міцності Х70. Умови використання отриманих залежностей - температура деформації 1200-1000 °С, швидкість деформації  $u = 1 \text{ c}^{-1}$ , ступінь деформації від 0,1-0,54 відн. од, відповідають режимам, які є при чорновій прокатці та можуть бути використані для фізичного моделювання процесів чорнової прокатки на товстолистових та широкоштабових станах, наприклад станах 3000 та 1700 «ММК ІМЕНІ ІЛЛІЧА», та стані 3600 «МК «АЗОВСТАЛЬ».



## РОЗДІЛ 5

### ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ ГАРЯЧОЇ ПРОКАТКИ НА СТАНІ СТЕККЕЛЯ ШЛЯХОМ МОДЕЛЮВАННЯ МЕТОДОМ СКІНЧЕННИХ ЕЛЕМЕНТІВ

#### 5.1 Математична модель процесу гарячої прокатки

##### 5.1.1 Модель фізико-механічних властивостей матеріалу, що прокатується, початкові дані

Застосування методів математичного моделювання процесів обробки металів тиском дозволяє одночасно задовільнити декілька цілей: мінімізувати витрати на дослідження та розробку технологічних процесів в умовах реального виробництва; виконати поглиблене дослідження процесів пластичної деформації, що відбуваються в дослідному осередку деформації; виконати порівняння результатів дослідження через математичне моделювання з фактичними результатами, отриманими при виробництві, з метою виявлення вузьких місць технології.

Метою цього дослідження є встановлення умов мінімальної нерівномірності розподілу деформації по товщині прокату шляхом отримання розподілу напружень та деформації вздовж осередку деформації в умовах чорнової прокатки та з урахуванням умов квазістаціонарного розподілу температур при чистовій прокатці на стані Стеккеля. Порівняння результатів розрахунку силових параметрів, отриманих шляхом математичного моделювання з фактичними результатами прокатки.

В якості інструменту дослідження методом скінченних елементів використано програмний додаток Abaqus CAE 6.14-2.

Докладні дані щодо особливостей стану Стеккеля, перелік, характеристики, схема розташування основного устаткування та сортамент наведено в розділі 1.3.3.

Характеристики дослідного сортаменту та фактичний режим прокатки наведено в табл. 5.1-5.3.

Таблиця 5.1 – Сортамент слябів та рулонів, що досліджується

шифр плавки	№ сляба	Марка сталі	Переріз слябу, мм	Переріз рулону, мм
81518	A1/02005400	S355JR+AR	220×1520×9800	15×1500

Таблиця 5.2 – Хімічний склад сталі марки S355JR+AR, що досліджувалася

шифр плавки	Масова доля елементів, %														
	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Cu	Al	Ti	Nb	Mo	V	N	As
81518	0,14	0,023	1,40	0,014	0,003	0,05	0,18	0,02	0,035	0,005	0,034	0,01	0,005	0,007	0,005

Таблиця 5.3 – Фактичний режим прокатки плавки № 81518 по клітях стану

## Стеккеля

Прокатний стан	№ проходу	H, мм	h, мм	Ступінь деформації, %	Діаметр робочих валків, мм	Швидкість прокатки, м/с	Температура перед проходом, °C	Сила прокатки, МН×10 <sup>-2</sup>
Стан дуо 3170	1	221,3	200,49	9,40	1050	2,20	1090	1007
	2	200,49	178,82	10,81	1050	2,20	1068	904
	3	178,82	158,36	11,44	1050	2,20	1068	1000
	4	158,36	139,55	11,88	1050	2,20	1044	1017
	5	139,55	120,54	13,62	1050	2,20	1073	1015
	6	120,54	103,88	13,82	1050	2,20	1023	1077
	7	103,88	87,23	16,03	1050	2,20	1055	1121
	8	87,23	71,81	17,68	1050	2,20	1009	1243
	9	71,81	57,87	19,41	1050	2,20	1027	1254
	10	57,87	46,82	19,09	1050	2,20	1027	1246
	11	46,82	37,16	20,63	1050	2,20	1041	1397
Стан кварто 1780 (Стеккеля)	1	37,16	23,95	35,55	620	4,06	999	1957
	2	23,95	18,98	20,75	620	4,06	958	1351
	3	18,98	15,17	20,07	620	4,06	920	1195

Слід зазначити, що з метою виключення помилок розрахунку, пов'язаних з фіксацією фактичної температури прокатки по проходах, в математичній моделі в системі Abaqus CAE було використано результати розрахунку, здійсненого аналітичним способом [47].

Для побудови моделі фізико-механічних властивостей металу, що обробляється в системі CAE (Complete Abaqus Environment), необхідно задати його щільність, пружність та пластичні властивості.

Скінченно-елементна модель процесу гарячої прокатки побудована для прокатки сталі марки S355JR+AR згідно з вимогами EN 10025-2, з хімічним складом, що наведений в табл. 5.2.

В системі Abaqus CAE були задані наступні параметри:

- щільність  $7,8E-09$  т/мм<sup>3</sup>;
- коефіцієнт Пуассона – 0,3.

Модуль пружності був заданий в залежності від температури металу  $t$ , °C, по наступній залежності [229]:

$$E = (213,286 - 4,877 \cdot 10^{-2}t - 3,33 \cdot 10^{-5} t^2 - 2,778 \cdot 10^{-8} t^3) \cdot 10^3, \text{ МПа.} \quad (5.1)$$

Істинний опір металу було визначено згідно з методом Л. В. Андреюка та Г. Г. Тюленева по хімічному складу [129]:

$$\sigma_s = S_{\sigma_{од}} u^a (10\varepsilon)^b (t/1000)^c, \quad (5.2)$$

де  $u$  – швидкість деформації, с<sup>-1</sup>;  $\varepsilon$  – відносний ступінь деформації, відн. од.;  $t$  – температура деформації, °C;  $S_{\sigma_{од}}$ ,  $a$ ,  $b$ ,  $c$  – коефіцієнти для кожної марки сталі, які визначаються по відповідних залежностях з урахуванням вмісту хімічних елементів в сталі [129].

Перетворення отриманих методом Л. В. Андреюка та Г. Г. Тюленева значень опору деформації (напруження)  $\sigma_{s\,true}$  та ступеня деформації  $\varepsilon_{in}^{pl}$  для застосування в середовищі Abaqus CAE виконували по наступній методиці:

$$\sigma_{s\,true} = \sigma_s (1 + \varepsilon); \quad (5.3)$$

$$\varepsilon_{true} = \ln(1 + \varepsilon); \quad (5.4)$$

$$\varepsilon_{in}^{pl} = \varepsilon_{true} - \frac{\sigma_{s\,true}}{E}. \quad (5.5)$$

Істинний опір деформації в середовищі Abaqus CAE,  $\sigma_{s\,true}$ , було задано в залежності від:

ступеня деформації  $\varepsilon$  в діапазоні 0,0...0,8 відн. од.;

швидкості деформації  $u$  в діапазоні 0,0...40,0 с<sup>-1</sup>;

температури деформації  $t$  в діапазоні 800...1200 °C.

Приклад відображення матеріалу у середовищі Abaqus CAE представлено на рис. 5.1. Лістинг розроблених в середовищі VB6.0 програмних засобів наведено в додатку З.

В розрахунках по формулі (5.2), для отримання в системі Abaqus CAE нульових значень для ступеня деформації та швидкості деформації використовувались відповідні значення, які дорівнювали 0,001 та 0,01.

Значення опору деформації (напруження)  $\sigma_{strue}$  та ступеня деформації  $\varepsilon_{in}^{pl}$  було оброблено по формулах (5.3) та (5.5).

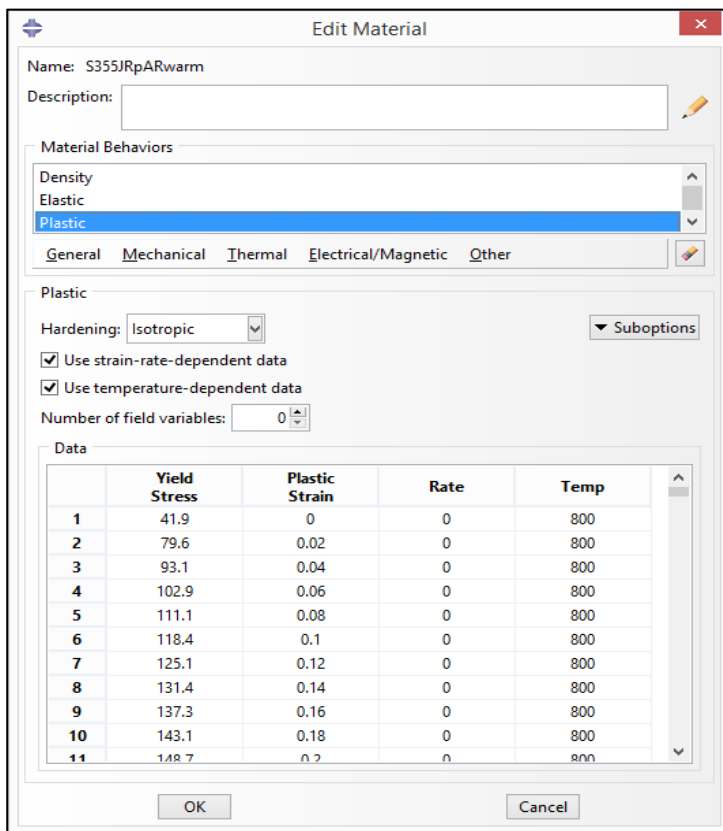


Рисунок 5.1 – Відображення фізико-механічних властивостей матеріалу в середовищі Abaqus CAE

Методологія створення математичної моделі в системі Abaqus CAE наведена в додатку Д.

### 5.1.2 Обробка результатів розрахунку

Обробка результатів скінченно-елементного моделювання полягала в аналізі полів напружень та деформації, що наведені на рис. 5.2.

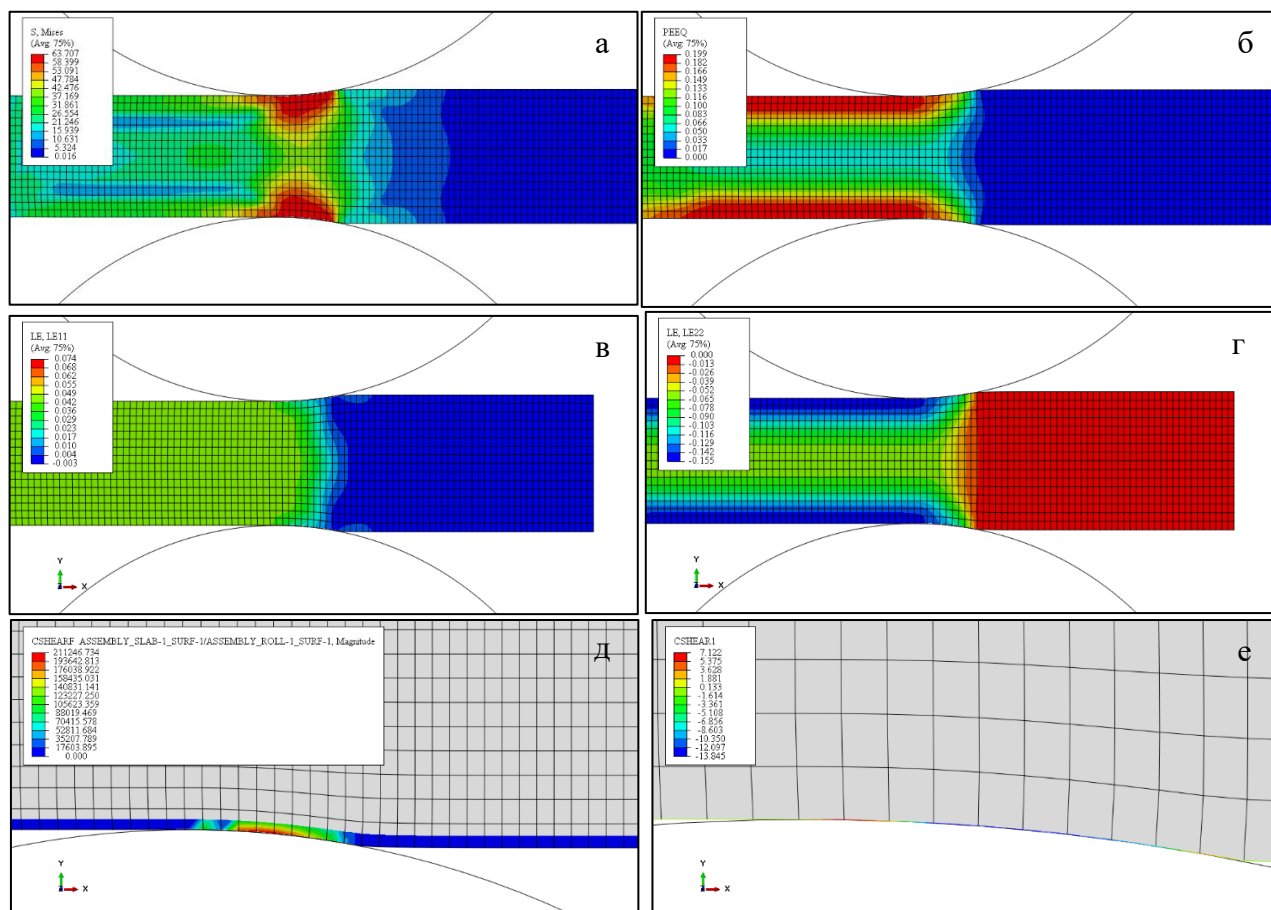


Рисунок 5.2 – Приклади полів напружень та деформації, отриманих при реалізації моделі скінченних елементів, поле еквівалентних напружень (а), поле еквівалентної деформації (б), поле логарифмічної деформації в горизонтальній площині (в), поле контактних напружень (д), поле дотичних контактних напружень (е)

Для аналізу енергосилових параметрів процесу прокатки було використано реакції у довідковій точці валка. Зокрема, на рис. 5.3 показано розподілення сили та моменту прокатки.

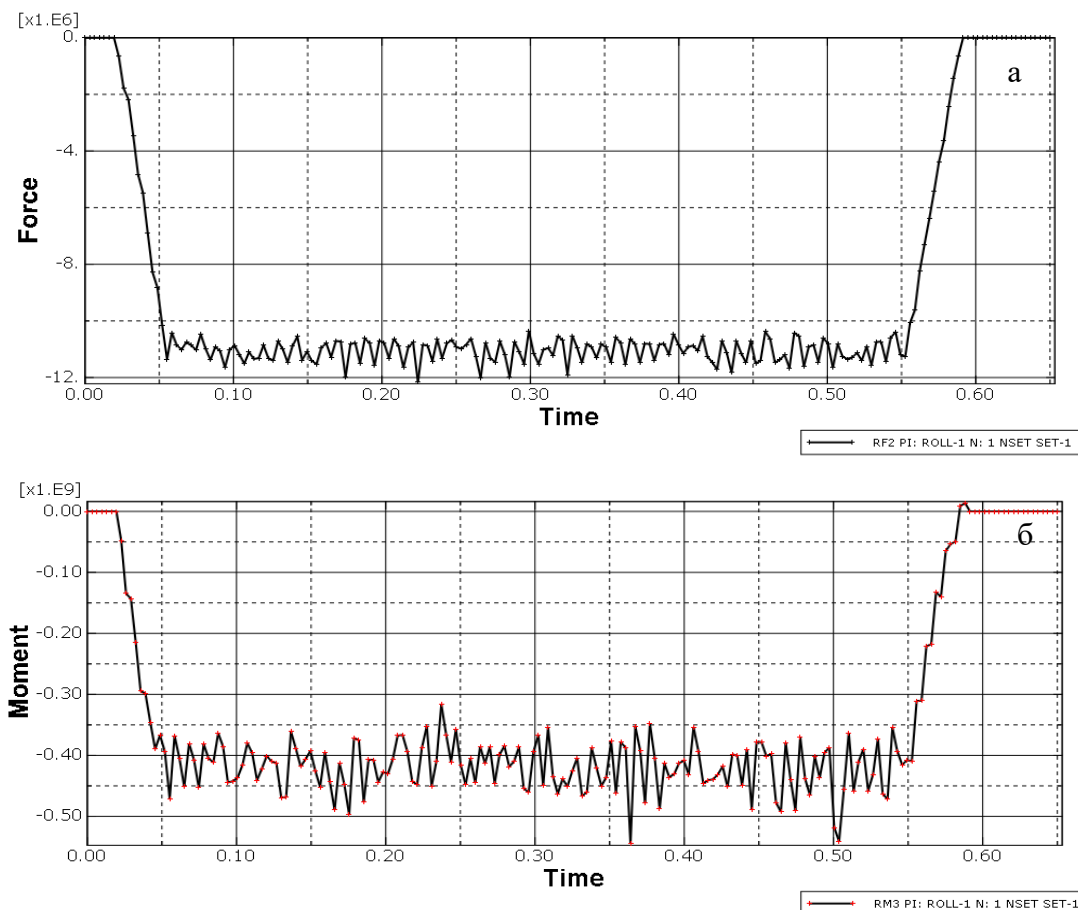


Рисунок 5.3 – Графіки змінення сили (а) та моменту (б) прокатки

Графіки, що були отримані в середовищі Abaqus CAE, експортували в MS Excel у числовому вигляді, рис. 5.4 та піддавали статистичній обробці.

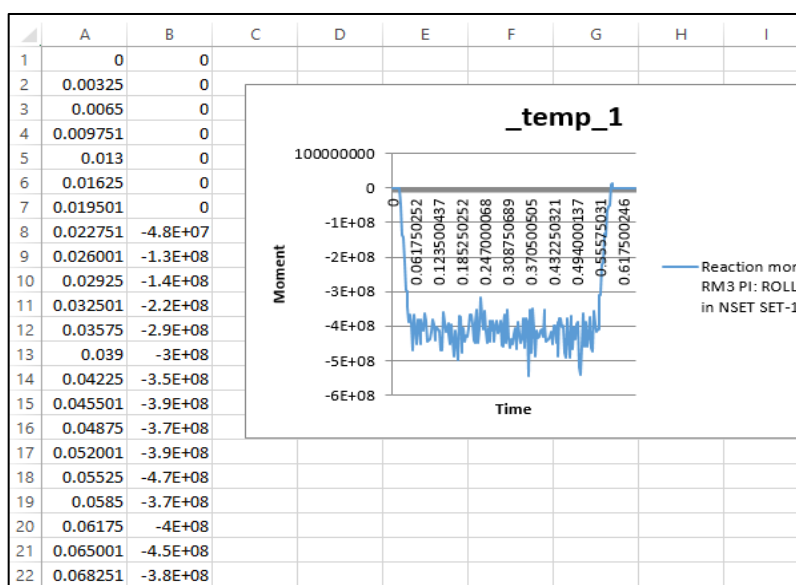


Рисунок 5.4 – Приклад електронної таблиці, що була імпортована з Abaqus

CAE

## 5.2 Результати розрахунку процесу прокатки на стані Стеккеля в середовищі Abaqus CAE

### 5.2.1 Результати розрахунку процесу прокатки в кліті стану 3170 в середовищі Abaqus CAE

Розрахунок процесів прокатки сталі марки S355JR+AR зі слябу розмірами 220×1520×9800 мм та кінцевими розмірами рулону 15×1500 мм в середовищі Abaqus CAE здійснювали по проходах для чорнової кліті, стан 3170 та для стану 1780 з пічними моталками (Стеккеля) з урахуванням особливостей технології та устаткування.

Результати розрахунку полів еквівалентних напружень  $S$  (по Мізесу), еквівалентної пластичної деформації PEEQ, сили прокатки Force та моменту прокатки Moment по проходах в кліті стану 3170 наведено на рис. 5.5-5.15. Слід зазначити, що на рисунках поля еквівалентних напружень  $S$  мають розмірність «МПа», поля еквівалентної пластичної деформації PEEQ мають розмірність «відн. од.», сили прокатки Force має розмірність «Н», момент прокатки на валку Moment має розмірність «Н×мм». Виходячи з динаміки змінення форми полів, інтенсивності або рівня еквівалентного напруження  $S$  та еквівалентної деформації PEEQ можна зробити висновок щодо рівномірності проникнення деформації та напружень по товщині прокату. Як відомо, кінцеві властивості прокату починають формуватися на стадії чорнової прокатки. Тому отримання даних щодо настання такої фази в металі дозволяє покращити процеси розробки та вдосконалення технології в прив'язці до характеристик конкретного стану та матеріалу, що обробляється. При моделюванні режимів прокатки сталі марки S355JR+AR в кліті стану 3170, збільшення рівномірності проникнення напружень по товщині заготовки, спостерігається в шостому проході, в якому починає формуватися суцільний шар напружень, який складає 90 % від максимального еквівалентного напруження в цьому проході, при

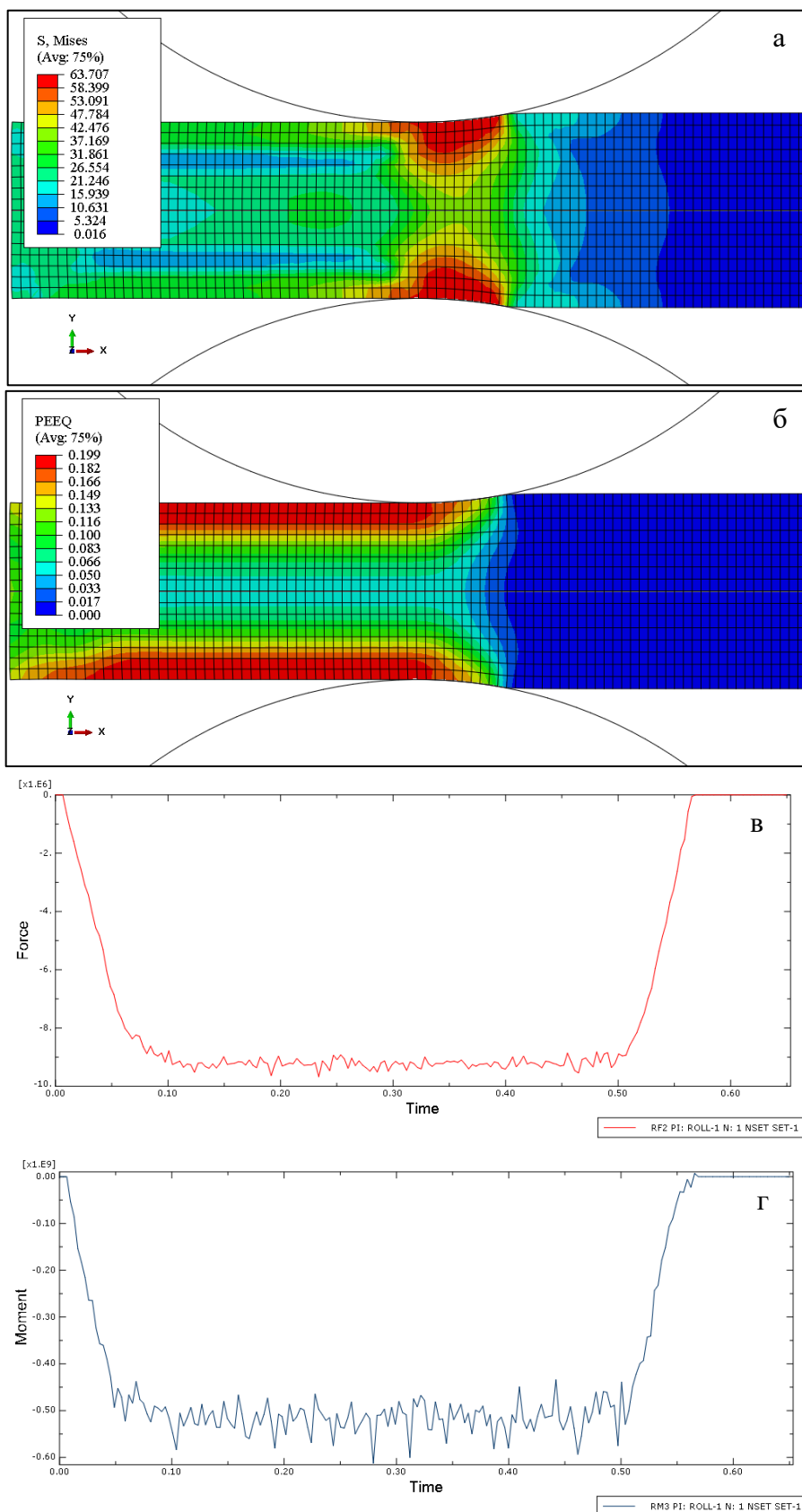


Рисунок 5.5 – Результати розрахунків полів еквівалентних напружень (а), еквівалентної пластичної деформації (б), сили прокатки (в) та моменту прокатки (г) в проході № 1 стану 3170



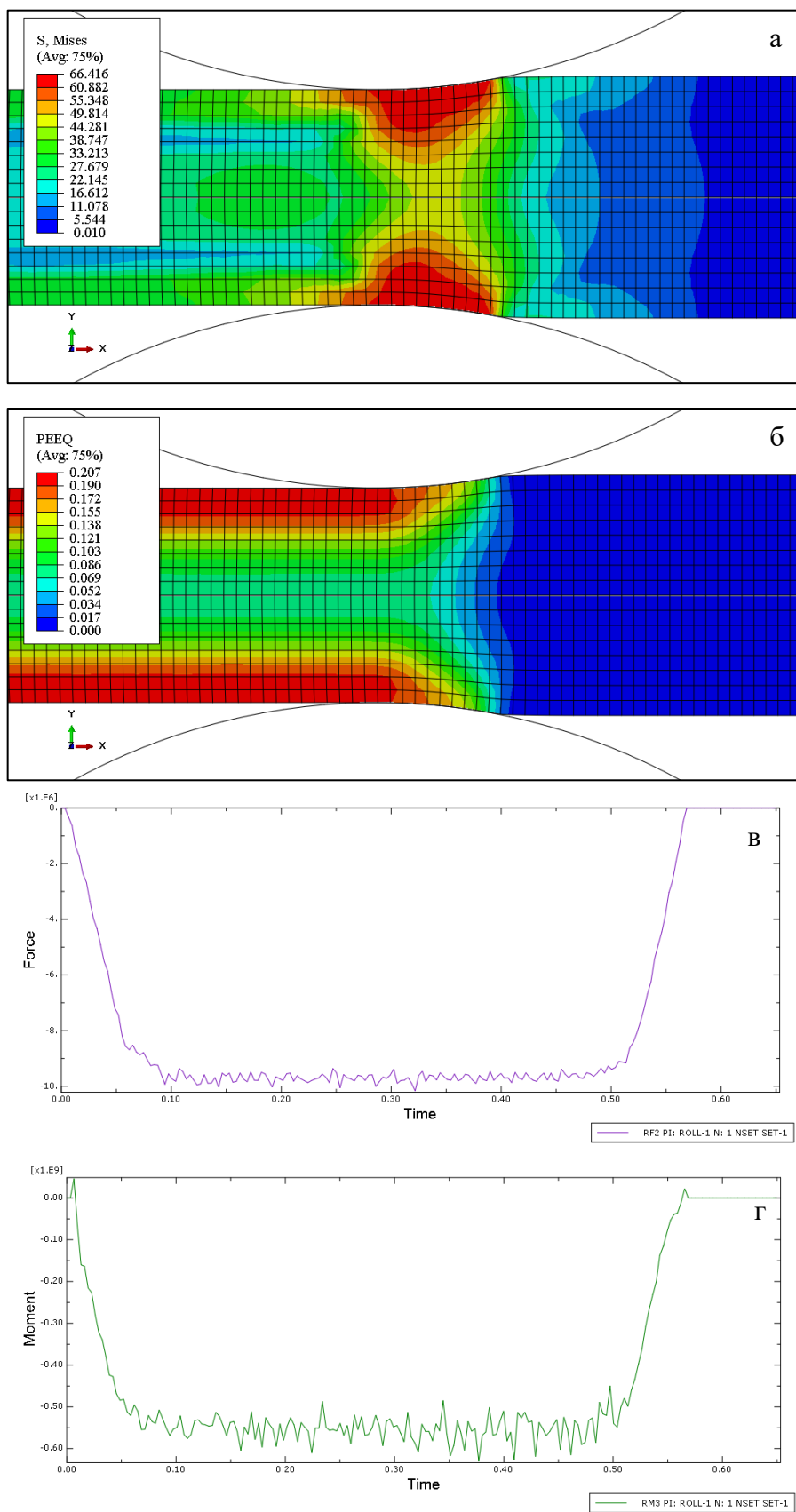


Рисунок 5.6 – Результати розрахунків полів еквівалентних напружень (а), еквівалентної пластичної деформації (б), сили прокатки (в) та моменту прокатки (г) в проході № 2 стану 3170

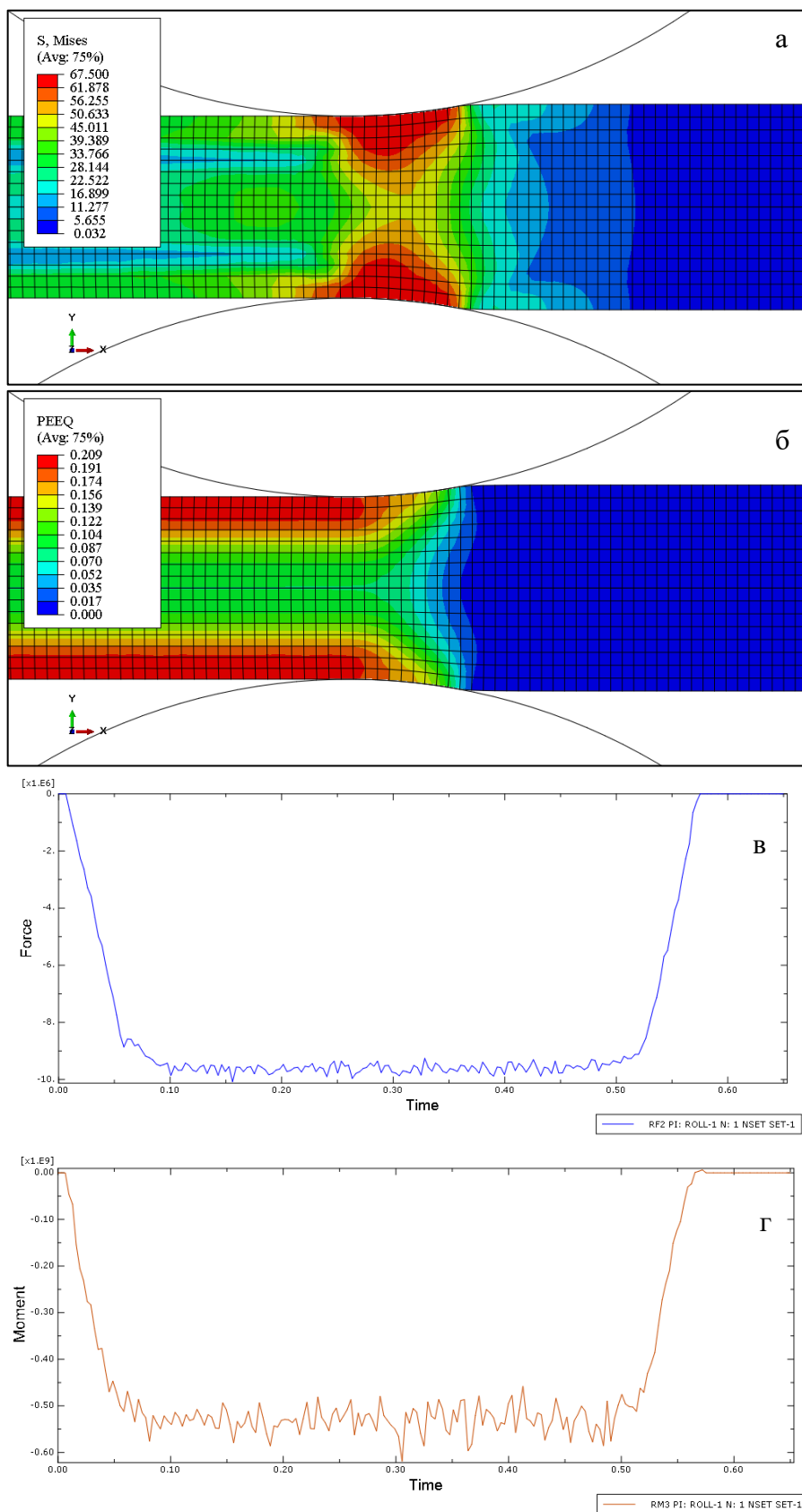


Рисунок 5.7– Результати розрахунків полів еквівалентних напружень (а), еквівалентної пластичної деформації (б), сили прокатки (в) та моменту прокатки (г) в проході № 3 стану 3170

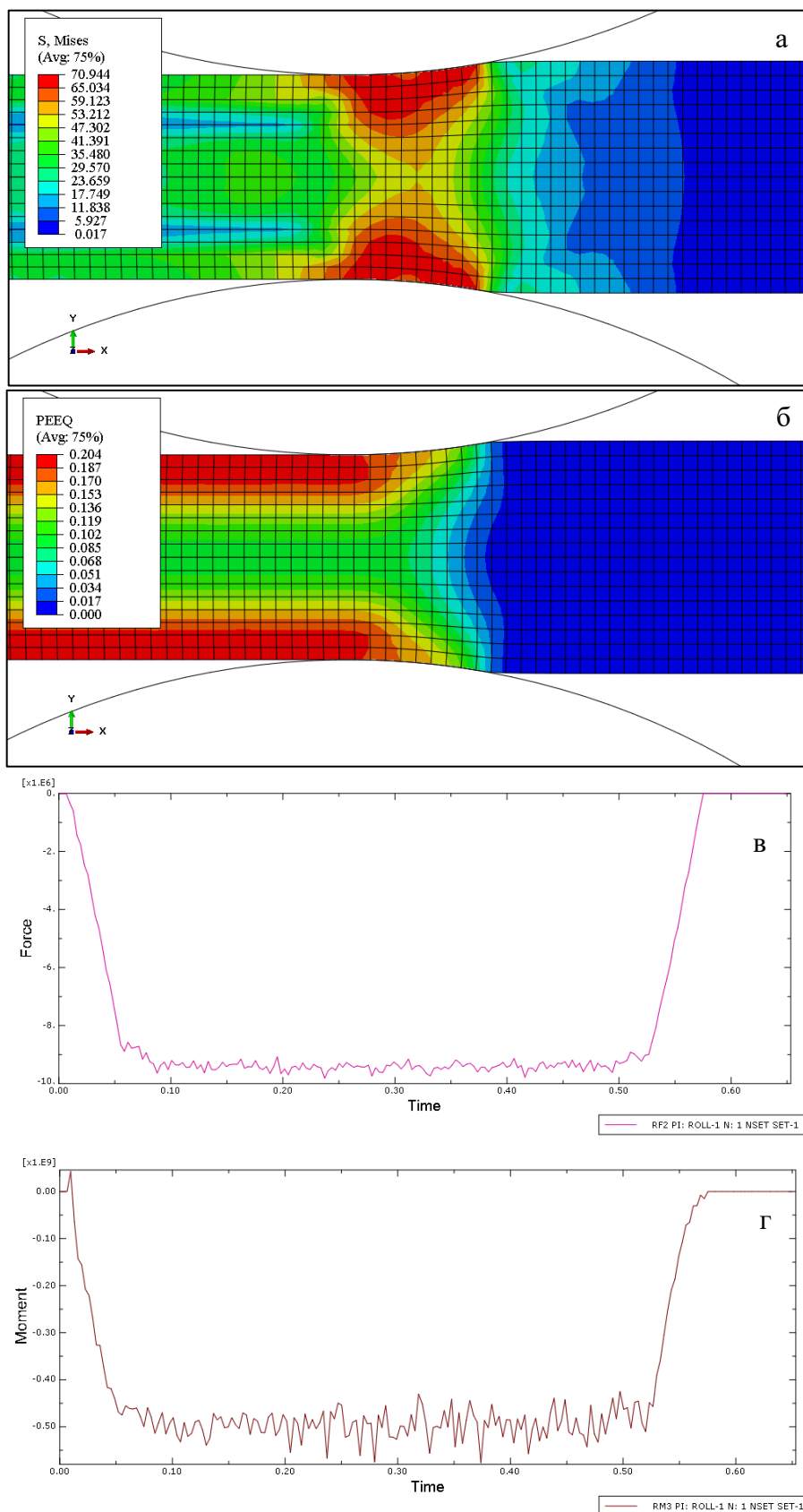


Рисунок 5.8 – Результати розрахунків полів еквівалентних напружень (а), еквівалентної пластичної деформації (б), сили прокатки (в) та моменту прокатки (г) в проході № 4 стану 3170

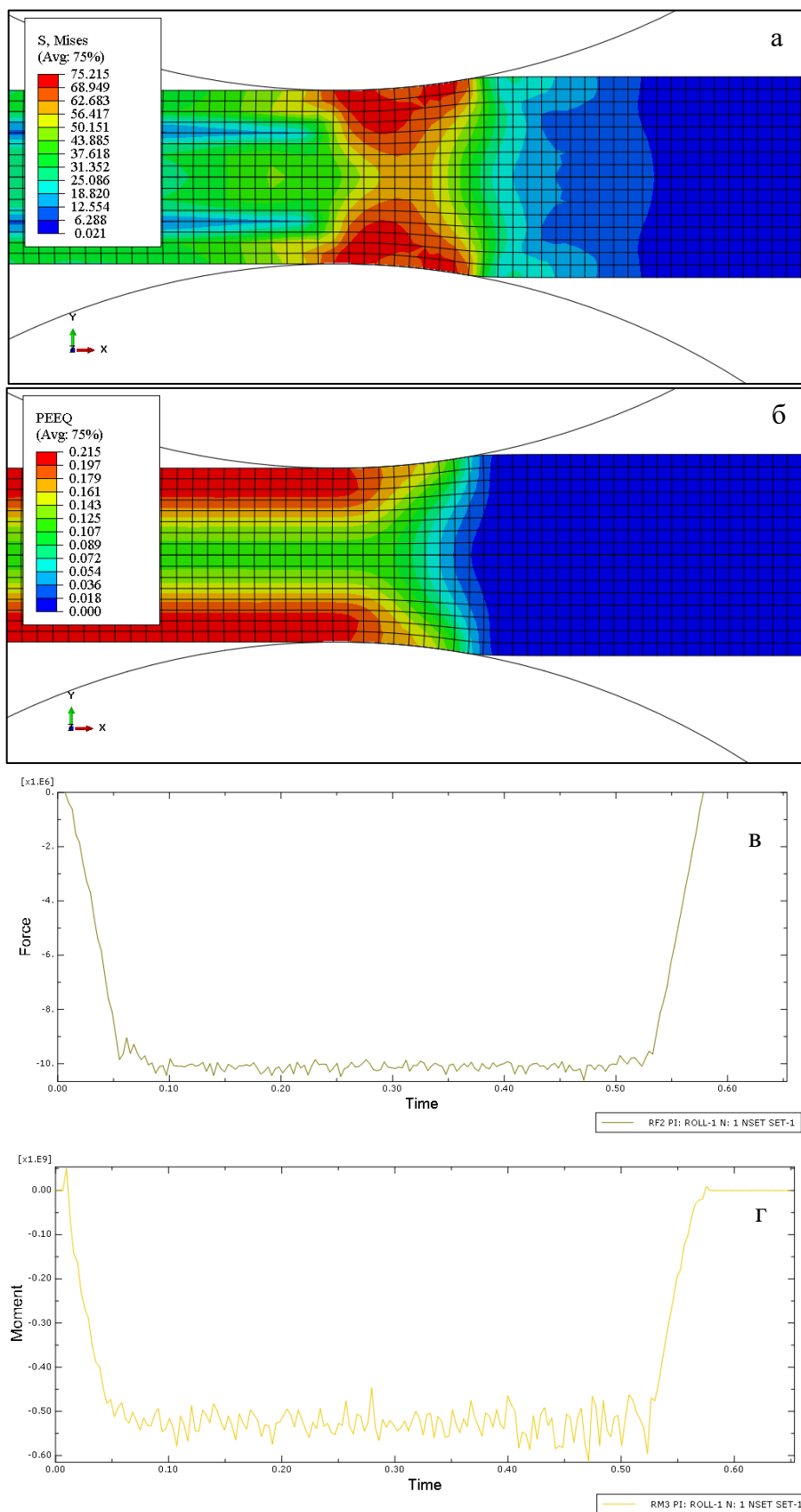


Рисунок 5.9 – Результати розрахунків полів еквівалентних напружень (а), еквівалентної пластичної деформації (б), сили прокатки (в) та моменту прокатки (г) в проході № 5 стану 3170

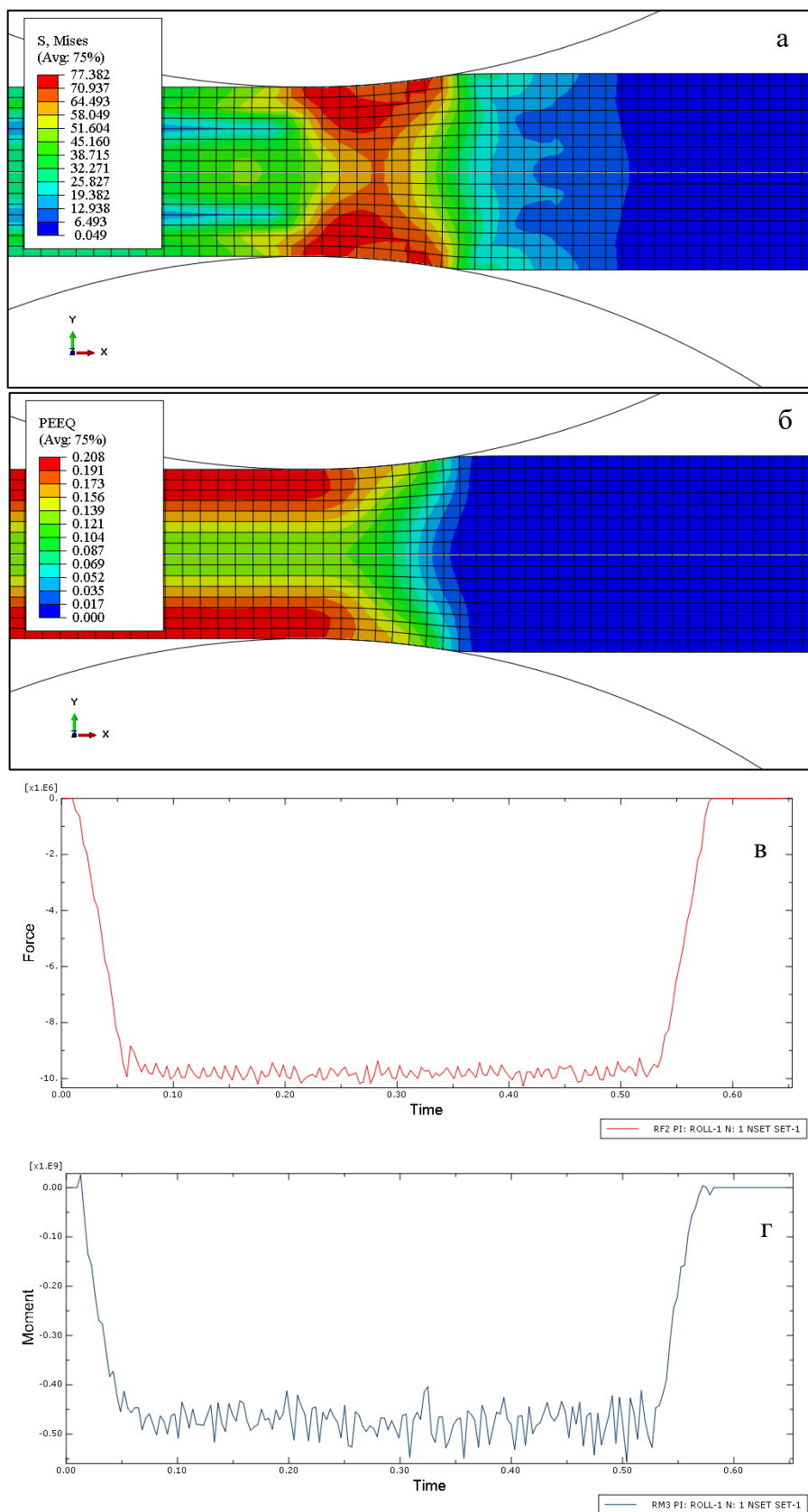


Рисунок 5.10 – Результати розрахунків полів еквівалентних напружень (а), еквівалентної пластичної деформації (б), сили прокатки (в) та моменту прокатки (г) в проході № 6 стану 3170

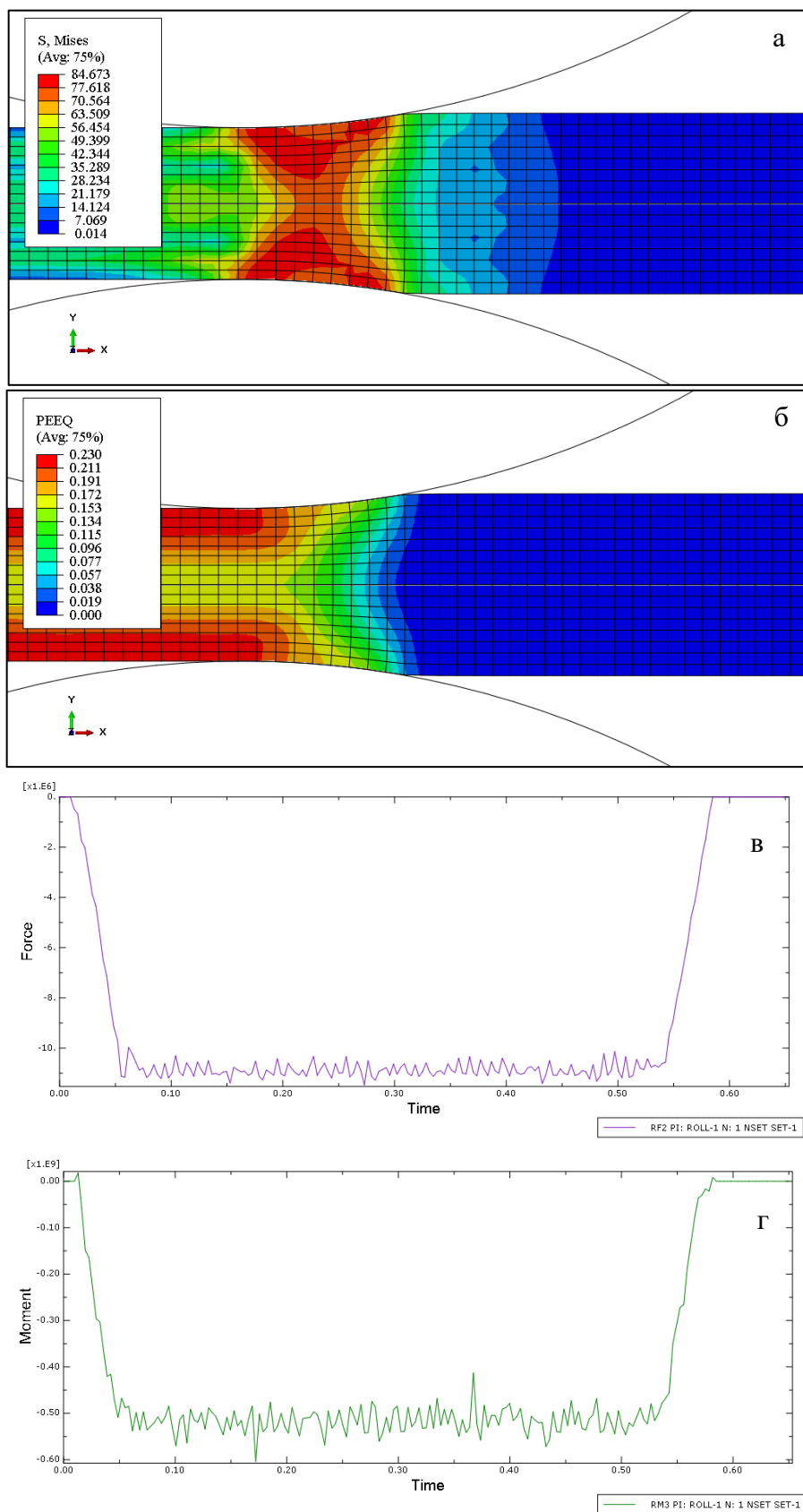


Рисунок 5.11 – Результати розрахунків полів еквівалентних напружень (а), еквівалентної пластичної деформації (б), сили прокатки (в) та моменту прокатки (г) в проході № 7 стану 3170

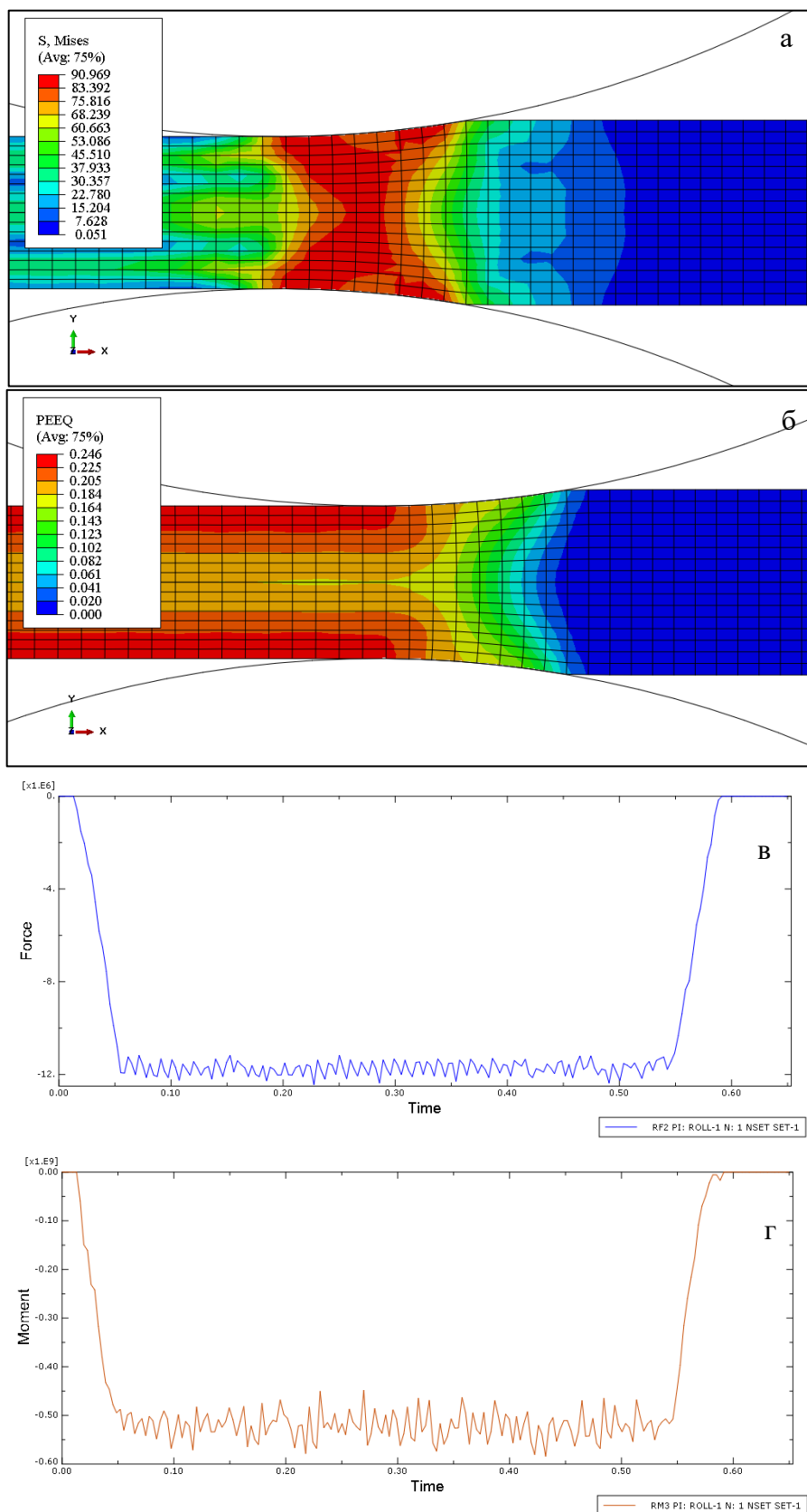


Рисунок 5.12 – Результати розрахунків полів еквівалентних напружень (а), еквівалентної пластичної деформації (б), сили прокатки (в) та моменту прокатки (г) в проході № 8 стану 3170

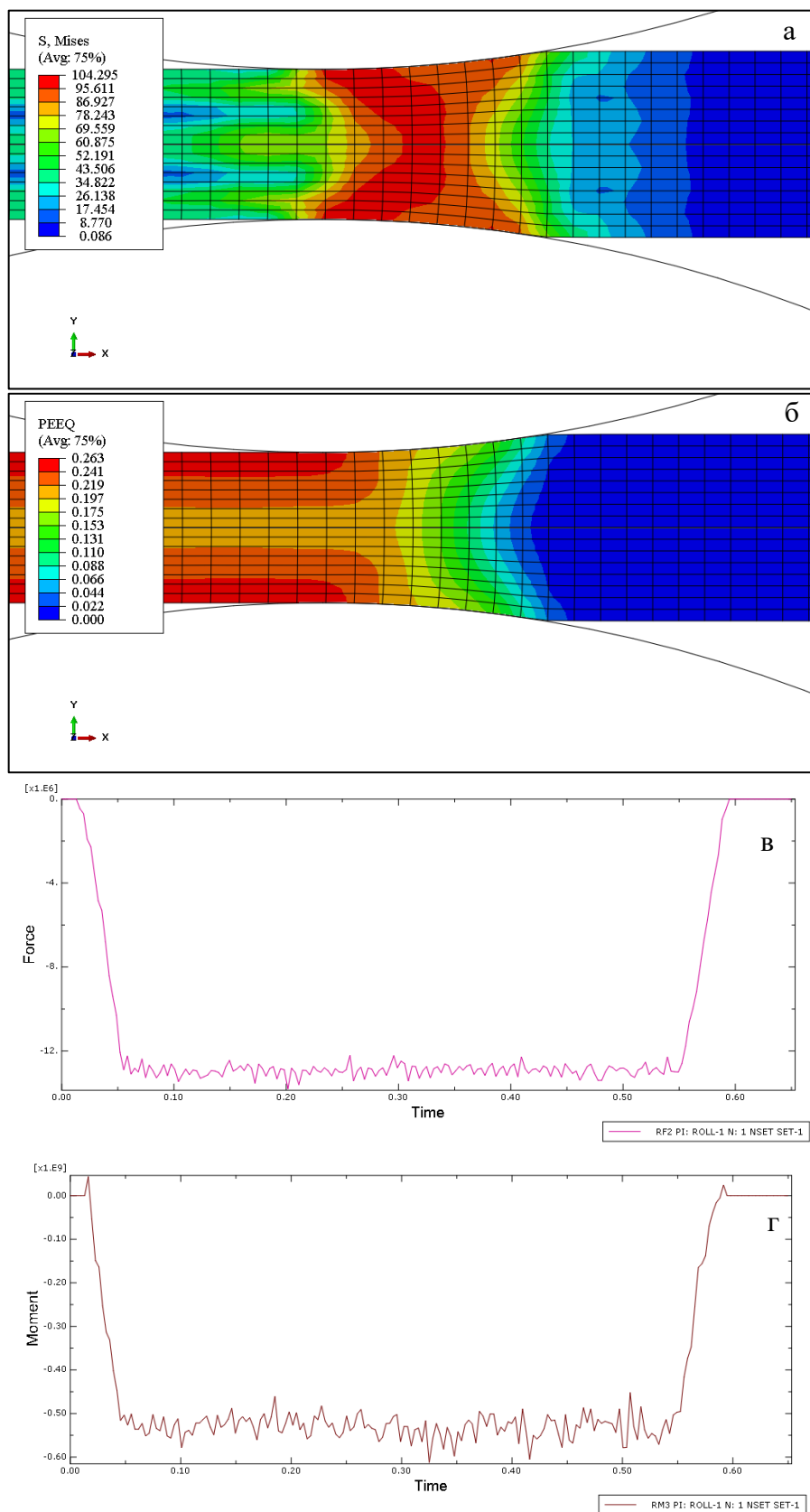


Рисунок 5.13 – Результати розрахунків полів еквівалентних напружень (а), еквівалентної пластичної деформації (б), сили прокатки (в) та моменту прокатки (г) в проході № 9 стану 3170



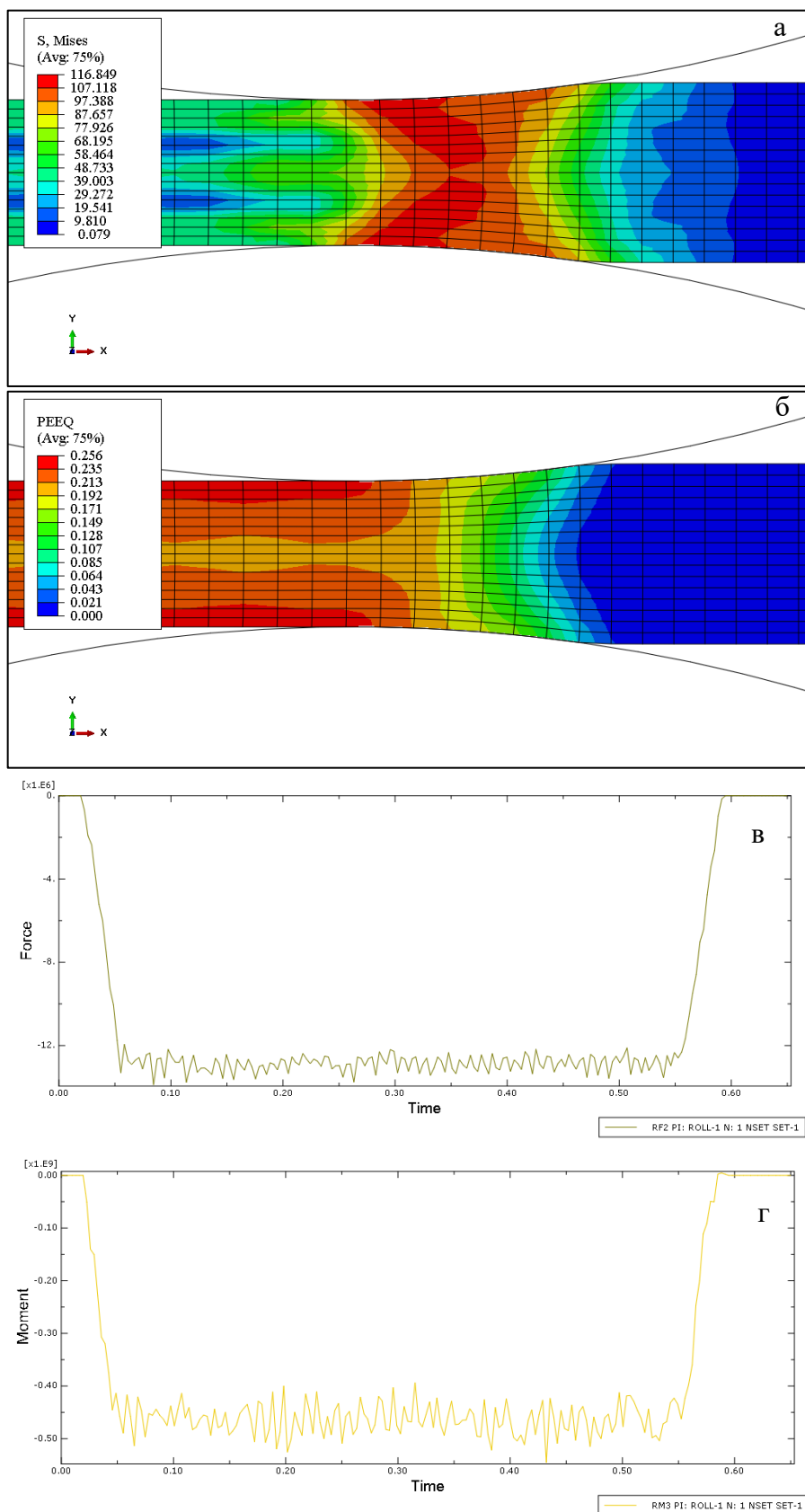


Рисунок 5.14 – Результати розрахунків полів еквівалентних напружень (а), еквівалентної пластичної деформації (б), сили прокатки (в) та моменту прокатки (г) в проході № 10 стану 3170

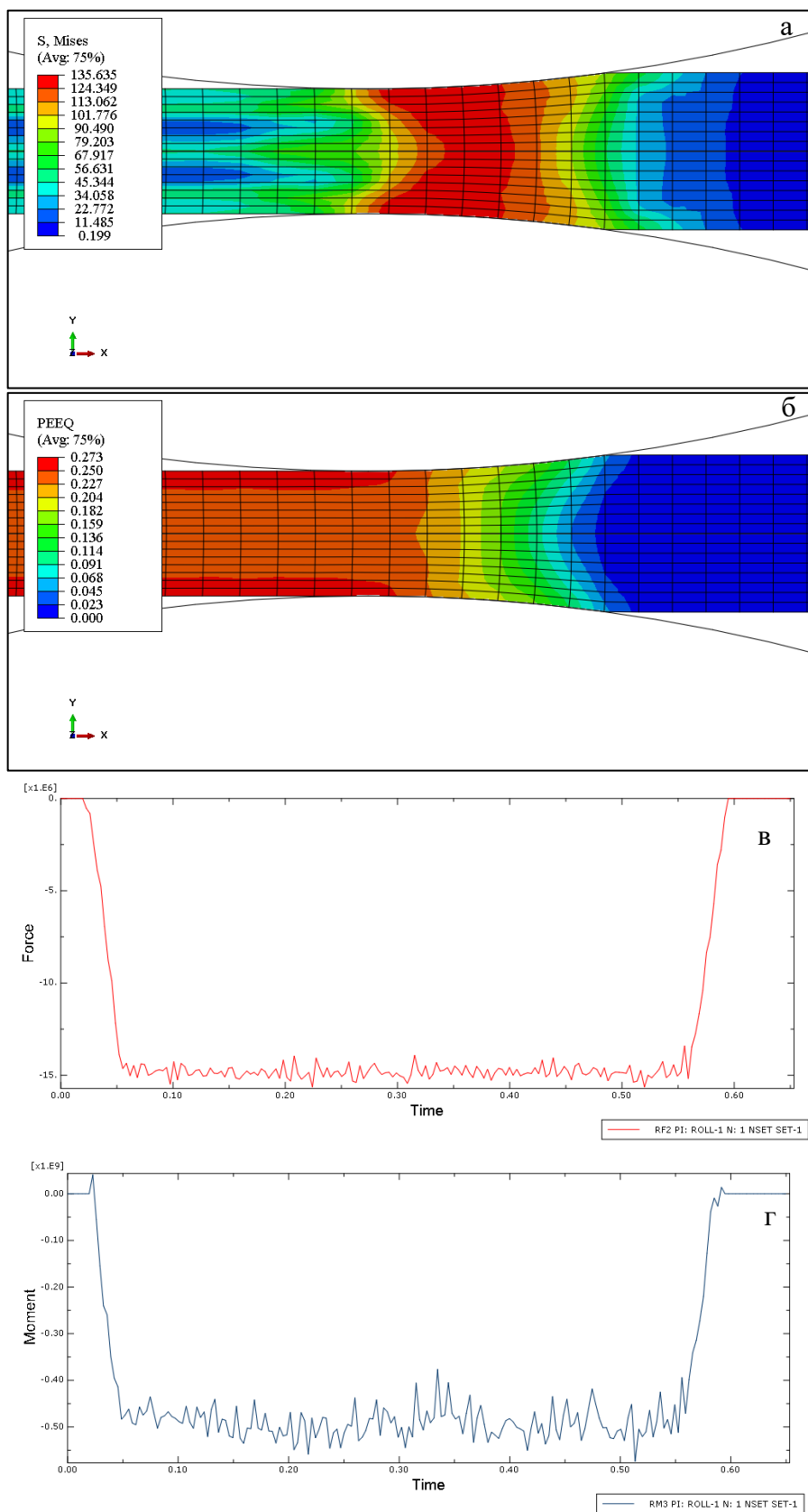


Рисунок 5.15 – Результати розрахунків полів еквівалентних напружень (а), еквівалентної пластичної деформації (б), сили прокатки (в) та моменту прокатки (г) в проході № 11 стану 3170

інших відповідних умовах прокатки. При цьому еквівалентний ступінь деформації на виході з осередку деформації по шарах, в залежності від глибини проникнення в товщину прокату, варіюється від 0,121 відн. од. до 0,208 відн. од., різниця складає 0,087 відн. од. Фактор форми  $l_d/h_{cp}$  при цьому становить 0,83.

При подальшій прокатці в наступних проходах відбувається збільшення довжини цього суцільного поля напружень, разом зі збільшенням величини еквівалентної пластичної деформації. В проході 8 вже спостерігається формування суцільного шару з максимального напруження з подальшим його розширенням та змішування з шаром напружень, який дорівнює 90 %, з урахуванням розмірів осередку деформації. При цьому еквівалентний ступінь деформації на виході з осередку деформації, в залежності від глибини проникнення в товщину прокату, варіюється від 0,184 відн. од. до 0,246 відн. од, різниця складає 0,062 відн. од. Фактор форми  $l_d/h_{cp}$  становить 1,13. На підставі отриманих результатів можна зробити висновок, що технологічна ефективність процесу прокатки, який моделюється, починає відбуватися з шостого проходу. Деформація, яка здійснюється до шостого проходу спрямована здебільшого лише на досягнення необхідної форми прокату/заготовки. Під технологічною ефективністю мається на увазі здійснення процесу прокатки з суттєвим впливом на внутрішні процеси, що відбуваються по всій товщині, а не тільки на поверхневих шарах прокату.

### **5.2.2 Результати розрахунку процесу прокатки в кліті стану 1780 (Стеккеля) в середовищі Abaqus CAE**

Результати розрахунків полів еквівалентних напружень  $S$  (по Мізесу), еквівалентної пластичної деформації  $PEEQ$ , сили прокатки  $Force$  та моменту прокатки  $Moment$  по проходах в кліті стану 1780 (Стеккеля) наведено на рис. 5.16-5.18.

При моделюванні режимів прокатки сталі марки S355JR+AR в кліті стану 1780 (Стеккеля) по всіх трьох проходах спостерігається рівномірне проникнення еквівалентних напружень на всю глибину заготовки, при інших відповідних умовах

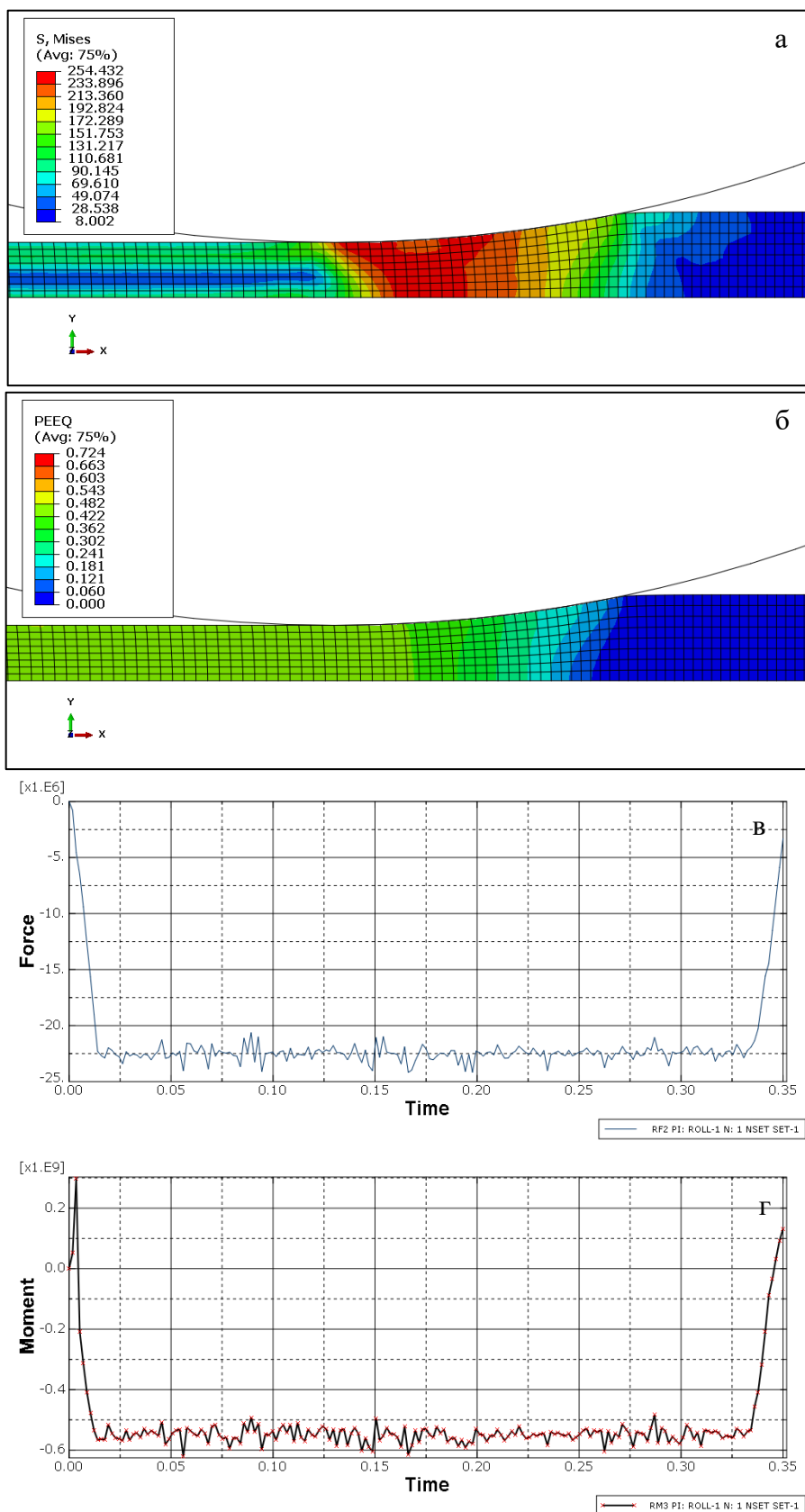


Рисунок 5.16 – Результати розрахунків полів еквівалентних напружень (а), еквівалентної пластичної деформації (б), сили прокатки (в) та моменту прокатки (г) в проході № 1 стану 1780 (Стеккеля)

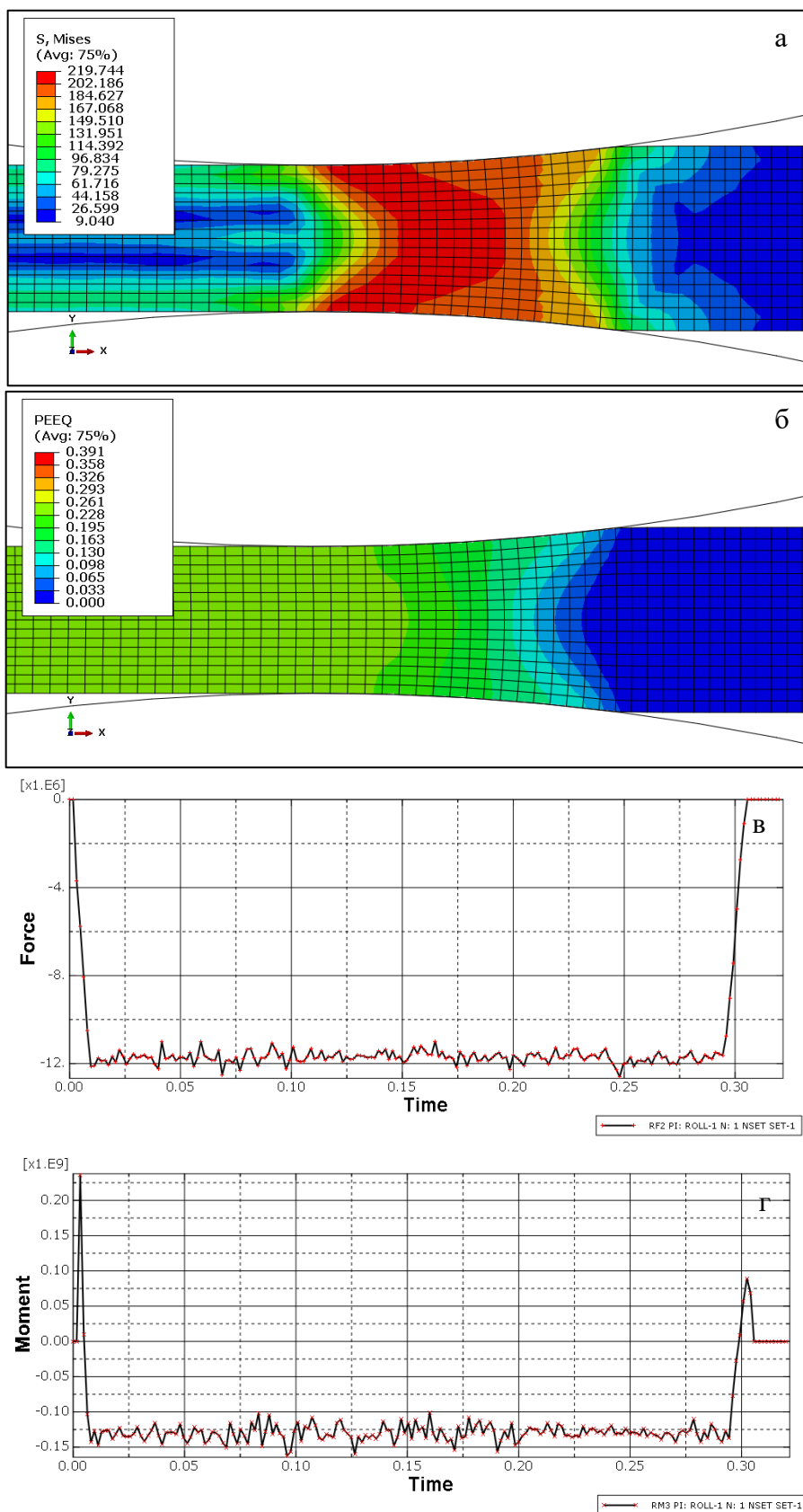


Рисунок 5.17 – Результати розрахунків полів еквівалентних напружень (а), еквівалентної пластичної деформації (б), сили прокатки (в) та моменту прокатки (г) в проході № 2 стану 1780 (Стеккеля)

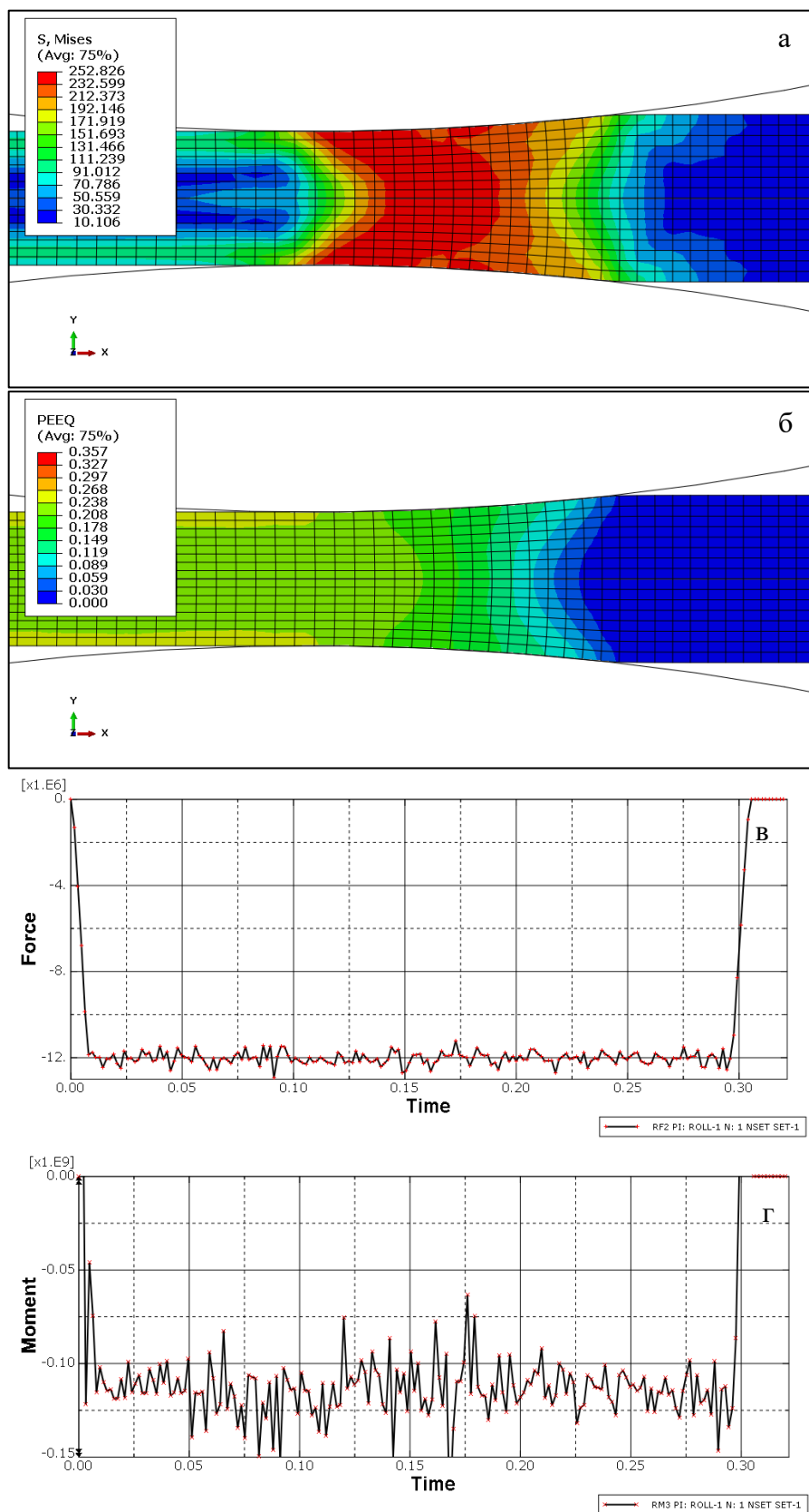


Рисунок 5.18 – Результати розрахунків полів еквівалентних напружень (а), еквівалентної пластичної деформації (б), сили прокатки (в) та моменту прокатки (г) в проході № 3 стану 1780 (Стеккеля)

прокатки. При цьому еквівалентна деформація на виході з осередку деформації по шарах є майже однаковою по всій глибини (товщині) прокату та має наступні відповідні значення: 0,422 відн. од., 0,228 відн. од., та 0,208-0,238 відн. од. Фактор форми  $l_d/h_{cp}$  по проходах становить 2,09-1,83-2,01. На підставі отриманих результатів можна зробити висновки, що при прокатці в кліті стану 1780 (Стеккеля) по всіх проходах рівномірне проникнення еквівалентних напружень та деформації здійснюється по всій товщині прокату. Максимальне еквівалентне напруження та напруження, яке дорівнює 90 % від максимального, мають суцільний шар по всій товщині прокату, з урахуванням розмірів осередку деформації.

### **5.3 Аналіз даних по результатах скінченно-елементного моделювання процесу прокатки рулонів на стані Стеккеля**

Результати розрахунків по проходах, отриманих за допомогою скінченно-елементного моделювання, порівнювали з фактичними результатами прокатки рулонів розмірами 15×1500 мм зі сталі марки S355JR+AR. Додатково, з метою виявлення відхилень, пов'язаних з фіксацією фактичних показників прокатки, виконано аналогічні розрахунки за допомогою вдосконаленої аналітичної моделі технологічного процесу прокатки [47]. Порівняння результатів розрахунків температури та сили прокатки наведено в табл. 5.4. На підставі порівняльних розрахунків встановлено, що отримані відхилення сили прокатки між двома способами розрахунку та фактичними даними мають зіставні результати та схожу тенденцію змінення по проходах, рис. 5.19 [230]. Середнє значення отриманих відхилень не перевищує 1,54 % та -1,77 % та свідчить про високу точність отриманих результатів розрахунків по обох способах [231]. Виконаний аналітичним способом перевірочний розрахунок змінення температури штаби по проходах, який було використано при математичному моделюванні, підтвердив наявність значних відхилень в фактичних температурах чорнової прокатки, що може бути пов'язане з місцем встановлення технологічних пірометрів та наявністю пари.

Таблиця 5.4 – Порівняння фактичних результатів прокатки рулонів розмірами 15×1500 мм зі сталі марки S355JR+AR на стані Стеккеля з результатами розрахунків

Прокатний стан	№ проходу	H, мм	h, мм	Ступінь деформації, %	Фактичні дані		Розрахунок в аналітичній моделі		Розрахунок в Abaqus в CAE	Відхилення розрахунків сили прокатки, %	
					t, °C <sup>a</sup>	Сила прокатки, МН×10 <sup>-2</sup>	t, °C <sup>a</sup>	Сила прокатки, МН×10 <sup>-2</sup>		Abaqus від факту	Аналітич на від факту
Стан 3170	1	221,3	200,49	9,40	1090	1007	1200	867,78	923,42	8,30	13,83
	2	200,49	178,82	10,81	1068	904	1194	946,42	970,29	-7,33	-4,69
	3	178,82	158,36	11,44	1068	1000	1187	965,31	963,11	3,69	3,47
	4	158,36	139,55	11,88	1044	1017	1179	970,42	943,00	7,28	4,58
	5	139,55	120,54	13,62	1073	1015	1169	1060,42	1011,41	0,35	-4,47
	6	120,54	103,88	13,82	1023	1077	1158	1048,15	981,68	8,85	2,68
	7	103,88	87,23	16,03	1055	1121	1144	1163,62	1088,26	2,92	-3,80
	8	87,23	71,81	17,68	1009	1243	1127	1243,94	1174,54	5,51	-0,08
	9	71,81	57,87	19,41	1027	1254	1105	1341,91	1291,21	-2,97	-7,01
	10	57,87	46,82	19,09	1027	1246	1076	1350,15	1288,40	-3,40	-8,36
	11	46,82	37,16	20,63	1041	1397	1037	1532,49	1484,29	-6,25	-9,70
Середнє										1,54	-1,23
Стан 1780	1	37,16	23,95	35,55	999	1957	999	1900,98	2253,24	-15,14	2,86
	2	23,95	18,98	20,75	958	1351	973	1173,79	1169,96	13,40	13,12
	3	18,98	15,17	20,07	920	1195	931	1236,66	1202,42	-0,62	-3,49
Середнє										0,38	-1,77

<sup>a</sup> вказана температура перед проходом

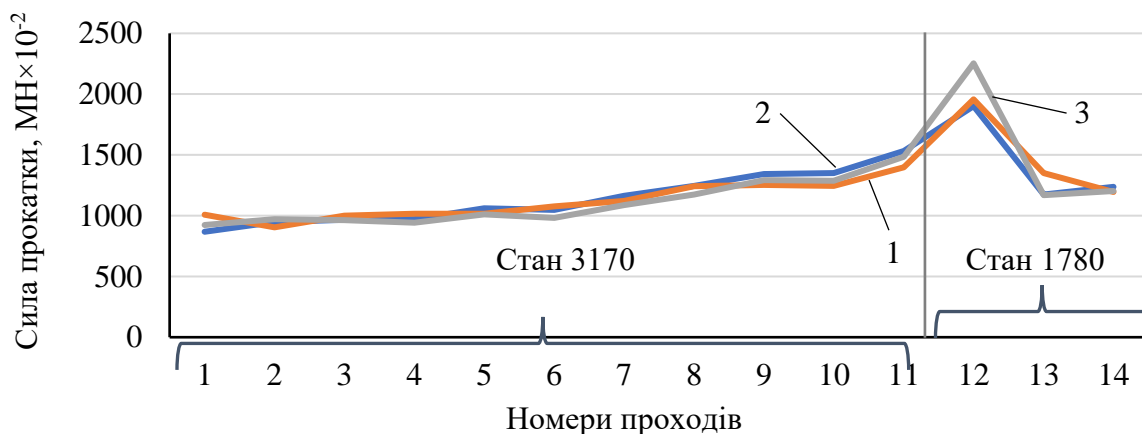


Рисунок 5.19 – Змінення сили прокатки по проходах по фактичних даних (1), по аналітичних розрахунках (2), по результатах математичного моделювання (3)

Таким чином підтверджено правомірність використання розрахованих



аналітичним способом температур прокатки для скінченно-елементного моделювання.

Розподіл еквівалентних напружень по Мізесу та еквівалентної деформації по проходах в клітях стану 3170 та 1780 виглядає наступним чином, рис. 5.20.

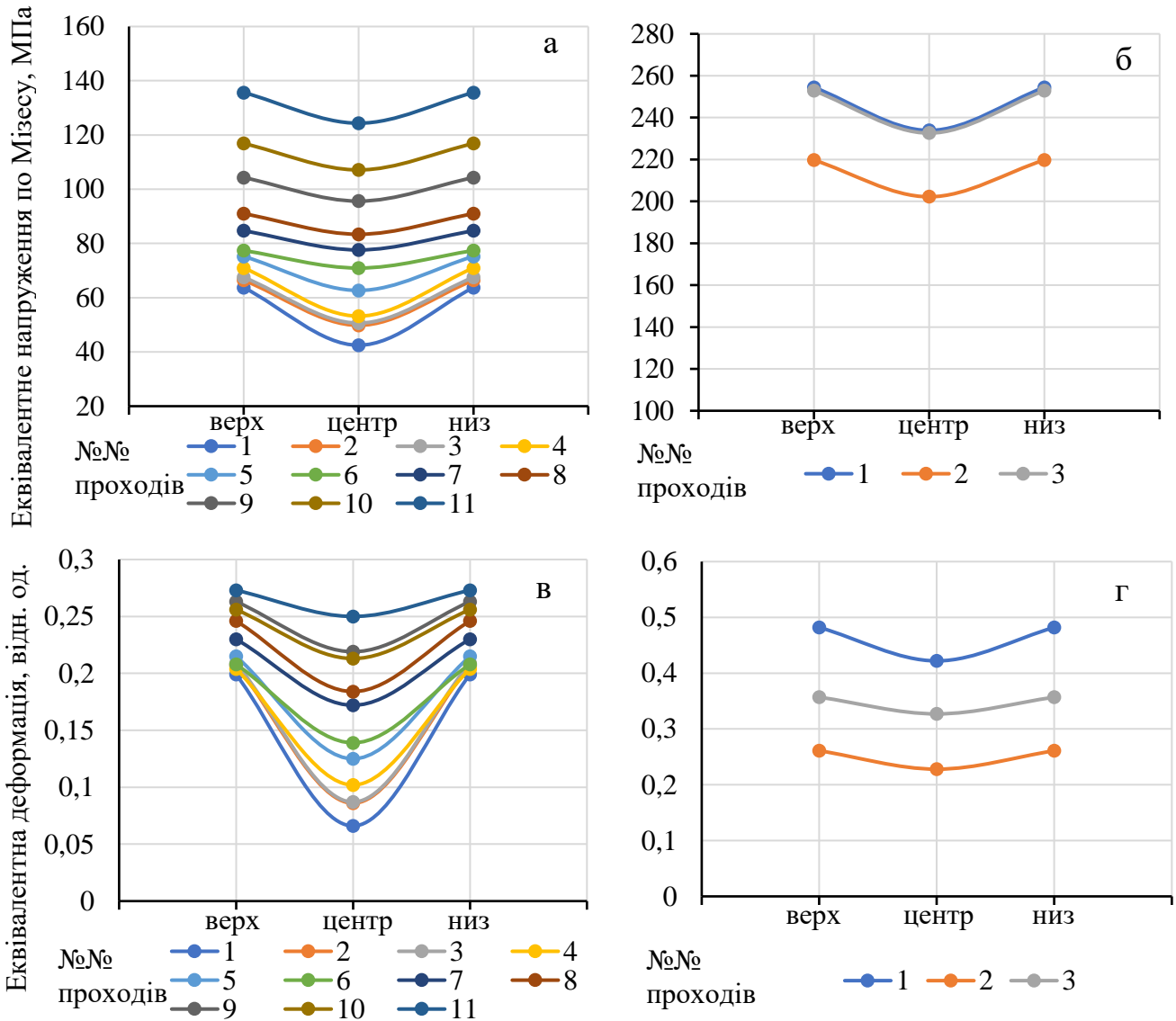


Рисунок 5.20 – Розподіл по проходах в кліті 3170 та кліті 1780 еквівалентних напружень по Мізесу (а), (б), та еквівалентної деформації (в), (г) відповідно

Таким чином, в кліті 3170, по проходах відбувається збільшення інтенсивності еквівалентних напружень по Мізесу, а, відповідно і еквівалентної деформації в центральній частині штаби (заготовки) по відношенню до верхніх та нижніх шарів

заготовки. В кліті 1780 такої залежності не встановлено, інтенсивність еквівалентної деформації та еквівалентних напружень по Мізесу по шарах перерізу є майже однаковою по всіх проходах.

Для встановлення аналітичним методом умов прокатки при яких забезпечується рівномірність розподілу еквівалентних напружень та еквівалентної деформації по товщині, що виражена коефіцієнтом  $K_{нд}$ , на рівні 90 % та характеризує проникнення максимального еквівалентного напруження та еквівалентної деформації в центральну частину заготовки, для умов прокатки на стані 3170 та стані 1780, побудуємо наступні графіки, рис. 5.21, 5.22.

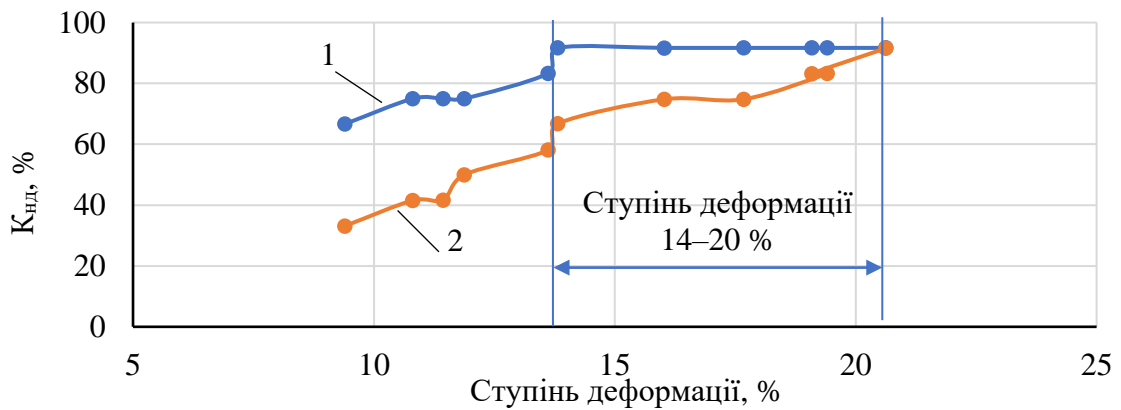


Рисунок 5.21 – Залежність коефіцієнту  $K_{нд}$  для рівня еквівалентних напружень (1) та еквівалентної деформації (2) від ступеня деформації на стані 3170

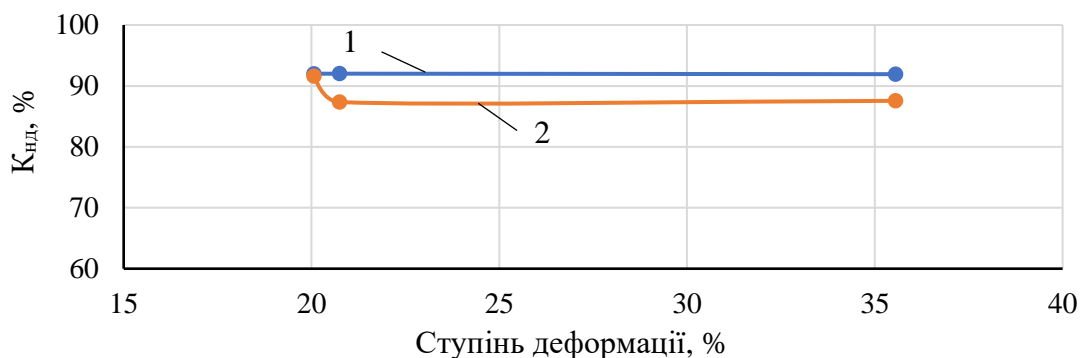


Рисунок 5.22 – Залежність коефіцієнту  $K_{нд}$  для рівня еквівалентних напружень (1) та еквівалентної деформації (2) від ступеня деформації на стані 1780

Оцінку залежності коефіцієнту  $K_{нд}$  для еквівалентного напруження та деформації від форми осередка деформації  $l_d/h_{ср}$  виконано на підставі даних, рис. 5.23.

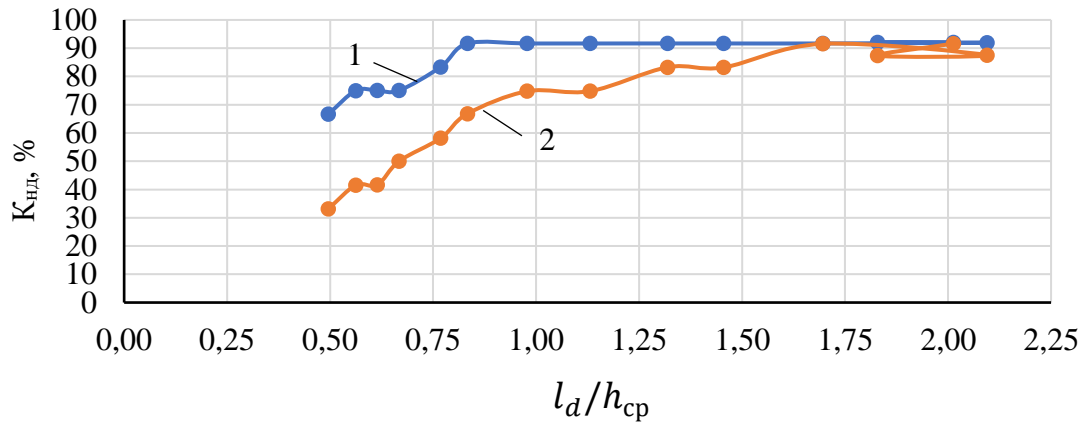


Рисунок 5.23 – Залежність коефіцієнту  $K_{нд}$  для рівня еквівалентних напружень (1) та еквівалентної деформації (2) від форми осередка деформації  $l_d/h_{ср}$

Таким чином, отримання коефіцієнту  $K_{нд}$  для еквівалентного напруження на рівні 90 % в центральній частині заготовки, або інакше рівномірності еквівалентного напруження, яке дорівнює 90 % по перерізу заготовки, забезпечується при ступені деформації 14 %, що відповідає деформації в 6 проході чорнової кліті стану Стеккеля.

Рівномірність проникнення еквівалентної деформації  $K_{нд}$ , яка дорівнює 90 %, по перерізу заготовки, забезпечується при ступені деформації 20 %, що відповідає деформації в 11 проході чорнової кліті стану Стеккеля.

На підставі отриманих результатів аналізу рівномірності проникнення по перерізу заготовки коефіцієнту  $K_{нд}$  для еквівалентного напруження та еквівалентної деформації можна встановити деформаційні умови при чорновій прокатці, які знаходяться в межах від 14 % до 20 %, та дійсні для форми осередку деформації від 0,83 або більше, і забезпечують покращення рівномірності успадкованих параметрів якості по перерізу в кінцевому прокаті.

При чистовій прокатці, на стані 1780, по всіх проходах в умовах квазістаціонарного розподілу температур на стані Стеккеля умови прокатки є

достатніми для забезпечення рівномірності розподілу коефіцієнту  $K_{нд}$  еквівалентних напружень та еквівалентної деформації на рівні 90 %.

Слід зазначити, що розраховані коефіцієнти  $K_{нд}$  по стану 3170 та стану 1780 не перевищують значення 0,92 %, тому, збільшення обтиснення більше ніж 20 % не впливає на підвищення рівномірності проникнення напружень та деформації по товщині.

Застосування коефіцієнту  $K_{нд}$  для визначення рівномірності проникнення як еквівалентного напруження так і по еквівалентної деформації пов'язано з можливістю його використання для обох вказаних характеристик. Так як процеси рекристалізації пов'язані з напруженням, для керування властивостями прокату, що успадковуються, при розробці технології рекомендується використовувати коефіцієнти  $K_{нд}$  визначені для еквівалентного напруження.

Отримані методом математичного моделювання результати по необхідному рівню деформації для забезпечення внутрішньої якості прокату на стадії чорнової прокатки є порівняльними з дослідженнями, виконаними з використанням залежностей Холла-Петча, з встановлення рівня деформації для забезпечення якомога дрібнішого розміру зерна, та доповнюють дослідження, виконані авторами роботи [200], в тому числі в частині встановлення проникнення рівня деформації по товщині.

Таким чином, отримані результати дозволяють керувати процесами внутрішньої якості та комплексом властивостей прокату, які необхідно отримати шляхом розробки відповідних технологічних режимів із врахуванням ступеня деформації.

## **Висновки**

1. По результатах моделювання методом скінченних елементів в умовах стану Стеккеля отримано розподіл полів еквівалентних напружень та еквівалентної деформації по проходах, розраховано енергосилові параметри процесу прокатки. При порівнянні енергосилових параметрів, отриманих методом скінченних елементів та

розрахованих аналітичним методом з фактичними даними по результатах прокатки рулонів розмірами 15×1500 мм з конструкційної сталі марки S355JR+AR на стані Стеккеля, середнє значення відхилень не перевищує 1,54 % та - 1,77 % відповідно, що свідчить про високу точність отриманих результатів обома способами розрахунку. Встановлено, що максимальний розподіл рівномірності деформації по товщині підкату, який характеризується коефіцієнтом  $K_{нд}$ , при прокатці конструкційної марки сталі типу S355JR+AR забезпечується при наступних умовах: температурі  $\leq 1150$  °С, ступені деформації  $\geq 14$  % та показнику осередку деформації  $\geq 0,83$ . Значення коефіцієнту  $K_{нд}$  при цих параметрах становить 90 %.

2. Встановлено, що при чистовій прокатці по всіх проходах в умовах квазістаціонарного розподілу температур на стані Стеккеля деформація, яка відбувається, забезпечує отримання коефіцієнту  $K_{нд}$  на рівні 90 %.

3. Визначено, що в досліджених межах параметрів прокатки конструкційної марки сталі типу S355JR+AR – температура прокатки 1200-1037 °С, ступені деформації 0,09-0,35 відн. од, показнику осередку деформації 0,5-2,09, коефіцієнт  $K_{нд}$  не перевищує значення 92 %, тому обтиснення  $\geq 20$  % забезпечує найкращу рівномірність деформації по товщині розкату в дослідженому діапазоні.

4. Отримані результати по визначенню умов забезпечення розподілу максимальної рівномірності деформації методом скінченно-елементного моделювання дозволяють керувати процесами внутрішньої якості та комплексом властивостей прокату, які необхідно отримати шляхом розробки відповідних технологічних режимів. Отримані результати можуть бути використані для розробки технології гарячої прокатки (з однією або кількома стадіями чорнової прокатки) на інших типах станів та комплексів основного устаткування зі схожими технологічними параметрами.

## РОЗДІЛ 6

### ПРОМИСЛОВА РЕАЛІЗАЦІЯ РОЗРОБКИ ТА ВИРОБНИЦТВА ПРОДУКЦІЇ СПОСОБОМ ТЕРМОМЕХАНІЧНОЇ ПРОКАТКИ

#### 6.1 Розробка технології в межах внутрішньої координації між підприємствами однієї компанії

##### 6.1.1 Розробка технології виробництва листового прокату розмірами 4×3125×16000 на стані 3200 заводу Trameal, Італія, зі слябу товщиною 220 мм

В даному розділі наведено результати розробки технологічних рекомендацій та промислове впровадження технологічних процесів із засвоєння виробництва нових продуктів, на підставі аналізу ринку, попиту Замовників, приведення рівня сортаменту, що виробляється до рівня, який відповідає сучасним світовим вимогам та тенденціям, а також досягнення сучасного рівня якості продукції.

Однією з гілок досягнення мети в межах однієї компанії є внутрішня координація між підприємствами, яка дозволяє за рахунок використання необхідної промислової потужності на різних підприємствах однієї компанії, отримати необхідний консолідований результат.

Відомо, що товстолистові стани спеціалізуються на виробництві прокату товщиною від 5 мм та більшою. Однак попит ринку потребує виробництва більш тонкого прокату в сортаменті ширин, які виробляються на товстолистових станах і які, зазвичай, не можуть бути замінені сортаментом безперервних станів гарячої прокати. Для виробництва прокату товщиною менше 5 мм здебільшого використовують сляби меншої товщини, цільове використання яких – рулонний прокат, це порушує баланс металу на підприємствах та змушує змінювати виробничі пріоритети.

Актуальність розробки та оптимізації технології прокату листів товщиною 4 мм зі слябу товщиною 220 мм замість слябів товщиною 150 мм на заводі Trameal

обумовлена потребою в розширенні сортаменту, а також недостатнім обсягом слябів товщиною 150 мм в компанії METINVEST.

Метою даного дослідження є розробка технології виробництва прокату товщиною 4 мм при використанні безперервно литих слябів товщиною 220 мм замість слябів товщиною 150 мм для умов стану 3200 заводу Trametel, Італія.

Детальний сортамент, що виробляється, перелік та характеристики основного устаткування стану 3200 наведені в розділі 1.3.1.3.

Для проектування технології було виконано перевірку розробленої аналітичної моделі технологічного процесу прокатки [57, 59], яку буде використано задля подальших розрахунків.

Перевірку було виконано на фактичних даних з температури та сили прокатки, які були отримані при прокатці листів розмірами 5×3125×12000 мм зі сталі категорії A320, сляб №1TL5800906 з фактичними розмірами 217×1355×780 мм. Технічний звіт по фактичних параметрах прокатки наведений в додатку І.

Результати моделювання наведені на рис. 6.1, 6.2.

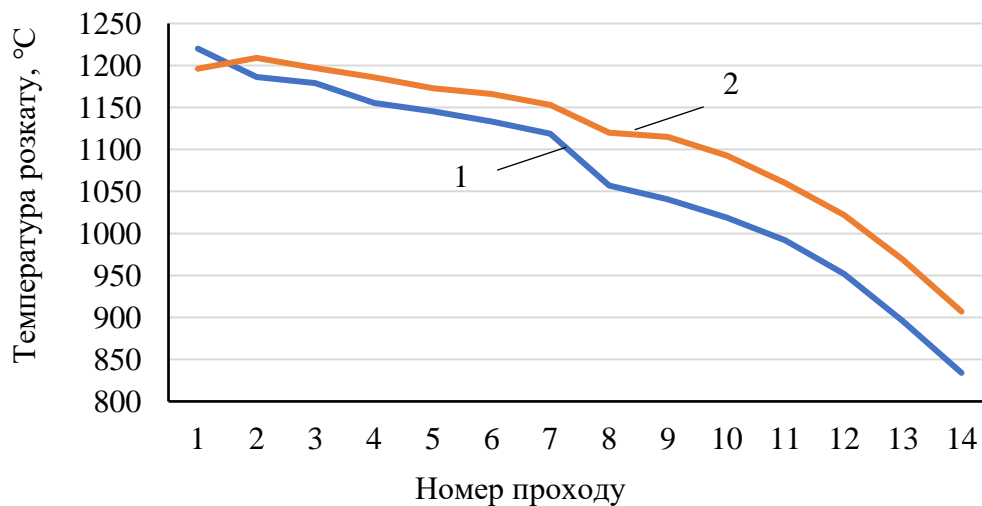


Рисунок 6.1 – Змінення розрахованої (1) та фактичної (2) температури по проходах в кліті 3200

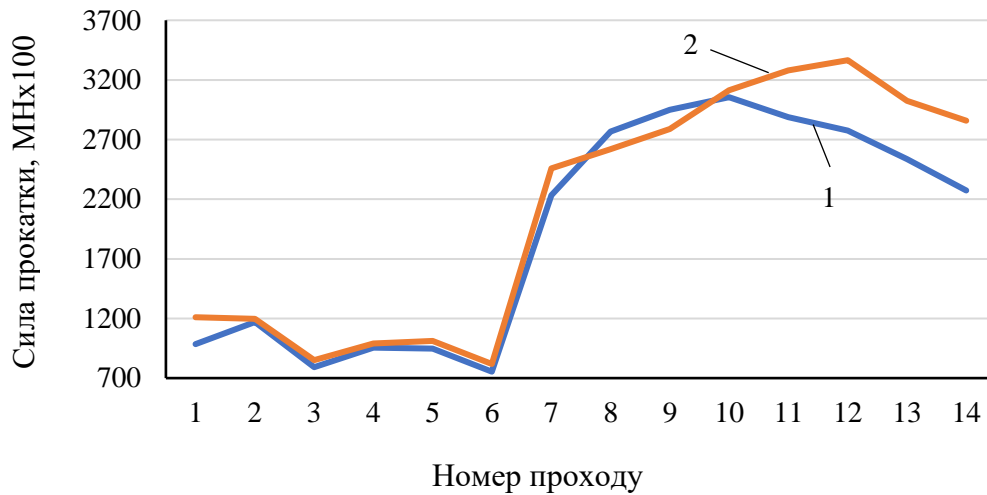


Рисунок 6.2 – Змінення розрахованої (1) та фактичної (2) сили прокатки по проходах в кліті 3200

Результати розрахунку для перевірки аналітичної моделі наведені у табл. 6.1 [232]. Середня похибка при моделюванні температурного режиму прокатки склала 4,3 %, при моделюванні сили прокатки - 7,9 %. Слід зазначити, що достатньо великі похибки по силі прокатки у проході №1 пов'язані зі зміною температури металу після гідрозбиву окалини, а у проходах №№11-14 отримані у наслідок впливу переохолоджених торців прокату, які не враховувались при моделюванні внаслідок відсутності фактичних даних по температурі цих ділянок. Підтвердженням впливу переохолоджених торців є перевищення фактичної сили прокатки у проходах №№11-14 з одного боку.

Таким чином отримані похибки температури та сили прокатки дозволяють виконати моделювання технології для стану 3200 заводу Trametel. Слід зазначити, що при максимальній силі прокатки 40 МН, фактична сила не перевищує 33,6 МН, що свідчить про наявність резерву який можливо використати.

Перевірка необхідної потужності головних двигунів через середньоквадратичні моменти показала наявність суттєвого резерву, при сумарній потужності двох двигунів 7000 кВт, фактична потужність при прокатці розрахованого сортаменту не перевищила 2900 кВт.



Таблиця 6.1 – Результати перевірного розрахунку аналітичної моделі

№ проходу	H, мм	h, мм	B, мм	Температура прокатки, °С			Сила прокатки, МН×10 <sup>-2</sup>			
				Розрахунок	факт	Δ, %	Розрахунок	факт	Δ, МН×10 <sup>-2</sup>	Δ, %
1	217	182,16	1387	1220,0	1196	-2,0	985,3	1209,3	224,0	18,5
2	182,16	146,41	1387	1186,1	1209	1,9	1169,4	1196,9	27,5	2,3
3	146,41	123,64	1200	1178,9	1197	1,5	792,2	849,9	57,7	6,8
4	123,64	98,83	1200	1155,4	1186	2,6	956,7	991,1	34,4	3,5
5	98,83	77,47	1200	1145,5	1173	2,3	948,0	1010,8	62,8	6,2
6	77,47	64,0	1200	1133,2	1166	2,8	754,3	818,5	64,2	7,8
7	64,0	50,2	3146	1118,9	1153	3,0	2234,2	2457,9	223,7	9,1
8	50,2	37,58	3146	1057,1	1120	5,6	2765,7	2618,7	-147,0	-5,6
9	37,58	26,56	3146	1040,6	1115	6,7	2949,7	2788,9	-160,8	-5,8
10	26,56	17,85	3146	1018,9	1093	6,8	3055,0	3113,7	58,7	1,9
11	17,85	12,09	3146	991,7	1060	6,4	2887,5	3280,4	392,9	12,0
12	12,09	8,42	3146	951,7	1022	6,9	2773,8	3365,1	591,3	17,6
13	8,42	6,36	3146	895,9	969	7,5	2535,9	3025,7	489,8	16,2
14	6,36	5,22	3146	834,0	907	8,0	2274,4	2857,3	582,9	20,4
Середня похибка						4,3				7,9

В таблиці 6.1, «H» та «h» - це товщина розкату до та після проходу в кліті, «B» - ширина прокату.

На основі виконаного аналізу пропонується декілька наступних варіантів технології виробництва прокату товщиною 4 мм зі слябів «МК «АЗОВСТАЛЬ» товщиною 220 мм [233].

Розробка технології виробництва листового прокату розмірами 4×3125×16000 мм зі слябів товщиною 220 мм сталі марки А320 (аналог марки S355 згідно з вимогами стандарту EN 10025-2) здійснювалась для умов стану 3200 заводу Trametel.

Хімічний склад сталі, яка використовується, наведено в табл. 6.2.

З метою мінімізації змін до існуючого регламенту роботи устаткування стану 3200 заводу Trametel при проектуванні технології розрахований рівень енергосилових

Таблиця 6.2 – Хімічний склад сталі марки А320, з якої вироблявся прокат

Марка сталі	Масова доля елементів, %															
	C	Mn	Al	Nb	Si	S	P	Cu	Ni	Cr	V	Mo	Ti	N	B	H
	не більше, або в межах															
A320	0,14-0,16	1,35-1,50	0,020-0,050	0,005	0,20-0,30	0,005	0,020	0,07	0,05	0,05	0,01	0,02	0,005	0,012	0,0005	0,0005

параметрів тримався на рівні, який фактично використовується згідно з існуючою технологією.

Перший варіант технології

Розбивка розкату до отримання необхідної ширини готового прокату виконується однаково у всіх варіантах.

У всіх варіантах початкова температура прокатки складає 1220 °С. Товщина та ширина в таблицях вказані у гарячому стані.

Результати розрахунку наведені в табл. 6.3.

Таблиця 6.3 – Розрахунок режимів прокатки листів розмірами 4×3125×16000, варіант 1

№ проходу	H, мм	h, мм	B, мм	Температура прокатки, °С	Час паузи, с	Швидкість, м/с	Сила прокатки, МН×10 <sup>-2</sup>
1	219,4	180	1373	1220	58	1,92	1079,2
2	180	146	1373	1175	6	2,00	1177,7
3	146	125	1200	1168	30	2,11	787,9
4	125	98	1200	1138	6	2,23	1105,0
5	98	77	1200	1130	6	2,27	1019,8
6	77	63	1200	1117	6	2,34	851,1
7	63	48	3181	1104	30	2,11	2629,9
8	48	36	3181	1047	6	2,23	2955,9
9	36	26	3181	1031	7	2,31	3036,4
10	26	18	3181	1001	7	2,50	3251,4
11	18	12	3181	970	6	2,73	3417,3
12	12	8,2	3181	930	6	2,88	3304,9
13	8,2	5,8	3181	873	6	3,23	3412,7
14	5,8	4,6	3181	801	6	3,42	3016,6
15	4,6	4	3181	720	6	3,54	2683,5

Перший варіант характеризується використанням часу пауз, який звичайно використовуються при прокатці на стані 3200.

Сила прокатки у проходах №11 та №13 з урахуванням додаткового підвищення до 600 МНх100 від впливу переохолоджених торців наближується до максимальної сили згідно з характеристиками стану, що становить певний ризик.

Температура закінчення прокатки становить 720 °С, що відповідає умовам контрольованої прокатки або прокатки ТМСР, і не відповідає умовам гарячої або нормалізувальної прокатки. Реалізація такого варіанту технології буде мати суттєві обмеження сортаменту, який виробляється.

#### Другий варіант технології

У другому варіанті технології час пауз між проходами був скорочений до рівня, який застосовується на товстолистових станах гарячої прокатки, наприклад, на стані 3600 «МК «АЗОВСТАЛЬ», та стані 3000 «ММК «ИМЕНИ ІЛЛЧА». Також зниження часу пауз (до 10 с замість 58 с та 30 с відповідно) між проходами підтверджене фактичними даними при прокатці листів товщиною 4,5×2585мм зі сляба товщиною 150 мм на стані 3200 заводу Trameal. Результати розрахунку наведені в табл. 6.4.

Таблиця 6.4 – Розрахунок режимів прокатки листів розмірами 4×3125×16000, варіант 2

№ проходу	H, мм	h, мм	B, мм	Температура прокатки, °С	Час паузи, с	Швидкість, м/с	Сила прокатки, МН×10 <sup>-2</sup>
1	219,4	180	1373	1220	10	1,92	1079,2
2	180	146	1373	1210	5	2,00	1065,7
3	146	125	1200	1203	10	2,11	712,8
4	125	98	1200	1188	5	2,23	954,2
5	98	77	1200	1179	5	2,27	882,2
6	77	63	1200	1165	5	2,34	737,6
7	63	48	3181	1151	10	2,11	2280,0
8	48	32	3181	1122	5	2,23	2909,9
9	32	20	3181	1102	5	2,31	2923,9
10	20	12	3181	1063	5	2,50	2979,1
11	12	7,5	3181	1013	5	2,73	2837,0
12	7,5	5	3181	934	5	2,88	2926,9
13	5	4	3181	826	5	3,23	2493,7

За рахунок зменшення часу пауз вдалось підвищити температуру металу по проходах, що призвело до зниження сили прокатки.

Зниження навантаження по проходах дозволило оптимізувати увесь режим прокатки шляхом зменшення кількості проходів до 13-ти та отримати температуру закінчення прокатки на рівні 826 °С.

Сила прокатки в усіх проходах з урахуванням додаткового підвищення до  $600 \text{ MN} \times 10^{-2}$  від впливу переохолоджених торців не перевищує максимальної сили, згідно з характеристиками стану.

Такий варіант дозволяє виробляти прокат без технологічних обмежень, тобто за технологією гарячої, нормалізувальної, контрольованої прокатки або ТМСР.

Для останніх двох технологій необхідно буде зробити паузу перед останніми проходами з метою виконання деформації в зоні міжкритичного перетворення, або в зоні вже утвореного  $\alpha$ -заліза, залежно від вимог.

Порівняння зниження температури та зменшення часу пауз по двох варіантах наведено на рис. 6.3.

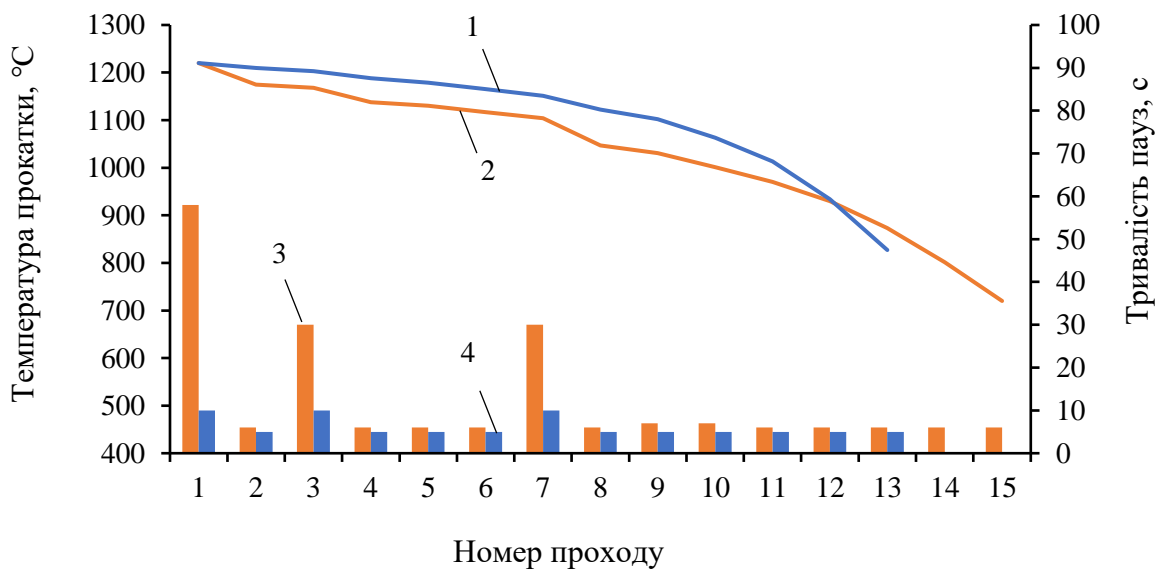


Рисунок 6.3 – Змінення розрахованої температури по варіанту 1 (1), варіанту 2 (2), та тривалості пауз по варіанту 1 (3), варіанту 2 (4) по проходах в кліті 3200

Порівняння двох варіантів технології свідчить про суттєві технологічні переваги варіанту 2, які формуються вже на перших шістьох проходах при розбивці ширини.

Таким чином, шляхом внутрішньої координації між підприємствами компанії МЕТИНВЕСТ, розроблена технологія виробництва прокату товщиною 4 мм на стані 3200 заводу Trametel зі слябів товщиною 220 мм (замість слябу 150 мм) виробництва «МК «АЗОВСТАЛЬ». Нова технологія дозволяє ліквідувати дефіцит слябу 150 мм в компанії та задовільнити вимоги європейських Замовників з виробництва широкого прокату товщиною 4 мм.

По результатах даного дослідження виконано перевірку розробленої аналітичної моделі на фактичних даних, отриманих на стані 3200 заводу Trametel. Середня похибка при моделюванні температурного режиму прокатки склала 4,3 %, при моделюванні сили прокатки 7,9 %.

Показана принципова можливість використанні слябу товщиною 220 мм замість слябу товщиною 150 мм для виробництва прокату товщиною 4 мм на стані 3200 заводу Trametel.

Розроблена технологія прокатки листів розмірами 4×3125×16000 мм зі слябу розмірами 217×1355×780 мм, яку можливо використовувати для виробництва прокату способом гарячої, нормалізувальної, контрольованої або термомеханічної прокатки не обмежуючи існуючий марочний сортамент.

## **6.1.2 Розробка технології виробництва термомеханічного прокату на стані Стеккеля**

### **6.1.2.1 Уточнення розрахунку теплових втрат металу на станах Стеккеля**

У деяких випадках, розробка нової технології потребує поглибленого вивчення та адаптації окремих етапів проектування, наприклад врахування особливостей теплових втрат металу, вдосконалення та перевірка точності розрахунків за допомогою аналітичних моделей, що використовуються.

При проектуванні технології важливо щоб розрахунки, які були виконані, з достатньою точністю описували технологічні процеси. Особливо важлива точність

при проектуванні технології ТМСР, яка отримала широке застосування у наслідок своєї економічності та досягнення унікального комплексу властивостей. Ця технологія реалізується в достатньо вузькому діапазоні температур  $\gamma - \alpha$  перетворень. Розробка технології ТМСР для умов станів Стеккеля потребує особливого підходу до розрахунків температурних параметрів, з урахуванням особливостей цих станів.

Серед існуючих прокатних комплексів, стани Стеккеля займають особливе місце.

Актуальність розрахунків температурних процесів прокатки на станах Стеккеля обумовлена потребою в розширенні сортаменту та технічних можливостей при виробництві рулонного прокату, в тому числі на заводі Ferriera Valsider.

Метою дослідження є уточнення методики розрахунку змінення температури металу при прокатці на станах Стеккеля, яка враховує фактори швидкості руху полоси, довжину рольгангу та довжину дуги контакту металу з валками, а також фактори, які впливають на температуру розкату в пічних моталках, стосовно до умов стану Стеккеля заводу Ferriera Valsider.

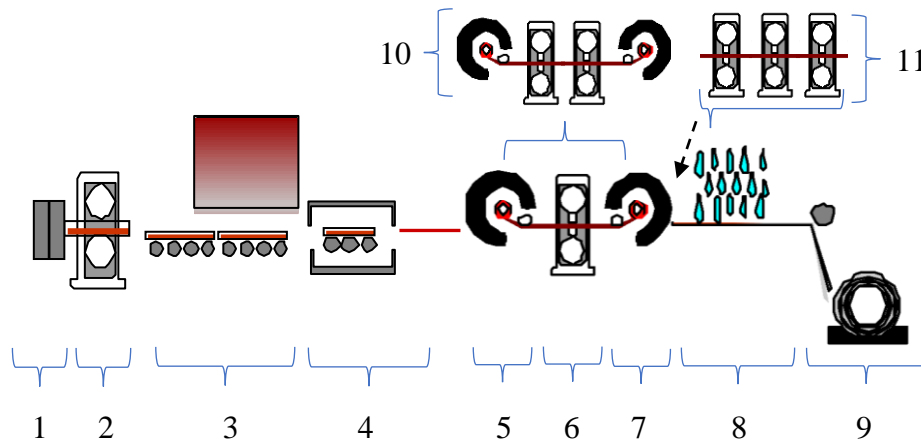
Схему розміщення основного устаткування стану Стеккеля заводу Ferriera Valsider, та деяких існуючих варіантів розміщення устаткування станів Стеккеля, наведено на рис. 6.4.

Детальній сортамент, що виробляється, перелік та характеристики основного устаткування заводу Ferriera Valsider наведені в розділі 1.3.3.

Відмінною особливістю розрахунку температурного режиму прокатки на стані Стеккеля є необхідність врахування додатково до відомих факторів [126-128], фактору зміни температури металу в пічних моталках, а також особливостей розрахунку змінення температури розкату на ділянці «стан – пічні моталки».

Сумарний час, який витрачається на втрати тепла випромінюванням та конвекцією на станах Стеккеля визначається по методиці аналогічній той, що застосовується для чистових груп безперервних станів:

$$\tau_{\Sigma} = \tau + \tau_{t1}, \quad (6.1)$$



- |                                      |   |
|--------------------------------------|---|
| 1 – кліть з вертикальними валками;   | 6 – кліть «кварто» 1780 стану Стеккеля;       |
| 2 - чорнова кліть 3170;              | 8 - установка ламінарного охолодження;        |
| 3 - методична штовхальна піч;        | 9 – моталка;                                  |
| 4 - прохідна роликів піч;            | 10 – стан з двома чистовими клітьями кварто;  |
| 5, 7 – пічні моталки стану Стеккеля; | 11 – стан з додатковою групою чистових клітей |

Рисунок 6.4 – Схема технологічної лінії з виробництва гарячекатаних рулонів на заводі Ferriera Valsider та деякі існуючих варіантів розміщення устаткування станів Стеккеля

де  $\tau$  – час, який витрачається на прокатку розкату в кліті, сек;  $\tau_{t1}$  – час транспортування розкату між кліттю та пічною моталкою, с.

Час, який витрачається на прокатку в кліті, рахується по формулі:

$$\tau = \frac{l_g}{v_{roll} \times 1000}, \quad (6.2)$$

де  $l_g$  – довжина дуги контакту, мм;  $v_{roll}$  – швидкість прокатки, м/с.

Час транспортування розкату між кліттю та пічними моталками визначається залежністю:

$$\tau_{t1} = \frac{l_r}{v_{roll}}, \quad (6.3)$$

де  $l_r$  – довжина рольгангу між кліттю та пічною моталкою, м.

Розрахунок змінення температури металу в пічних моталках виконується по наступних залежностях.

Для розрахунку допустимих розмірів заготовки (сляба), яка використовується для виробництва гарячекатаного рулону, виконуємо перевірку максимально-можливої маси рулону для змотування в пічній моталці виходячи з її конкретних

технічних характеристик (допустимої маси ( $m_{\max/wind}$ ) та максимального діаметру рулону, який змотується), т:

$$m_{\max/wind} = \left( \frac{\pi D_{\max/coil}^2}{4} - \frac{\pi D_d^2}{4} \right) \times \frac{b}{1000} \times 7,85, \quad (6.4)$$

де  $D_d$  – діаметр пічного барабану, м;  $D_{\max/coil}$  – максимальний діаметр рулону в печі, за характеристиками устаткування, м;  $b$  – ширина прокату, мм; 7,85 – питома щільність сталі, г/мм<sup>3</sup>.

Розрахунок змінення температури металу в пічній моталці виконуємо для умов одностороннього нагріву термічно тонкого тіла (нескінченної полоси товщиною рівною товщині розкату за час рівний часу намотування останнього вітка на барабан), згідно із залежністю, отриманою з рівняння [203]:

$$t_{met/fur} = t_{fur} - (t_{fur} - t_{met}) \times \exp \left( \alpha_{\Sigma} \times \frac{-\tau_w}{\frac{h}{1000} \times 7,85 \times c_p} \right), \quad (6.5)$$

де  $t_{fur}$  – температура в печі, °С;  $t_{met}$  – температура металу перед піччю, °С;  $\alpha_{\Sigma}$  – сумарний коефіцієнт тепловіддачі;  $c_p$  – теплоємність сталі яка прокатується, Дж/(кг К),  $h$  – товщина прокату, мм;  $\tau_w$  – тривалість намотування останнього вітка, с.

Тривалість намотки останнього витка на барабан пічної моталки визначаємо з формули:

$$\tau_w = \frac{2\pi R_{d/met}}{v_{rol}}, \quad (6.6)$$

де  $R_{d/met}$  – радіус барабану з металом, м;  $v_{rol}$  – швидкість руху штаби (швидкість прокатки), м/с.

Радіус барабану з металом визначаємо згідно із залежністю:

$$R_{d/met} = \sqrt{\frac{h \times l}{\pi \times 1000} + R_d^2}, \quad (6.7)$$

де  $h, l$  – товщина та довжина прокату відповідно, мм;  $R_d$  – радіус барабану пічної моталки, м;

Визначаємо сумарний коефіцієнт тепловіддачі:

$$\alpha_{\Sigma} = \alpha_{conv} + \alpha_{rad}, \quad (6.8)$$



де  $\alpha_{conv}$  – коефіцієнт тепловіддачі через конвекцію;  $\alpha_{rad}$  – коефіцієнт тепловіддачі випромінюванням.

Коефіцієнт тепловіддачі через конвекцію визначаємо по формулі [218]:

$$\alpha_{conv} = 5,7 + (3,13v_{rol} \times \rho_g), \quad (6.9)$$

де  $\rho_g$  – щільність димових газів, кг/м<sup>3</sup> (для природного газу 0,7 кг/м<sup>3</sup>).

Коефіцієнт тепловіддачі випромінюванням визначаємо по формулі [203]:

$$\alpha_{rad} = 5,7 \times 0,8 \times \frac{\left(\frac{t_{fur}+273}{100}\right)^4 - \left(\frac{t_{met}+273}{100}\right)^4}{t_{fur}-t_{met}}. \quad (6.10)$$

Теплоємність розраховуємо на підставі наступного рівняння:

$$c_p = 1000 \times [(-1 \times 10^{-7}) \times t_{met}^2 + 0,0004t_{met} + 0,4281]. \quad (6.11)$$

Рівняння (6.11) отримано шляхом обробки та усереднення даних по середній теплоємності вуглецевих та низьколегованих сталей при різноманітних температурах (табл. 6.5) [218].

Результати обробки даних (див. табл. 6.5), наведені на рис. 6.5.

З метою спрощення розрахунків дані по вуглецевим та низьколегованим маркам сталі (див. рис. 6.5) були усереднені, що не знизило точність ( $R^2 = 0,9185$ ), а також дало змогу застосовувати отримане рівняння для обох типів марок сталі.

Таким чином, рівняння, яке було отримане (6.11), може бути застосовано з достатньою точністю як для розрахунків вуглецевих так і для низьколегованих сталей в діапазоні температур від 100 °С до 1200 °С.

Перевірка отриманих залежностей (6.1) та (6.5) [61] була виконана на аналітичній моделі, адаптованій до умов стану Стеккеля, заводу Ferriera Valsider. Технічний звіт по фактичних параметрах прокатки на стані Стеккеля, з якими порівнювались результати розрахунків, наведений у додатку Й.

Відхилення розрахованих температур прокату від фактичних, отриманих при виробництві гарячекатаних рулонів розмірами 6×1500 мм з мікролегованої сталі типу V638 (аналог X60 по API 5L) партії CL16/11369A, CL16/20707A склало від 0,09 % до -2,1 %, табл. 6.6.

Таблиця 6.5 – Середня теплоємність вуглецевих та низьколегованих сталей при різноманітних температурах

Тип сталі	Пара-метр	Величина параметру												
		$t_{met}, ^\circ\text{C}$	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000	1100	1200
Вуглецеві	$c_p,$ кДж/кг К	0,486	0,507	0,523	0,54	0,561	0,59	0,62	0,695	0,695	0,691	0,687	0,682	0,682
Низьколеговані	$c_p,$ кДж/кг К	0,486	0,502	0,519	0,536	0,548	0,586	0,645	0,695	0,687	0,674	0,67	0,67	

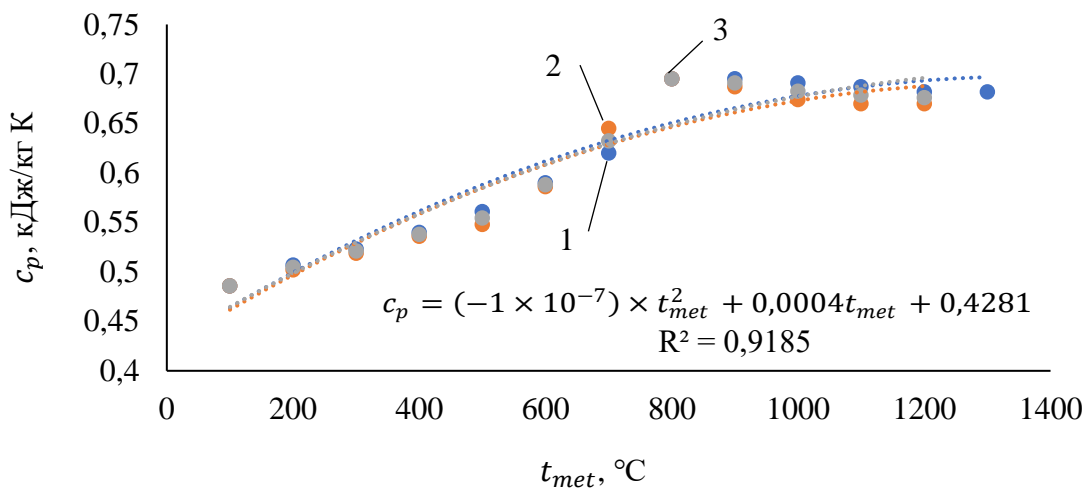


Рисунок 6.5 – Залежність теплоємності вуглецевих (1), низьколегованих (2) сталей, а також середніх значень їх теплоємності (3) від температури

Таблиця 6.6 – Результати розрахунку температурного режиму прокатки за розробленими залежностями

№ партії	Кількість проходів в кліті	$t_{met}$ початок прокатки, $^\circ\text{C}$ (факт)	$t_{met}$ кінець прокатки, $^\circ\text{C}$ (факт)	$t_{met}$ кінець прокатки, $^\circ\text{C}$ , розрахунок з (6.1)-(6.3), (6.5)	$t_{met}$ кінець прокатки, $^\circ\text{C}$ , не вдосконалено (6.5)	$\Delta t$ , %	Середнє відхилення без врахування (6.1)-(6.3), (6.5)	Середнє відхилення, не вдосконалено (6.5)
11369A	7	980	875	876	980	0,09	20,1	10,76
20707A	5	1030	920	901	1014	-2,1	25,9	9,15

Середнє відхилення при розрахунку температурного режиму прокатки без врахування розроблених залежностей склало 20,1 % та 25,9 % для партії CL16/11369A, CL16/20707A відповідно. Середнє відхилення без врахування

залежностей (6.1)-(6.3), (6.5) розраховано за всю кількість проходів, так як є більш показовим і відображає середню похибку, а не накопичену.

Також, за допомогою адаптованої моделі виконано розрахунок сили прокатки при виробництві рулонів розмірами  $6 \times 1500$  мм, партія CL16/11369A. Результати розрахунку наведені на рис. 6.6.

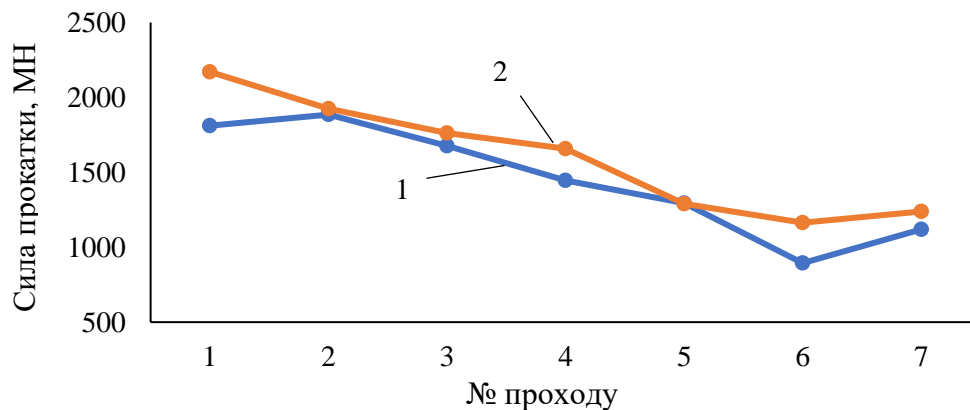


Рисунок 6.6 – Змінення розрахованої (1) та фактичної (2) сили прокатки по проходам на стані Стеккеля при виробництві рулонів розмірами  $6 \times 1500$  мм

Середнє відхилення розрахованої сили прокатки від фактичної по результатах моделювання склало 9,8 %. Основні відхилення отримані в першому проході та в шостому проході при низьких значеннях навантаження. Дані відхилення потребують додаткового вивчення.

Таким чином в даному дослідженні виконане уточнення розрахунку температурних втрат металу на станах Стеккеля за рахунок наступного:

- враховано особливості розрахунку часу, який витрачається на втрати тепла випромінюванням та конвекцією на станах Стеккеля;

- розроблена залежність (6.5) для визначення змін температури розкату при змотуванні на пічній моталці стану Стеккеля, яка враховує вплив температури пічного простору, температуру металу перед змотуванням, сумарний коефіцієнт тепловіддачі, теплоємність сталі, товщину прокату, тривалість намотування останнього витка.

Похибка розрахунку температури металу з урахуванням запропонованих залежностей перевірена на фактичних даних, отриманих на стані Стеккеля заводу Ferriera Valsider та склала від -2,1 % до 0,09 %.

Отримані залежності перевірені при розрахунку сили прокатки на адаптованій аналітичній моделі для стану Стеккеля, яка включає уточнення розрахунку температурних втрат металу, середня похибка склала 9,8 %.

### **6.1.2.2 Перевірка аналітичної моделі технологічного процесу прокатки на стані Стеккеля заводу Ferriera Valsider**

Актуальність розробки та перевірки аналітичної моделі для умов стану Стеккеля заводу Ferriera Valsider обумовлена потребою в засвоєнні нових технологій з метою розширення сортаменту та задоволення потреб європейського ринку.

Метою дослідження є перевірка вдосконаленої аналітичної моделі технологічного процесу прокатки гарячекатаних рулонів для умов стану Стеккеля заводу Ferriera Valsider для подальшої розробки технологічних рекомендацій.

Детальний сортамент, що виробляється, перелік та характеристики основного устаткування заводу Ferriera Valsider наведені в розділі 1.3.3.

Для перевірки аналітичної моделі використані фактичні дані по прокатці рулонів, сортамент яких наведений в табл. 6.7. Технічний звіт по фактичних параметрах прокатки в клітках стану Стеккеля, на підставі яких було проведено перевірку, наведений в додатку К. Хімічний склад слябів, використаних для перевірки моделі, наведений в табл. 6.8.

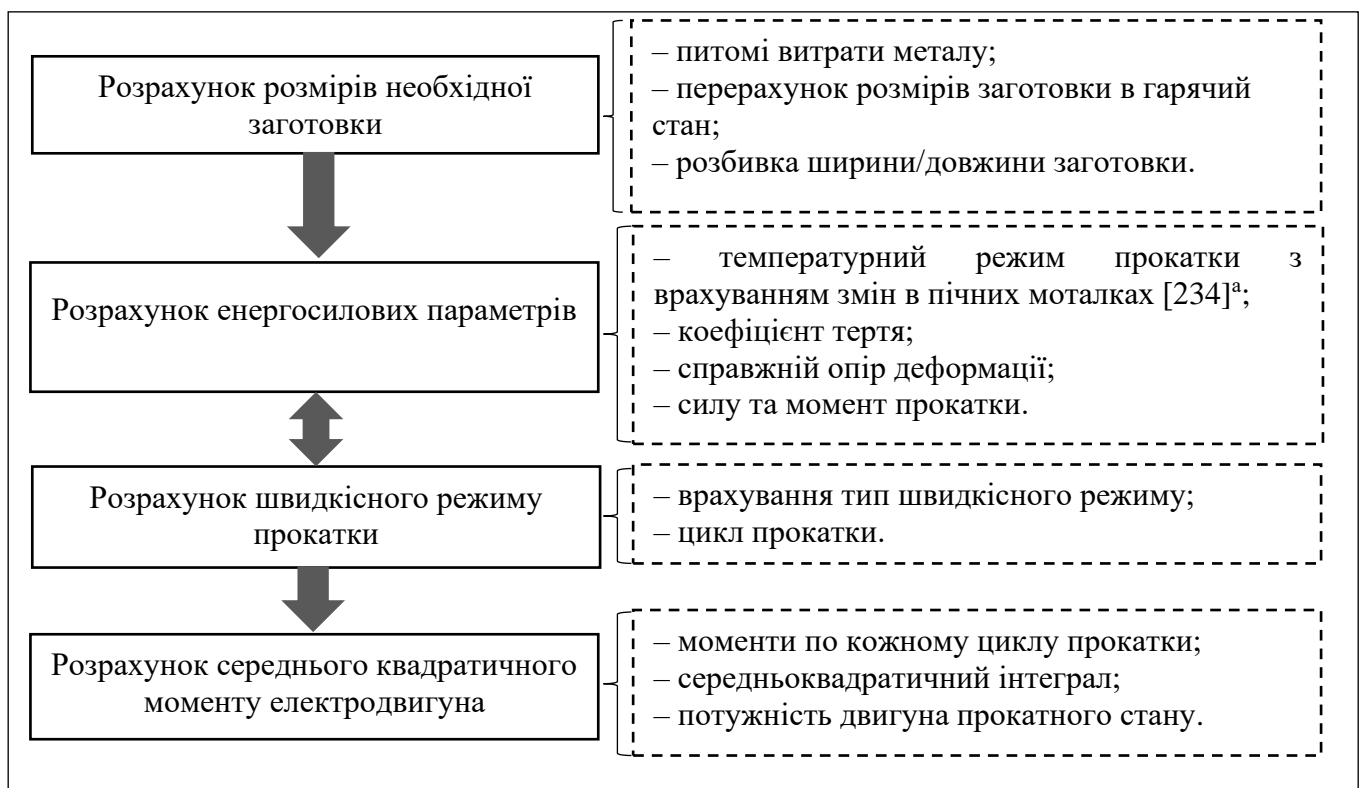
Таблиця 6.7 – Сортамент слябів та рулонів для перевірки аналітичної моделі

шифр плавки	№ сляба	Марка сталі	Переріз слябу, мм	Переріз рулону, мм
81518	A1/02005400	S355JR+AR	220×1520×9800	15×1500
83270	A1/02008812	S355J2+N		12×1500
83749	A1/02008905	S355J2+N		10×1500

Таблиця 6.8 – Хімічний склад сталі з якої вироблявся прокат для перевірки моделі

Шифр плавки	Масова доля елементів, %														
	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Cu	Al	Ti	Nb	Mo	V	N	As
81518	0,14	0,023	1,40	0,014	0,003	0,05	0,18	0,02	0,035	0,005	0,034	0,01	0,005	0,007	0,005
83270	0,14	0,015	1,34	0,017	0,004	0,04	0,02	0,02	0,033	0,005	0,034	0,01	0,005	0,005	0,005
83749	0,13	0,009	1,37	0,014	0,004	0,05	0,03	0,03	0,037	0,005	0,030	0,01	0,005	0,006	0,005

Аналітична модель, що вдосконалена, має наступну структуру:



<sup>a</sup> Вдосконалення температурного режиму прокатки на стані Стеккеля детально описано в розділі 6.1.2.1.

При моделюванні, розрахунок істинного опору металу пластичній деформації виконувався з використанням фактичного хімічного складу слябів по методиці Л.В. Андреюка та Г.Г. Тюленева [129].

Слід зазначити, що для використання фактичних даних по режимах прокатки, зазор між робочими валками треба перерахувати у товщину прокату з врахуванням «жорсткості» кліті.

Розрахунок «жорсткості» кліті дуо, стану 3170 виконано на підставі даних по валковому зазору, фактичній довжині прокату та силі прокатки у цьому проході:

$$S_r = F / (H_f - H_G), \quad (6.12)$$

де  $F$  – сила прокатки,  $\text{MN} \times 10^{-2}$ ;  $H_f$  – фактична товщина прокату, розрахована на підставі вимірювань фактичної ширини та довжини прокату в останньому проході та маси розкату, мм;  $H_G$  – валковий зазор у останньому проході, мм.

Таким чином, розрахована «жорсткість» кліті стану 3170 становить  $180 \text{ MN} \times 10^{-2} / \text{мм}$ . Дані з яких виконаний розрахунок та результат розрахунку, наведені в табл. 6.9.

Таблиця 6.9 – Вихідні дані та результати розрахунку «жорсткості» кліті дуо, стану 3170

Параметр	Одиниця виміру	Значення
$F$	$\text{MN} \times 10^{-2}$	1397
$H_G$	мм	29,4
Ширина прокату	мм	1494
Довжина прокату	мм	56280
Маса розкату	т	24,48
$S_r$	$\text{MN} \times 10^{-2} / \text{мм}$	180

Результати обробки даних по «жорсткості кліті в залежності від сили прокатки наведені на рис. 6.7.

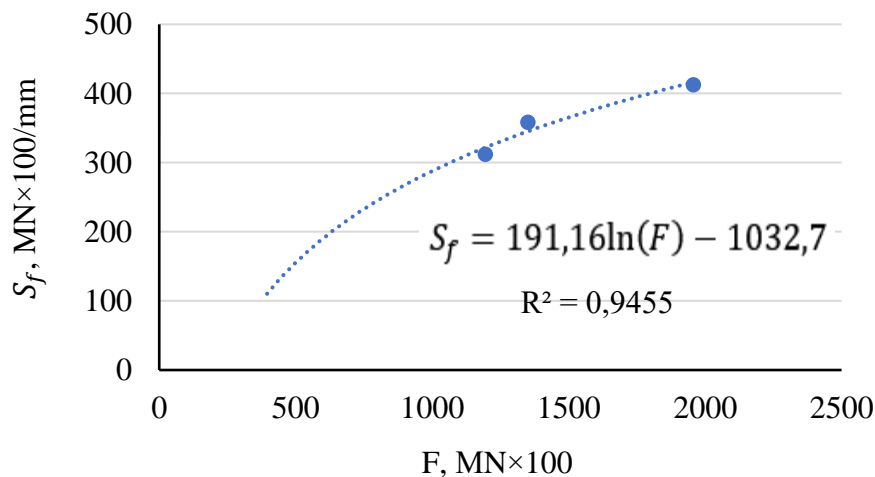


Рисунок 6.7 – Залежність «жорсткості» кліті кварто 1780 стану Стеккеля від сили прокатки по проходах

На підставі результатів обробки даних (див. рис. 6.7), для розрахунку «жорсткості» в кліті кварто 1780 стану Стеккеля, в залежності від сили прокатки, отримано наступну формулу:

$$S_f = 191,16 \ln(F) - 1032,7 \quad (6.13)$$

З врахуванням «жорсткості» обох клітей виконані розрахунки технологічних параметрів прокату рулонів, сортамент яких наведений, див. табл. 6.7. Оцінювання похибки розрахунків виконувалось на таких параметрах як температура та сила прокатки, динаміка яких по проходах наведена на рис. 6.8-6.10.

В результаті розрахунку сили прокатки та температури по проходах виконана оцінка похибок між фактичними та розрахованими даними, результати наведені в табл. 6.10.

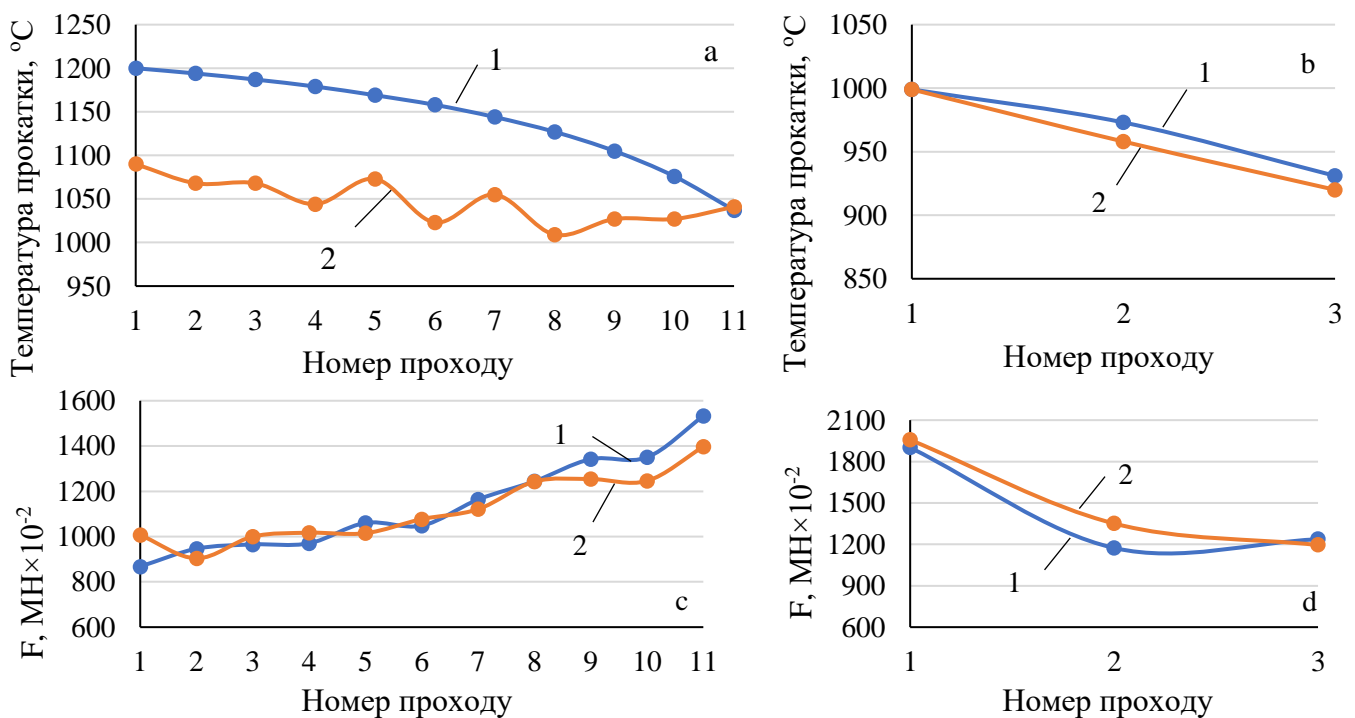


Рисунок 6.8 – Змінення розрахованих (1) та фактичних (2) показників прокату: температури (а) та сили прокатки (с) на стані 3170; температури (b) та сили прокатки (d) на стані 1780 при виробництві рулонів номінальними розмірами 15×1500 мм

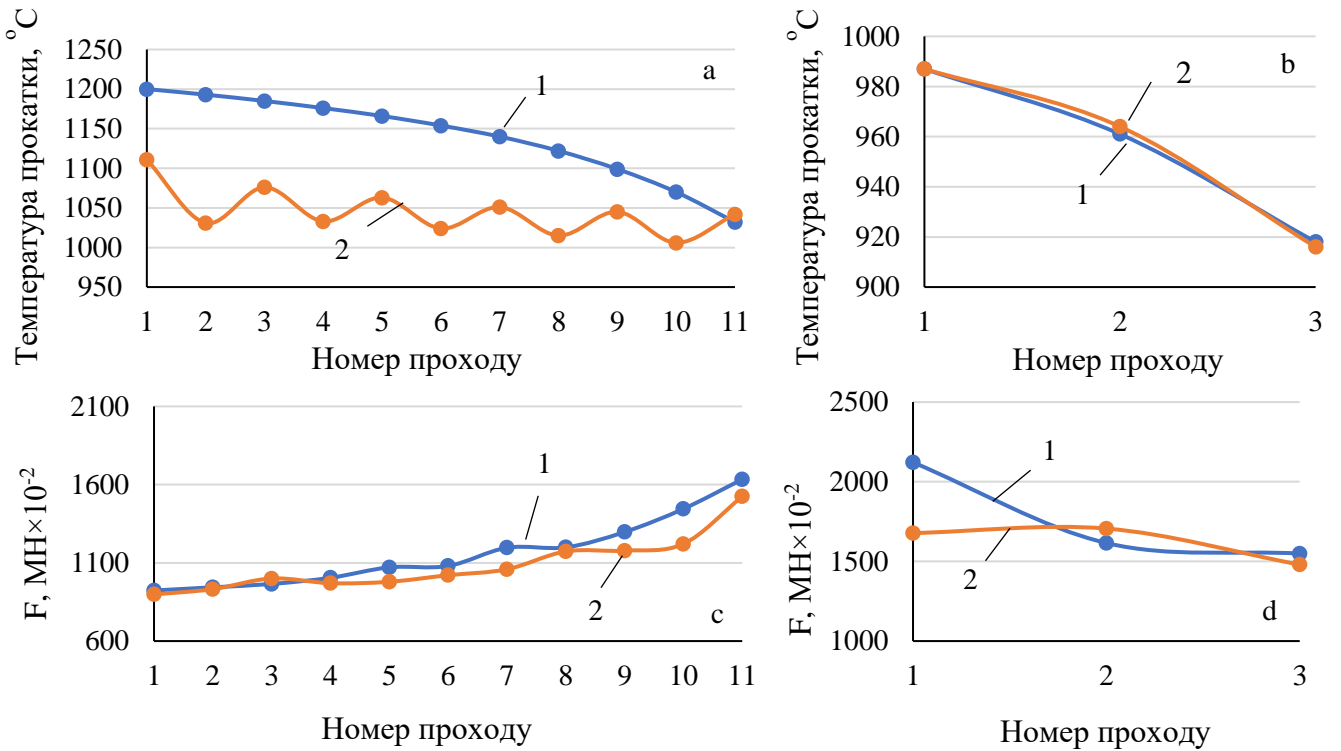


Рисунок 6.9 – Змінення розрахованих (1) та фактичних (2) показників прокату: температури (а) та сили прокатки (с) на стані 3170; температури (b) та сили прокатки (d) на стані 1780 при виробництві рулонів номінальними розмірами 12×1500 мм

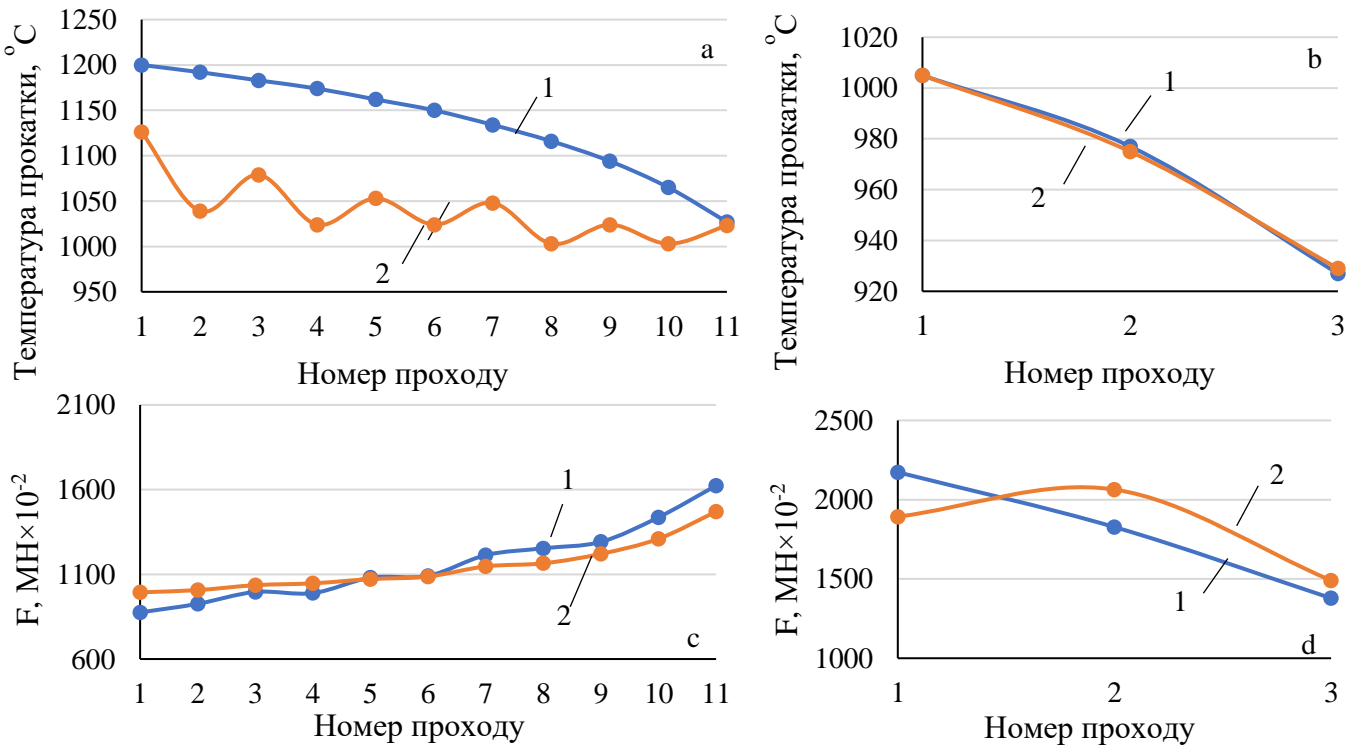


Рисунок 6.10 – Змінення розрахованих (1) та фактичних (2) показників прокату: температури (а) та сили прокатки (с) на стані 3170; температури (b) та сили прокатки (d) на стані 1780 при виробництві рулонів номінальними розмірами 10×1500 мм



Таблиця 6.10 – Похибки між фактичними та розрахованими даними на дослідженому сортаменті

Кліть	Параметр	Похибка розрахунків, %			
		шифр плавки	81518	83270	83749
	Переріз рулону, мм		15×1500	12×1500	10×1500
3170	Температура	середня	-9,11	-9,06	-8,27
		мін	-13,2	-15,71	-14,7
		Макс	0,38	0,96	-0,39
	Сила прокатки	середня	0,8	5,7	0,5
		мін	-16,0	-3,6	-13,6
		Макс	8,8	15,5	9,5
1780 Стекеля	Температура	середня	-0,92	0,03	0,003
		мін	0	0,22	-0,205
		Макс	1,57	0,31	0,22
	Сила прокатки	середня	-4,89	6,59	-2,73
		мін	-15,1	-5,6	-12,94
		Макс	3,37	20,9	12,89

На підставі отриманих результатів розрахунків параметрів прокатки та похибок слід зазначити наступне [60, 66]:

- на стані 3170 суттєве відхилення фактичної температури від розрахованої пов'язане з похибками фактичних замірів на які могли вплинути залишки води на поверхні розкатів після гідрозбиву, або з охолодження прокатних валків. При цьому розрахована та фактична температури наприкінці прокатки в кліті 3170 мають найменші похибки які становлять 0,38 %, 0,96 % та -0,39 % для рулонів товщиною 15 мм, 12 мм та 10 мм відповідно. Розрахована сила прокатки в кліті 3170 має схожу динаміку з фактичними даними, що також підтверджує правильність виконаного розрахунку температур;

- на стані 1780 похибка розрахунків температур становить від 0 % до 1,57 %, що є достатньо задовільним результатом з урахуванням впливу устаткування, яке використовується, зокрема пічних моталок. Похибка, отримана при розрахунку сили прокатки у першому проході для рулонів товщиною 12 мм та 10 мм пов'язана з фактично більшою температурою металу перед станом ніж та, що виміряна після гідрозбиву, що можна побачити при порівнянні з температурами на виході з прохідної печі, табл. 6.11.

Таблиця 6.11 – Порівняння фактичних температур розкату після прохідної печі та температур перед станом Стеккеля

шифр плавки	Переріз рулону, мм	Температура тіла рулону, °С	
		після прохідної печі	перед станом Стеккеля
81518	15×1500	997	999
83270	12×1500	1001	987
83749	10×1500	1048	1005

Вдосконалена аналітична модель технологічного процесу прокатки може використовуватись за для проектування технології на станах Стеккеля.

Отримані похибки розрахунків, внаслідок впливу на фактичні показники технологічних факторів, не знижують цінності розробленої моделі і можуть бути зменшені шляхом підвищення точності вимірів (температури) шляхом корегування місць їх контролю.

Таким чином, по результатах дослідження виконано перевірку вдосконаленої аналітичної моделі на фактичних даних, отриманих на стані 3170 та стані Стеккеля 1780 заводу Ferriera Valsider. Середня похибка при моделюванні температурного режиму прокатки на стані 3170 склала від -8,27 % до -9,11 %, на стані 1780 від 0,003 % до -0,92 %. Середня похибка при моделюванні сили прокатки на стані 3170 склала від 0,5 % до 5,7 %, на стані 1780 від -4,89 % до 6,59 %.

Встановлено вплив на вимір температури попередньої обробки розкату гідрозбивом окалини, що призводить до значних похибок при подальшому порівнянні з результатами розрахунків.

Розроблена модель може бути використана для проектування технологічних режимів прокатки на станах Стеккеля з різноманітним розташування устаткування.

### **6.1.2.3 Освоєння технології виробництва рулонного прокату зі сталі категорії міцності X65 на стані Стеккеля заводу Ferriera Valsider**

Найбільш поширеним способом виготовлення плоского прокату для труб великого діаметру є прокатка на товстолистових реверсивних станах, а також на станах безперервної прокатки. Особливе місце займає виробництво трубного сортаменту на станах Стеккеля. Цей спосіб є менш поширеним, але вдало застосовується світовими виробниками. Слід зазначити, що аналога реалізації виробництва трубного сортаменту великого діаметру на станах Стеккеля на території колишнього Радянського Союзу немає. При цьому в Канаді, Америці, Південній Кореї, Китаї такий спосіб виробництва є поширеним [40].

Отримання необхідних властивостей прокату у всіх випадках досягається переважно методом термомеханічного процесу з використанням або без використання прискореного охолодженням.

Застосування для виготовлення труб великого діаметру листового прокату або рулонного, а отже і виготовлення їх в прямошовному виконанні або спіральшовному багато в чому залежить від політичних, а також від історично сформованих технічних та технологічних аспектів конкретного регіону, країни. У той час як при реалізації великих проектів у східно-європейських та азійських країнах переважають трубопроводи у прямошовному виконанні, в низці Європейських держав, а також Канаді, Америці широко застосовуються спіральшовні труби [40].

Безсумнівно, переваги і недоліки мають обидва варіанти виготовлення, починаючи від листового прокату і труб та закінчуючи безпосередньо трубопроводом.

Розробка технологічних рекомендацій з виробництва рулонного прокату для труб на стані Стеккеля заводу Ferriera Valsider категорії міцності X65 є актуальним завданням, що дозволить оцінити технічні можливості діючого устаткування та встановити можливість виробництва рулонів, що відповідають сучасним світовим

вимогам та задовільняють потреби європейських виробників електрозварних труб. Протокол щодо необхідності освоєння цієї технології наведено в додатку Л.

Метою дослідження є визначення технічної можливості виробництва рулонного прокату трубного сортаменту категорії міцності X65 на стані Стеккеля заводу Ferriera Valsider з урахуванням технічних особливостей наявного нагрівального та прокатного устаткування.

Детальний сортамент, що виробляється, перелік та характеристики основного устаткування заводу Ferriera Valsider наведені в розділі 1.3.3.

Наразі, основним сортаментом стану є товстолистовий та рулонний прокат конструкційного призначення, у тому числі стійкого до атмосферної корозії, прокат для суднобудування та вироблення деталей для машинобудування.

Сортамент, що виробляється, обумовлює існуючий технологічний регламент роботи всього основного устаткування, тобто високі температури нагрівання слябів під прокатку порядку 1230 °С, високу температуру печі при проміжному підігріванні підкату від 1100 °С до 1250 °С, високі температури пічних моталок порядку 1070 °С. Слід зазначити, що при вказаних температурах є суттєвий резерв енергосилових параметрів. Фактична сила прокатки в чорновій і чистовій клітках знаходиться у межах 12-14 МН, при відносній ступені деформації за прохід від 15 % до 50 % відповідно до сортаменту, що дає змогу до подальшого розвитку технології та розширенню сортаменту.

Оцінка можливостей заводу з освоєння технології виробництва рулонів трубного сортаменту базувалася на аналізі технічних характеристик існуючого устаткування.

В результаті аналізу та виконання попередніх розрахунків гранично допустимих технологічних навантажень на основне устаткування клітей, за допомогою комплексу аналітичного моделювання (детально описано в розділі 6.1.2.1 та 6.1.2.2), відзначена недостатня потужність двигунів головного приводу стану 3170 та стану 1780 Стеккеля при досить високих силових характеристиках обох клітей, що

не дозволяє експлуатувати їх на повну потужність. Виходячи з розрахунку отримані наступні результати, табл. 6.12.

Таблиця 6.12 – Порівняння існуючої потужності двигунів і розрахованої

Кліть/тип	Кількість двигунів головного приводу, шт	Максимальна сила прокатки, МН	Фактична потужність двигуна, кВт	Розрахована, необхідна потужність двигуна, кВт
3170/дуо	2	25	2×2240	2×4430
1780/кварто	2	24	2×4480	2×5770

Таким чином, підвищення ефективності експлуатації клітей на заводі Ferriera Valsider шляхом підвищення продуктивності, зниження питомих енерговитрат, підвищення якості виробленої продукції можливе шляхом встановлення нових, більш потужних двигунів головного приводу.

Недостатня потужність двигунів вносить певні труднощі в розробку і реалізацію технології термомеханічної прокатки на існуючому устаткуванні.

Розробка технології виробництва рулонів трубного сортаменту можлива в двох наступних варіантах.

Реалізація на стані технології ТМСР без прискореного охолодження з необхідністю завершення деформації в феритній області, що призведе до значної (до 30 %) втрати продуктивності за рахунок вимушеного збільшення кількості проходів. Крім цього, при виконанні чистової прокатки досить складним буде планування і реалізація роботи пічних моталок як в частині силових характеристик при змотуванні, так і безпосереднього підтримання необхідного температурного режиму прокатки, який буде змінюватися в широкому діапазоні.

Застосування технології ТМСР з прискореним охолодженням є більш прийнятним варіантом.

Безумовною перевагою цієї технології є більш високі споживчі властивості одержуваної продукції, що неодноразово підкреслювалося багатьма дослідженнями. Менші витрати на виробництво, в тому числі за рахунок зниження рівня мікролегуєчих елементів, які додаються в сталь, зниження енерговитрат на

нагрівання та прокату. Крім цього і, що особливо важливо для цього стану Стекеля, це зниження навантажень на двигуни головного приводу і пічних моталок за рахунок проведення деформації в більш високій температурній області.

Розробка технології контрольованої прокатки з прискореним охолодженням виконувалася із застосуванням результатів попередніх досліджень, відомих наукових і практичних підходів, а також за допомогою спеціально розробленого комплексу аналітичного моделювання. У якості заготовки для виробництва рулонів розмірами 12×1510 мм, категорії міцності X65, шляхом внутрішньої координації між підприємствами компанії МЕТИНВЕСТ, було розглянуто використання слябів «МК «АЗОВСТАЛЬ» поточного виробництва, перерізом 220×1510 мм. Хімічний склад дослідних слябів наведено в табл. 6.13.

Таблиця 6.13 – Хімічний склад дослідної сталі категорії міцності X65

№ плавки	Переріз слябів, мм	Хімічний склад, %														
		C	Mn	Si	S	P	Al	Nb	V	Cu	Ni	Cr	Mo	Ti	N	B
1002129	220×1510	0,09	1,40	0,23	0,002	0,011	0,036	0,030	0,066	0,02	0,02	0,03	0,01	0,015	0,007	0,0005

Згідно із запропонованими технологією, нагрівання слябів виконується в шестизонній методичній печі. Температура нагрівання слябів для прокатування повинна становити  $1170 \pm 10$  °С. Визначення необхідної температури аустенізації здійснювалося на підставі даних по температурах розчинності частинок NbC та Nb(C, N) в структурі безперервнолитого слябу.

Нагріті сляби надходять до чорнової кліті дуо стану 3170, попередньо проходячи камеру гідрозбиву для видалення пічної окалини з поверхні. Температура слябів після гідрозбиву повинна становити  $1130 \pm 10$  °С.

Прокатку в чорновій кліті необхідно здійснювати по поздовжній схемі в дві стадії [235]. Перша стадія прокатки здійснюється у верхній частині аустенітної області в діапазоні температур від 1130 °С до 1020 °С, де протікає інтенсивна рекристалізація деформованого аустеніту, зі ступенем деформації більшим ніж 10 % за прохід, за винятком перших двох-трьох проходів, ступінь деформації в яких

обмежений максимальним кутом захоплення, потужністю та обертаючим моментом двигуна.

Після виконання першої стадії підкат охолоджується шляхом поступального переміщення на рольгангу до температури 920 °С. Відсутність деформації в даній температурній області дозволяє зберігати частину ніобію в розчиненому вигляді для подальшого дисперсійного зміцнення металу, так як на даному етапі некогерентні частки Nb (C, N), а також Ti (C, N), що виділяються, не вносять істотних змін в зміцнення стали.

Останні 2-4 пропуски виконуються в області гальмування рекристалізації в інтервалі температур 920-880 °С, при ступені деформації  $\geq 10\%$ .

Виконання чорної прокатки в дві стадії сприяє формуванню більш дрібного аустенітного зерна, а отже більш дисперсної та однорідної успадкованої феритної структури в готовому прокаті. Товщина підкату повинна бути не менше ніж трьох кратної від кінцевої товщини.

Рекомендований температурно-деформаційний режим прокатки по проходах в кліті 3170 наведено в табл. 6.14 [236].

Після прокатки в чорній кліті підкат товщиною 40 мм охолоджується на рольгангу до температури 830-820 °С.

Далі підкат надходить до прохідної роликової печі де відбувається вирівнювання температури по перерізу та довжині, а також підігрів бічних кромок.

Температура металу після вирівнювання в роликовій печі повинна становити  $835 \pm 5$  °С.

Остаточна прокатка здійснюється в кліті кварто стану Стеккеля.

Прокатка в кліті Стеккеля повинна починатися при температурі 825-835 °С, тобто нижче температури повного гальмування рекристалізації аустеніту, і закінчуватися при температурі не менш ніж 810 °С. Ступінь деформації по всіх проходах повинен бути не меншим ніж 10 %.

Таблиця 6.14 – Рекомендований температурно-деформаційний режим прокатки в чорновій кліті 3170

№ проходу	Товщина перед проходом, мм	Товщина після проходу, мм	Ступінь деформації, %	Температура перед проходом, °С	Сила прокатки, МН
1	222	202	9,0	1130	14,07
2	202	183	9,4	1122	14,22
3	183	165	9,8	1117	14,25
4	165	148	10,3	1113	14,24
5	148	132	10,8	1107	14,28
6	132	117	11,4	1102	14,28
7	117	103	12,0	1094	14,38
8	103	90	12,6	1087	14,43
9	90	78	13,3	1076	14,61
10	78	67,5	13,5	1066	14,26
11	67,5	58	14,1	1051	14,46
12	58	49,5	14,7	1037	14,54
Охолодження на рольгангу					
13	49,5	44,5	10,1	917	14,42
14	44,5	40	10,1	902	14,40

В ході реалізації описаних температурно-деформаційних параметрів при чистовій прокатці відбувається витягування аустенітних зерен, межі яких закріплені за допомогою фаз Nb (С, N), що виділяються в процесі прокатки та дозволять істотно подрібнити успадковане зерно фериту.

Рекомендований температурно-деформаційний режим прокатки по пропусках в кліті 1780 наведений в табл. 6.15.

Режим деформації розрахований таким чином щоб останній пропуск виконувався по ходу процесу прокатки. Змінення температури та сили прокатки по проходах в кліті Стеккеля наведені на рис. 6.11.

З метою виконання умов термомеханічного процесу прокатки необхідне утримання температури металу по проходах в кліті Стеккеля. При моделюванні технології утримання температури на потрібному рівні, який є низьким відносно діючої технології, здійснено шляхом регулювання кількості пальників в пічних моталках [237].



Таблиця 6.15 – Рекомендований режим прокатки в кліті 1780 стану Стеккеля

№ проходу	Товщина перед проходом, мм	Товщина після проходу, мм	Ступінь деформації, %	Температура перед проходом, °С	Сила прокатки, МН
1	40	35,5	11,25	830	14,60
2	35,5	31,5	11,27	829	13,97
3	31,5	28	11,11	828	13,22
4	28	24,5	12,50	827	13,75
5	24,5	21,5	12,24	826	12,89
6	21,5	18,5	13,95	825	13,50
7	18,5	16	13,51	824	12,49
8	16	14	12,50	822	11,23
9	14	12	14,29	819	11,87

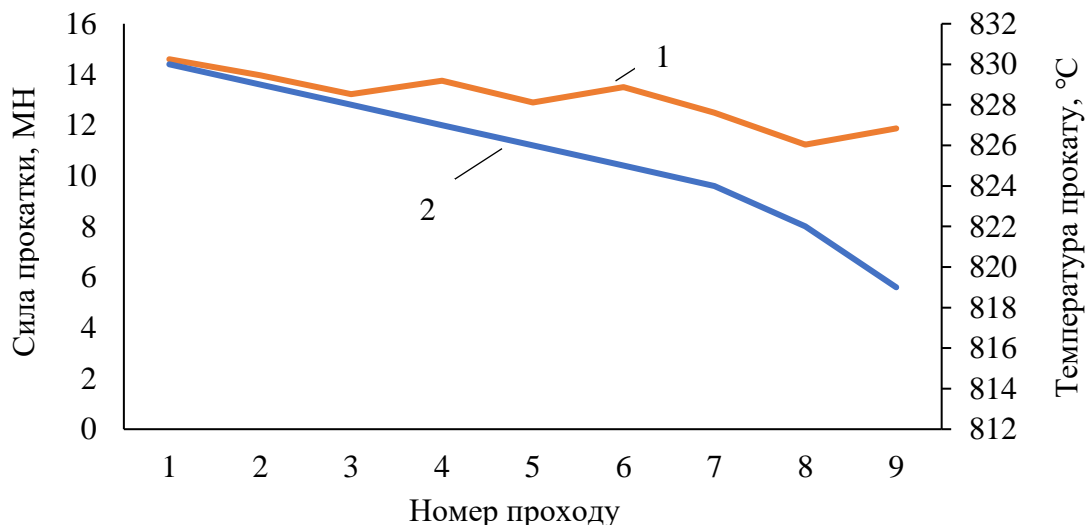


Рисунок 6.11 – Динаміка змін сили прокатки (1) та температури (2) по проходах в кліті Стеккеля

Після прокатки штаба без затримок передається на установку ламінарного охолодження. Послідовність проходження технологічних агрегатів перед ламінарним охолодженням повинна бути наступною:

**Пічна моталка перед станом** → **Стан Стеккеля** → **Установка ламінарного охолодження**

З огляду на малу відстань розкочувальних полів робота всього технологічного устаткування повинна бути синхронізованою.

Охолодження рулонів на установці прискороного охолодження повинно виконуватись зі швидкістю 12-14 °C/с до температури 560-580 °C.

Прискорене охолодження з нижнього діапазону аустенітної області дозволить сформувати остаточну дисперсну ферито-бейнітну структуру в готовому прокаті. Виділення на даній стадії частинок Nb (C, N) з твердого розчину дозволить значно підвищити міцність металу.

Схема термомеханічного процесу прокатки рулонів зі сталі категорії міцності X65 на стані Стеккеля виглядає наступним чином, рис. 6.12.

Після прискороного охолодження штаба змотується в рулон на фінішній моталці.

З метою зменшення товщини шару повітряної окалини, змотані рулони необхідно піддати додатковому контрольованому повітряному охолодженню до температури 400 °C, за допомогою промислових аераторів [238, 239]. Остаточне сповільнене охолодження рулонів виконується на складі протягом 48 годин.

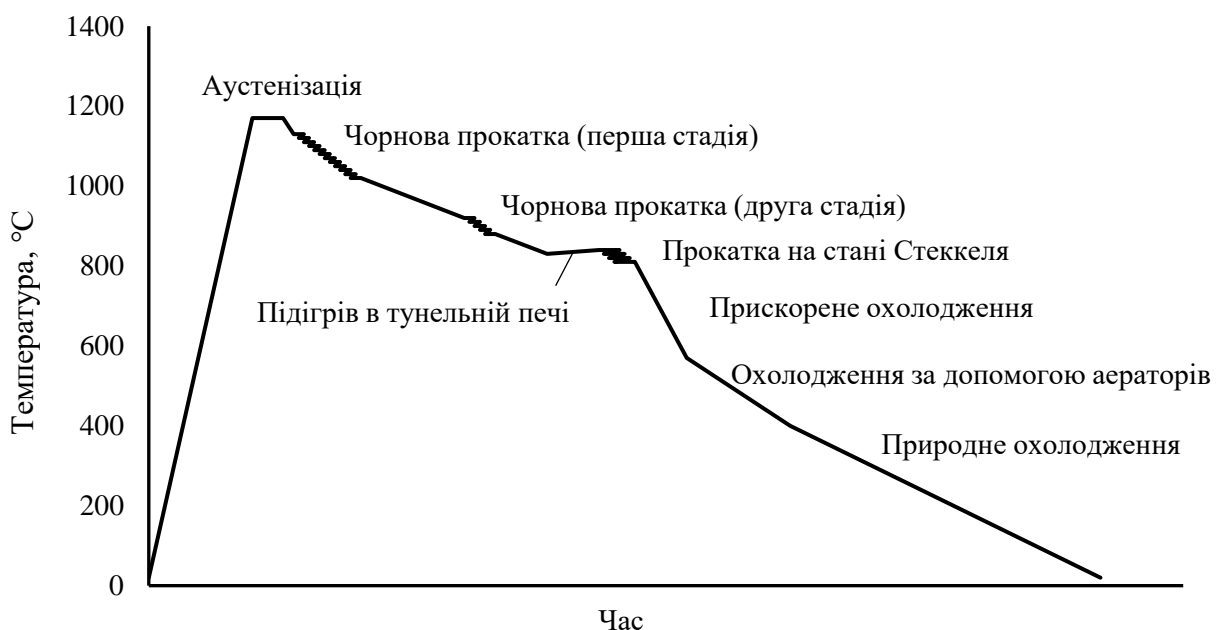


Рисунок 6.12 – Схема термомеханічного процесу прокатки сталі категорії міцності X65 на стані Стеккеля

Таким чином, шляхом внутрішньої координації між підприємствами компанії МЕТИНВЕСТ, для умов стану Стеккеля заводу Ferriera Valsider, виконано оцінку

технічних можливостей та розроблено комплексну технологію для виробництва рулонів категорії міцності X65 для подальшого вироблення електрозварних труб великого діаметру нафто-газового призначення. В якості заготовки передбачено використання безперервнолитих слябів «МК «АЗОВСТАЛЬ».

Таким чином, для заводу Ferriera Valsider виконано розрахунок та встановлена необхідна потужності головних двигунів прокатних станів 3170 та 1780, що дозволить підвищити продуктивність, знизити питомі енерговитрати та підвищити якість продукції, що виробляється.

З метою покращення якості поверхні рулонів, для стану Стеккеля, запропоновано застосування технології контрольованого повітряного охолодження рулонів після змотування.

## **6.2 Освоєння виробництва нового сортаменту на підприємствах України**

### **6.2.1 Освоєння виробництва конструкційного прокату способом термомеханічної прокатки**

#### **6.2.1.1 Освоєння виробництва рулонного прокату зі сталі марки S355MC товщиною 6 мм згідно з вимогами стандарту EN 10149-2 на стані 1700 «ММК ІМЕНІ ІЛЛІЧА»**

Слід зазначити, що вітчизняні стани для виробництва гарячекатаних рулонів були сконструйовані набагато раніше ніж отримала поширення технологія термомеханічної прокатки. Тому ця технологія та продукція не є проектними та потребують поетапного впровадження.

Метою дослідження є визначення технічної можливості виробництва гарячекатаних рулонів зі сталі марки S355MC згідно з вимогами EN 10149-2, розмірами до 6×1500 мм в умовах стану 1700 «ММК ІМЕНІ ІЛЛІЧА», без модернізації устаткування.

Розробка технології термомеханічної контрольованої прокатки для виробництва гарячекатаних рулонів перерізом 6×1500 мм із сталі марки S355MC для умов стану 1700, без здійснення модернізації на даному етапі є актуальним завданням, що дозволить забезпечити виробництво рулонів з найпоширенішої марки сталі та забезпечить потреби ключових клієнтів підприємства.

Детальний сортамент, що виробляється, поточні обмеження, перелік та характеристики основного устаткування стану 1700 «ММК ІМЕНІ ІЛЛІЧА» наведені в розділі 1.3.2.1.

Згідно з проектом та діючою технологією прокатний стан виробляє гарячекатані рулони вагою до 9 т, товщиною від 1,5 до 9 мм, шириною від 1000 мм до 1530 мм, в залежності від сортаменту, з марок сталі від 08пс (згідно з ГОСТ 1050) до 09Г2С (згідно з ГОСТ 19281), S355 усіх категорій згідно з EN 10025-2 та інший аналогічний сортамент, обмежений тимчасовим опором в холодному стані не більше ніж 590 МПа.

Основною відмінністю при виробництві сортаменту за технологією ТМСП є низький рівень хімічних елементів, які забезпечують властивості міцності прокату, порівняння наведене в табл. 6.16, а також в розділі 1.2.1.

Таблиця 6.16 – Порівняння показників продукції яка виробляється по різноманітних технологічних режимах

Вимоги	Технологія <sup>a</sup>	Марка сталі	Показники / хімічний склад						
			C, %	Mn, %	Nb, %	V, %	Ti, %	Ce	KV <sub>-20</sub> , Дж
EN 10025-2	AR; N <sup>2</sup>	S355J2	≤0,20	≤1,60	- <sup>1</sup>	- <sup>1</sup>	- <sup>1</sup>	≤0,45	≥27
EN 10025-4	ТМСП	S355ML	≤0,14	≤1,60	≤0,05	≤0,10	≤0,05	≤0,39	≥47
EN 10149-2	ТМСП	S355MC	≤0,12	≤1,50	≤0,09	≤0,20	≤0,15	-	-

<sup>a</sup> AR – гарячекатаний стан; N – стан після нормалізувальної прокатки; ТМСП – стан після термомеханічної контрольованої прокатки;

<sup>1</sup> – дозволяється використання елементів;

<sup>2</sup> – переважний стан прокату по даному стандарту.

Суттєвою відмінністю вимог до прокатки, який виробляється термомеханічним способом, є нижчий рівень вмісту хімічних елементів в порівнянні з іншими способами, а також додаванням мікролегуєчих елементів, як зазначалося раніше, розділ 1.2.1. Такі змінення разом забезпечують відмінний комплекс механічних властивостей.

Для виробництва дослідницької партії гарячекатаних рулонів із сталі марки S355MC згідно з вимогами EN 10149-2, розмірами 6×1500 мм було виплавлено плавку з наступним хімічним складом, табл. 6.17.

Таблиця 6.17 – Хімічний склад дослідної плавки марки S355MC

Плавка	Масова частка хімічних елементів, %											
	C	Mn	Si	S	P	Cr	Ni	Cu	V	Al	Ti	Nb
255634-2	0,11	1,36	0,03	0,007	0,019	0,04	0,01	0,01	0,004	0,037	0,022	0,030

У якості елементів хімічного складу, які дозволяють здійснювати контроль розмірів зерна при аустенізації та прокатці, а також змінення властивостей за рахунок карбонітридного зміцнення, використано Nb та Ti.

На підставі хімічного складу (див. табл. 6.17) розраховано цільові термомеханічні показники процесу прокатки [3, 28, 43], дотримання яких, надалі, забезпечить необхідний комплекс механічних властивостей, згідно з EN 10149-2, табл. 6.18.

З метою отримання технологічних параметрів, необхідних для здійснення термомеханічного процесу прокатки, попередньо було розраховано цільовий температурно-деформаційний режим, табл. 6.19 [45, 46].

У якості напівфабрикату було використано попередньо редукований до розмірів 140×1500×5395мм сляб перерізом 250×1550 мм.

Згідно з розрахунком, експлуатаційні обмеження устаткування чорнової та чистової груп клітей не були перевищені, що дозволяє застосувати цей температурно-деформаційний режим при виробництві дослідницької партії прокату.

Таблиця 6.18 – Цільові термомеханічні показники процесу прокатки

Параметр	Одиниця виміру	Значення параметру
Температура нагрівання слябів	°С	1260+/-20
Час нагрівання	Годин-хвилин	≤2-00
Температура прокатки після кліті 4а	°С	≥1040
Температура прокатки після кліті 10	°С	810-860
Температура змотування рулонів	°С	580-630
Кількість секцій які використовуються для прискореного охолодження	шт	8-14
Швидкість охолодження	°С/с	40-50

Таблиця 6.19 – Цільовий температурно-деформаційний режим прокатки рулонів з марки сталі S355MC розмірами 6×1500 мм на стані 1700

№ кліті	Показники					
	Товщина <sup>а</sup> , мм	Температура, °С	Розрахована сила прокатки, МН×10 <sup>-2</sup>	Максимально допустима сила прокатки, МН×10 <sup>-2</sup>	Швидкість прокатки, м/с	Потужність двигуна, кВт
0 <sup>b</sup>	140					
01	120	1260	707,3	800	0,85	1343,5
1	90	1237	1217,0	2500	1,26	3758,8
2	60	1213	1508,2	2500	1,36	5046,3
3	42	1178	1260,1	2000	1,78	4676,5
4	32	1138	1039,2	2000	1,78	2907,3
4а	28	1074	722,3	2000	2,89	2129,9
5	22	934	1736,5	2400	1,36	3846,4
6	16	916	1772,1	2400	1,87	4714,1
7	12	898	1346,9	2000	2,67	3619,8
8	10	876	1460,3	1800	3,38	4575,2
9	8	856	1274,1	1700	4,27	4127,9
10	6	834	994,1	1500	5,70	3343,1

<sup>а</sup> товщина після проходу

<sup>б</sup> початкові дані

Слід зазначити, що при розрахунку необхідний рівень температур після кліті 10 був досягнений завдяки регулюванню швидкості прокатування металу в чистовій групі.

По розрахованих режимах була вироблена дослідницька партія гарячекатаних рулонів перерізом 6×1500 мм, зі сталі марки S355MC, плавка 255634-2, згідно з вимогами EN 10149-2 та EN 10051.

Цільова схема термомеханічного процесу прокатки рулонів зі сталі марки S355MC на стані 1700 виглядає наступним чином, рис. 6.13.

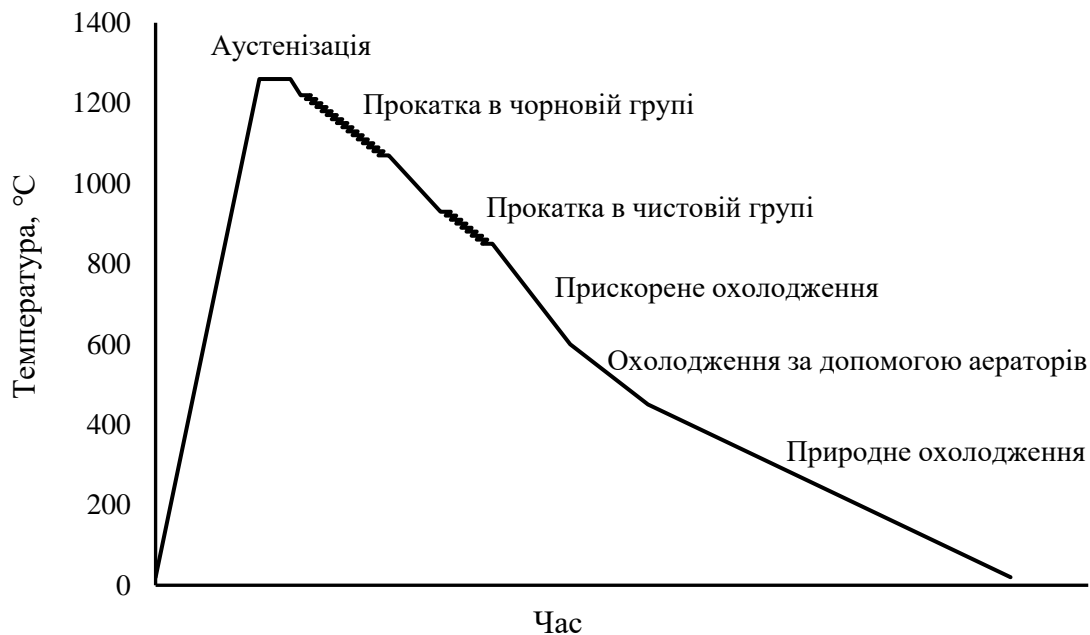


Рисунок 6.13 – Схема термомеханічного процесу прокатки рулонів зі сталі марки S355MC на стані 1700

При виробництві, режим деформації був частково скорегований від розрахованого, у тому числі системою АСУТП, що призвело до зміни в розподіленні навантажень головних двигунів по клітках, рис. 6.14.

Змінення фактичного режиму деформації при прокатці від цільового, тобто розрахованого (див. рис. 6.14) не призвело до перевантажень головних двигунів по клітках.

Після прокатки, рулони були оброблені на установці прискореного охолодження. Фактичні термомеханічні параметри виробництва дослідницької партії наведені в табл. 6.20.

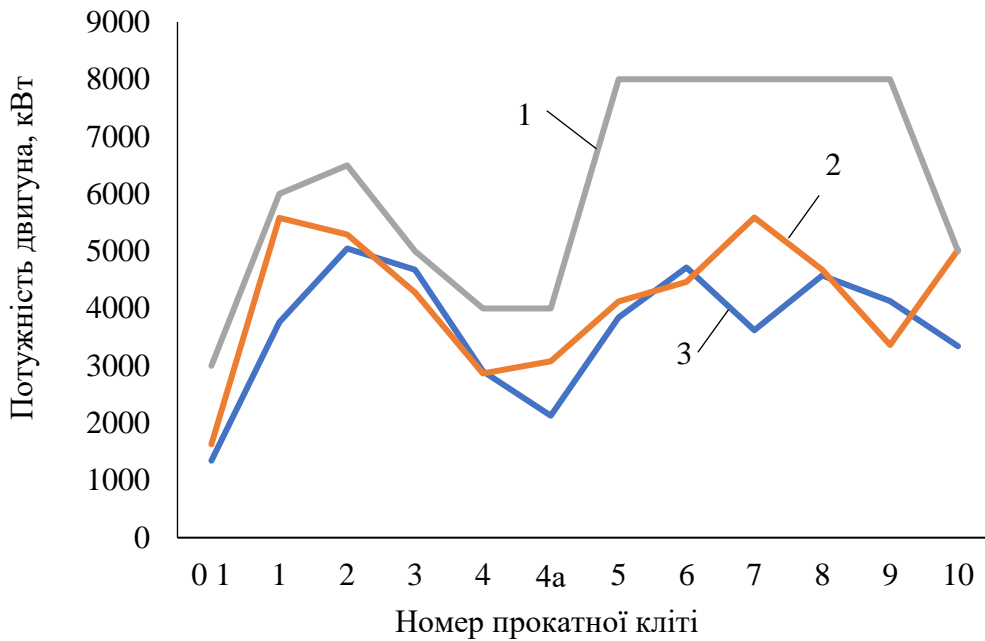


Рисунок 6.14 – Потужність головних двигунів по клітках (1) допустима, (2) фактична, (3) розрахована

Таблиця 6.20 – Фактичні термомеханічні показники процесу прокатки

Параметр	Одиниця виміру	Значення параметру
Температура нагрівання слябів	°C	1260-1280
Час нагрівання	Годин-хвилин	2-12
Температура прокатки після кліткі 4a	°C	1105-1117
Температура прокатки після кліткі 10	°C	880-887
Температура змотування рулонів	°C	623-644
Кількість секцій для прискореного охолодження	шт	14
Швидкість охолодження	°C/с	51

Фактично отримані термомеханічні параметри дещо перевищують цільові, що пов'язано з регулюванням параметрів в процесі прокатки, а також з опрацюванням технології. Слід зазначити, що з метою отримання необхідних механічних властивостей, підвищені значення температури кінця прокатки в клітці 10 та температури змотування було скомпенсована використанням максимальної кількості секцій охолодження, що підвищило швидкість охолодження прокату.



Змотані на моталках рулони були відправлені на додаткове контрольоване повітряне охолодження до температури 450 °С, яке здійснювали за допомогою промислових аераторів [238-241]. Після цієї технологічної операції, рулони були відправлені на склад для остаточного природнього охолодження.

Технологія додаткового контрольованого повітряного охолодження прокату після термомеханічної прокатки спеціально розроблена для виробництва цієї дослідницької партії. Застосування цієї технології дозволило зменшити товщину шару повітряної окалини, який інтенсивна утворюється після закінчення прокатки та аж до температури 450 °С, при звичайному повітряному охолодженні.

Аналіз якості отриманих результатів виконувався на підставі механічних випробувань та металографічного дослідження.

Проби для оцінки механічних властивостей від рулонів дослідницької партії було відібрано після остаточного охолодження. Результати механічних випробувань наведені в табл. 6.21.

Таблиця 6.21 – Результати механічних випробувань дослідницької партії рулонів

№ плавки	Механічні властивості			
	Границя плинності, МПа	Тимчасовий опір, МПа	Відносне видовження, %	Вигін по оправці
255634-2	475	550	30	Без розтріскування
Вимоги EN10149-2 S355MC	≥355	430-550	23	Без розтріскування

Отримані результати механічних випробувань повністю відповідають вимогам EN10149-2 до сталі марки S355MC. Слід зазначити, що отримані результати випробувань знаходяться на верхньому рівні вимог стандарту. Таким чином, технологія виробництва може бути скорегована у напрямок зниження вмісту мікролегованих елементів, що дозволить знизити собівартість продукту. Також, отримані результати свідчать про технічну наявність подальшого освоєння технології

термомеханічної прокатки сталі марки S355MC в більших товщинах, та освоєння виробництва гарячекатаних рулонів більш міцних категорій [242, 243].

Для аналізу внутрішньої якості прокату проведені металографічні дослідження зразків від рулонів плавки 255634-2. Мікроструктура зразків наведена на рис. 6.15.

Отримана мікроструктура прокату є ферит-перлітною з зерном фериту 9, 10 номеру та смугастістю 1 балу.

Різниця у розмірі зерна фериту між віссю та поверхнею не перевищує одного номера, також метал має майже однаковий стан смугастості по перерізу.

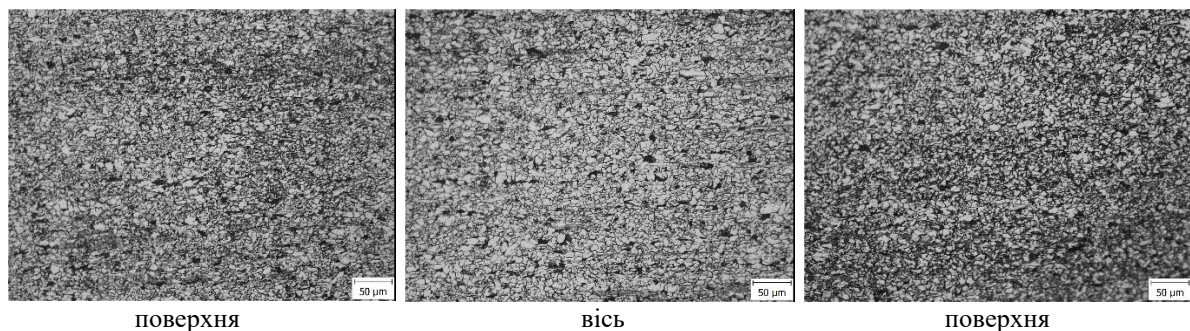


Рисунок 6.15 – Мікроструктура зразків плавки 255634-2 після травлення,  $\times 200$

Такий стан мікроструктури по товщині прокату та смугастості свідчать про досягнення необхідного результату при здійсненні термомеханічного процесу прокатки та достатньо ефективно, для цього сортаменту, охолодження прокату по товщині. Для встановлення можливості виробництва прокату в більших товщинах з урахуванням охолоджувальних можливостей устаткування, необхідне подальше дослідне випробування.

Таким чином, з метою забезпечення замовників компанії прокатом відповідного рівня якості розроблено технологію та вироблено партію гарячекатаних рулонів перерізом  $6 \times 1500$  мм з сталі марки S355MC у повної відповідності до вимог EN 10149-2.

Вперше для умов стану 1700 «ММК ІМЕНІ ІЛЛІЧА» підтверджена технічна можливість реалізації процесу термомеханічної контрольованої прокатки.

Вперше розроблена та промислово застосована технологія додаткового контрольованого повітряного охолодження рулонного прокату до температури 450 °С, з метою зменшення товщини шару повітряної окалини після термомеханічної прокатки, та покращення якості поверхні для споживачів.

Встановлена технічна наявність подальшого освоєння технології термомеханічної прокатки сталі марки S355MC для більших товщин, та виробництва гарячекатаних рулонів більш міцних категорій.

### **6.2.1.2 Освоєння виробництва рулонного прокату зі сталі марки S460MC товщиною 2,5 мм згідно з вимогами стандарту EN 10149-2 на стані 1700 «ММК ІМЕНІ ІЛЛІЧА»**

Розробка технології термомеханічної контрольованої прокатки для виробництва гарячекатаних рулонів перерізом 2,5×1000 мм зі сталі марки S460MC для умов стану 1700 без здійснення модернізації є актуальним завданням, що дозволить забезпечити виробництво рулонів, які відповідають сучасним світовим вимогам та задовольняють потреби споживачів підприємства.

Метою дослідження є визначення технічної можливості виробництва гарячекатаних рулонів зі сталі марки згідно з вимогами EN 10149-2, розмірами 2,5×1000 мм, в умовах стану 1700 «ММК ІМЕНІ ІЛЛІЧА», без модернізації устаткування.

Детальній сортамент, що виробляється, поточні обмеження, перелік та характеристики основного устаткування стану 1700 «ММК ІМЕНІ ІЛЛІЧА» наведені в розділі 1.3.2.1.

Відмінністю сортаменту, який виробляється за технологією ТМСР, є низький рівень вуглецю та використання мікролегуючих елементів, завдяки яким при термомеханічній прокатці забезпечується необхідний рівень властивостей. В табл. 6.22 наведено вимоги до хімічного складу сталі марки S460MC, згідно з EN 10149-2.

Для виробництва дослідницької партії гарячекатаних рулонів зі сталі марки S460MC згідно з вимогами EN 10149-2, розмірами 2,5×1000 мм було розроблено хімічний склад та виготовлено сляби розмірами 150×1000×6200 мм, табл. 6.23. Технологія, що запроваджена на стані 1700 «ММК ІМЕНІ ІЛЛІЧА» наведена в додатку М.

Таблиця 6.22 – Вимоги до хімічного складу сталі марки S460MC

Вимоги	Технологія	Марка сталі	Хімічний склад, %					
			C	Mn	Nb	V	Ti	Nb+V+Ti
EN 10149-2	ТМСР	S460MC	≤0,12	≤1,60	≤0,09	≤0,20	≤0,15	≤0,22

Таблиця 6.23 – Хімічний склад дослідної плавки марки S460MC

Плавка	Масова частка хімічних елементів, %											
	C	Mn	Si	S	P	Cr	Ni	Cu	V	Al	Ti	Nb
162955-3	0,10	1,38	0,03	0,009	0,021	0,020	0,01	0,01	0,002	0,052	0,016	0,025

Вказаний рівень вмісту Nb та Ti створено для забезпечення контролю розмірів зерна при аустенізації та прокатці, а також змінення властивостей за рахунок карбонітридного зміцнення.

На підставі хімічного складу (див. табл. 6.23) розраховано цільові термомеханічні показники процесу прокатки [36, 44, 135], дотримання яких, надалі забезпечить необхідний комплекс механічних властивостей сталі марки S460MC згідно з EN 10149-2, табл. 6.24.

З метою перевірки технічної можливості виробництва, а також отримання технологічних параметрів, необхідних для здійснення термомеханічного процесу прокатки, попередньо було розраховано цільовий температурно-деформаційний режим, табл. 6.25 [36].

Цільова схема термомеханічного процесу прокатки рулонів зі сталі марки S460MC на стані 1700 виглядає наступним чином, рис. 6.16.

Таблиця 6.24 – Термомеханічні показники процесу прокатки

Параметр	Одиниця виміру	Значення параметру
Температура нагрівання слябів	°С	1260-1280
Час нагрівання	Годин-хвилин	≤2-10
Температура прокатки після кліті 4а	°С	≥1040
Температура прокатки після кліті 10	°С	820-880
Температура змотування рулонів	°С	580-630
Кількість секцій які використовуються для прискореного охолодження	шт	8-14
Швидкість охолодження	°С/с	95-105

Таблиця 6.25 – Температурно-деформаційний режим прокатки рулонів з марки сталі S460MC розмірами 2,5×1000 мм на стані 1700

№ кліті	Показники					
	Товщина <sup>a</sup> , мм	Температура, °С	Розрахована сила прокатки, МН×10 <sup>-2</sup>	Максимально допустима сила прокатки, МН×10 <sup>-2</sup>	Швидкість прокатки, м/с	Потужність двигуна, кВт
0 <sup>b</sup>	150					
01	130	1260	446,0	800	0,85	847,2
1	95	1237	845,9	2500	1,26	2817,1
2	58	1216	1070,2	2500	1,36	3967,2
3	41	1177	768,0	2000	1,78	2772,6
4	30	1124	750,1	2000	1,78	2196,4
4а	22	1048	918,5	2000	2,89	3754,2
5	15	952	1153,6	2400	2,21	3899,0
6	9,5	938	1248,6	2400	3,23	5508,6
7	6	927	1210,9	2000	4,98	6519,3
8	4	917	1046,0	1800	7,30	6394,7
9	3	903	783,1	1700	9,79	4735,4
10	2,5	880	561,7	1500	11,75	3049,4

<sup>a</sup> товщина після проходу<sup>b</sup> початкові дані

Згідно з виконаним розрахунком, встановлені експлуатаційні обмеження устаткування чорнової та чистової груп клітей не були перевищені. Таким чином, дослідна партія прокату може бути вироблена на наявному устаткуванні із застосуванням цього температурно-деформаційного режиму. Різниця між встановленими обмеженнями та розрахованими рівнями сили прокатки та потужності головних двигунів наведені на рис. 6.17, 6.18.

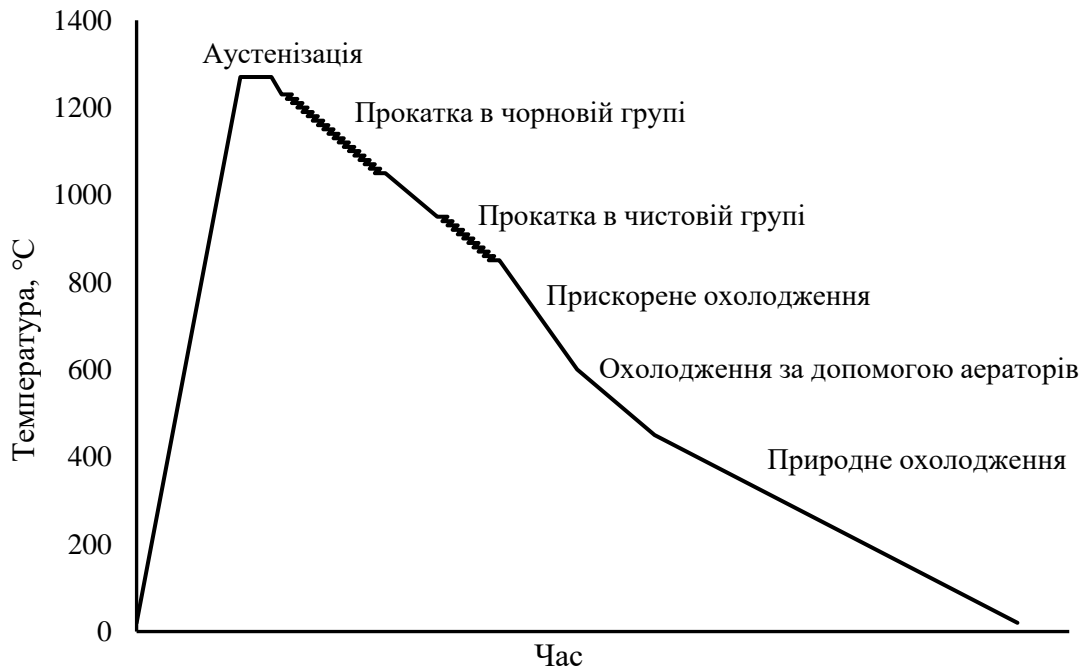


Рисунок 6.16 – Схема термомеханічного процесу прокатки рулонів зі сталі марки S460MC на стані 1700

По розрахованих режимах була вироблена дослідницька партія гарячекатаних рулонів перерізом  $2,5 \times 1000$  мм з марки сталі S460MC, плавка 162955-3, згідно з вимогами EN 10149-2 та EN 10051.

При передачі з чорнової до чистової групи клітей, з метою зниження температурних втрат відносно тонкого розкату (товщина розкату 22 мм), використовувались теплозберігаючі екрани, рис. 1.13. Після прокатки рулони були оброблені на установці прискореного охолодження. Фактичні термомеханічні параметри виробництва дослідницької партії наведені в табл. 6.26.

З метою зменшення товщини шару повітряної окалини змотані на моталках рулони були відправлені на додаткове контрольоване повітряне охолодження до температури 450 °C, яке здійснювали за допомогою промислових аераторів. Після цієї технологічної операції рулони були відправлені на склад для остаточного природнього охолодження.

Таблиця 6.26 – Фактичні термомеханічні показники процесу прокатки

Параметр	Одиниця виміру	Значення параметру
Температура нагрівання слябів	°С	1260
Час нагрівання	Годин-хвилин	2-35
Температура прокатки після кліті 4а	°С	1052-1078
Температура прокатки після кліті 10	°С	872-875
Температура змотування рулонів	°С	600-605
Кількість секцій для прискореного охолодження	шт	13
Швидкість охолодження	°С/с	114

Аналіз якості отриманих результатів виконувався на підставі комплексу механічних випробувань.

Проби, для оцінки механічних властивостей від рулонів дослідницької партії, було відібрано після остаточного охолодження. Результати механічних випробувань наведені в табл. 6.27.

Таблиця 6.27 – Результати механічних випробувань дослідницької партії рулонів

№ плавки	№ рулону	Механічні властивості			
		Границя плинності, МПа	Тимчасовий опір, МПа	Відносне видовження, %	Вигін по оправці
162955-3	1	465	540	25	Без розтріскування
	2	495	550	28	Без розтріскування
	3	495	550	28	Без розтріскування
Вимоги EN10149-2 до S460MC		≥460	520-670	17	Без розтріскування

Отримані результати механічних випробувань повністю відповідають вимогам EN10149-2 до сталі марки S460MC. При цьому, отримані результати випробувань знаходяться ближче до нижнього рівню вимог стандарту EN10149-2. Для забезпечення стабільних результатів механічних властивостей прокатку необхідно продовжити відпрацювання технології.

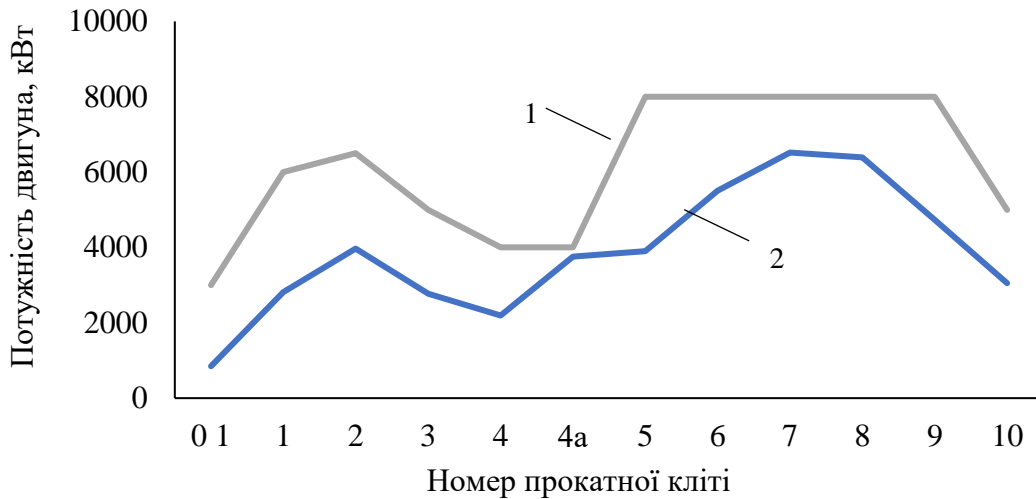


Рисунок 6.17 – Порівняння встановленої (1) та розрахованої (2) потужності двигунів по клітях

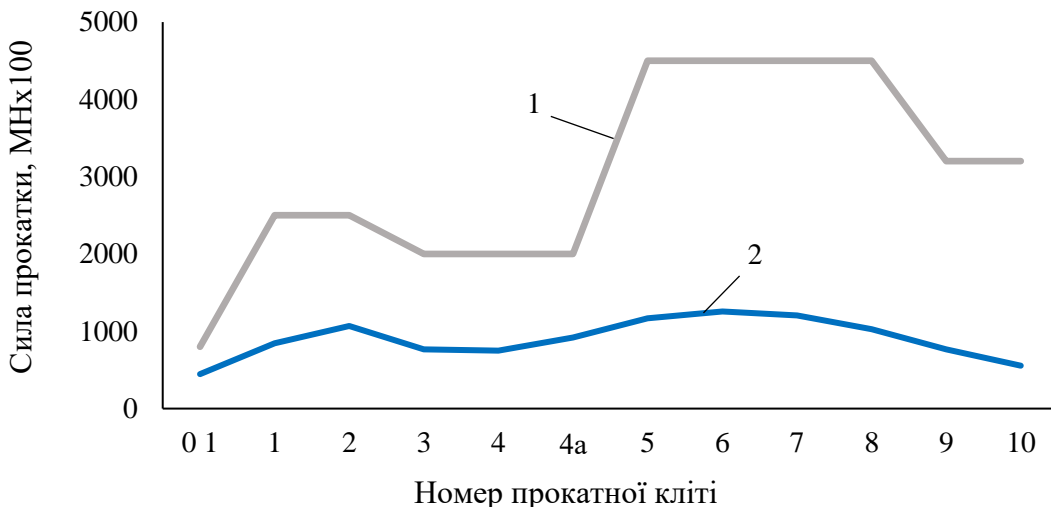


Рисунок 6.18 – Порівняння встановленої (1) та розрахованої (2) сили прокатки по клітях

З урахуванням фактичних параметрів охолодження прокату (використано 13 з 14 секцій), та отриманих термомеханічних показників (температура змотування не опускалася нижче 600 °С) можна зробити висновок про наближення до верхньої межі у категорії міцності прокату, який може бути освоєний способом термомеханічної прокату на наявному устаткуванні, при використанні аналогічного хімічного складу. Подальше освоєння виробництва більш міцного сортаменту можливо здійснювати за допомогою підвищення складу мікролегуючих елементів в сталі.



Таким чином, з метою забезпечення замовників компанії прокатом відповідного рівня якості, для умов стану 1700 ПрАТ «ММК ІМЕНІ ІЛЛІЧА» розроблена технологія термомеханічної контрольованої прокатки рулонів перерізом 2,5х1000 мм зі сталі марки S460MC згідно з вимогами EN 10149-2.

Вперше в умовах стану 1700 ПрАТ «ММК ІМЕНІ ІЛЛІЧА» вироблена партія прокату з сталі марки S460MC, яка повністю відповідає вимогам європейського стандарту EN 10149-2. Акт освоєння виробництва нового продукту наведений в додатку Н.

Визначено наближення до верхньої можливої межі у категорії міцності прокату, який може бути освоєний способом термомеханічної прокатки на наявному устаткуванні стану 1700 без змінення хімічного складу.

Встановлена можливість подальшого освоєння прокату більш міцних категорій (вище за S460MC) за рахунок підвищення складу мікролегуючих елементів в сталі.

## **6.2.2 Освоєння виробництва прокату для труб способом термомеханічної прокатки**

### **6.2.2.1 Освоєння виробництва рулонного прокату зі сталі марки В товщиною 4,7 мм та 5,7 мм способом термомеханічної прокатки згідно з вимогами стандарту API-5L на стані 1700 «ММК ІМЕНІ ІЛЛІЧА»**

Видобуток вуглеводнів та їх транспортування є великим сегментом світової економіки, який потребує надвеликих ресурсів. Значна частина витрат йде на будівництво нафто-газо транспортних систем. Зниження їх металоємності є безумовно надважливим комплексним питанням, яке охоплює цілу низку інститутів, починаючи з проектування транспортних систем та забезпечення їх зварними трубами, і закінчуючи можливістю металургійних виробників забезпечити встановлені вимоги.

Безперервне прагнення до зниження металоємності проектів призвело до всебічного поглибленого вивчення проблем, пов'язаних з цим. Так, отримали розвиток вивчення впливу різноманітних мікролегуючих елементів в сталі (таких як Ti, Nb, V, Mo, останнім часом Cr, Ni, Cu, B) на властивості прокату та труб, вплив різноманітних технологій прокатки (починаючи з термообробки нормалізацією і надалі нормалізувальна прокатка, контрольована прокатка, термомеханічна контрольована прокатка з прискореним охолодженням), що задіяло цілу низку наукових інститутів, металургійних виробництв та підприємств по видобутку та збагаченню руд, які містять перераховані мікролегуючі елементи.

На сьогодні продукт у вигляді рулонів чи товстого листа, який використовується для виробництва електрозварних труб, є мабуть найбільш наукоємним, а здобуті технології надають розвитку для впровадження нових та вдосконалення існуючих технологій та продукції іншого призначення (як, наприклад, будівництва, машинобудування).

Розробка технології термомеханічної контрольованої прокатки для виробництва гарячекатаних рулонів перерізом  $4,7 \times 1190$  мм та  $5,7 \times 1190$  мм зі сталі марки В для подальшого виробництва електрозварних труб згідно стандарту API-5L для умов стану 1700, є актуальним завданням, що дозволить забезпечити виробництво рулонів, які відповідають сучасним світовим вимогам та задовольняють потреби вітчизняних та закордонних виробників електрозварних труб.

Метою дослідження є визначення технічної можливості виробництва гарячекатаних рулонів зі сталі марки В для подальшого виробництва електрозварних труб по стандарту API- 5L, розмірами  $4,7 \times 1190$  мм та  $5,7 \times 1190$  мм в умовах стану 1700 «ММК ІМЕНІ ІЛЛІЧА».

Детальній сортамент, що виробляється, поточні обмеження, перелік та характеристики основного устаткування стану 1700 «ММК ІМЕНІ ІЛЛІЧА» наведені в розділі 1.3.2.1.

Вимоги до хімічного складу згідно зі стандартом API-5L, здебільшого, лімітують тільки верхню межу вмісту хімічних елементів та дають широке поле

діяльності виробникам у забезпеченні необхідного рівня властивостей, які поділяють на два рівні: базовий – PSL-1 та з додатковими вимогами – PSL-2, табл. 6.28.

Таблиця 6.28 – Вимоги до хімічного складу сталі марки В згідно зі стандартом API-5L

Вимоги	Марка сталі	Хімічний склад, %										
		C	Si	Mn	P	S	V	Nb	Ti	Nb+V	Nb+V+Ti	CE
API-5L PSL-1	В	≤0,28	-	≤ 1,20	≤0,030	≤0,030	-	-	-	≤0,06	≤0,15	-
API-5L PSL-2	ВМ	≤0,22	≤0,45	≤ 1,20	≤0,025	≤0,015	≤ 0,05	≤ 0,05	≤ 0,04	≤0,06	≤0,15	≤0,43
Додаткові вимоги PSL-1: Cu ≤ 0,50 %; Ni ≤ 0,50 %; Cr ≤ 0,50 %; Mo ≤ 0,15 %.												
Додаткові вимоги PSL-2: Cu ≤ 0,50%; Ni ≤ 0,30%; Cr ≤ 0,30%; Mo ≤ 0,15 %												
Вуглецевий еквівалент розраховується по формулі: $CE = C + \frac{Mn}{6} + \frac{(Cr+Mo+V)}{5} + \frac{(Ni+Cu)}{15}$												

Також, згідно з вимогами PSL-1 API-5L марка В може вироблятися у будь який наступний спосіб: гаряча прокатка, прокатка з нормалізацією, термомеханічна прокатка. Згідно з вимогами PSL-2 API-5L марка ВМ може вироблятися тільки способом термомеханічної прокатки. В вимогах також є способи поставки після різноманітних способів термічної обробки, але в даній роботі ми їх не розглядаємо.

Для виробництва партії гарячекатаних рулонів зі сталі марки В, розмірами 4,7×1190 мм та 5,7×1190 мм було розроблено хімічний склад, табл. 6.29, та виготовлені сляби розмірами 150×1200×6200 мм. Слід зазначити, що при освоєнні даного сортаменту у якості вимог до прокату застосовувались базові вимоги API-5L, додаткові вимоги з урахуванням трубного переділу замовником не вимагалися.

Таблиця 6.29 – Хімічний склад плавки зі сталі марки В

Плавка	Масова частка хімічних елементів, %													
	C	Mn	Si	S	P	Cr	Ni	Cu	V	Mo	Nb	Ti	Al	CE
172648-3	0,14	0,77	0,18	0,013	0,022	0,03	0,01	0,02	0,003	0,001	0,002	0,002	0,032	0,28

Оскільки до прокату з цієї сталі не пред'являється підвищених вимог, у хімічний склад спеціально не додавались мікролегуючі елементи. Розроблений хімічний склад відповідає вимогам PSL-1 та PSL-2, та може бути застосований до марки сталі В та ВМ.

На підставі хімічного складу (див. табл. 6.29) розраховано цільові термомеханічні показники процесу прокатки [241, 244] з метою забезпечення необхідного комплексу механічних властивостей готового прокату сталі марки В, табл. 6.30.

Таблиця 6.30 – Термомеханічні показники процесу прокатки

Параметр	Одиниця виміру	Значення параметру
Температура нагрівання слябів	°С	1260-1280
Час нагрівання	Годин-хвилин	≤2-35
Температура прокатки після кліті 4а	°С	≥1040
Температура прокатки після кліті 10	°С	840-880
Температура змотування рулонів	°С	560-620
Кількість секцій, які використовуються для прискореного охолодження	шт	8-10
Швидкість охолодження	°С/с	85-95

З метою перевірки технічної можливості виробництва, а також отримання технологічних параметрів, необхідних для здійснення термомеханічного процесу прокатки, попередньо для двох товщин було розраховано цільовий температурно-деформаційний режим, табл. 6.31, 6.32 [245].

Слід зазначити, що цільові розраховані параметри прокатки у чорновій групі клітей є однакові, оскільки прокатка виконувалась з одного розміру слябів 150×1200×6200 мм та одного розміру підкату 24×1190 мм для чистової групи.

Цільова схема термомеханічного процесу прокатки рулонів зі сталі марки В на стані 1700 виглядає наступним чином, рис. 6.19.

Згідно з виконаним розрахунком встановлені експлуатаційні обмеження устаткування чорнової та чистової груп клітей не були перевищені. Таким чином,

Таблиця 6.31 – Температурно-деформаційний режим прокатки рулонів з марки сталі В розмірами 4,7×1190 мм на стані 1700

№ кліті	Показники					
	Товщина <sup>a</sup> , мм	Температура, °С	Розрахована сила прокатки, МН×10 <sup>-2</sup>	Максимально допустима сила прокатки, МН×10 <sup>-2</sup>	Швидкість прокатки, м/с	Потужність двигуна, кВт
0 <sup>b</sup>	150					
01	130	1260	555,1	800	0,85	1054,4
1	95	1237	1030,8	2500	1,26	3432,8
2	58	1213	1287,0	2500	1,36	4770,8
3	41	1174	910,8	2000	1,78	3288,1
4	30	1127	854,9	2000	1,78	2503,3
4a	24	1050	805,6	2000	2,89	2873,3
5	18	934	1117,1	2400	2,55	4052,2
6	13	921	1180,6	2400	3,40	5244,2
7	9,5	909	1127,3	2000	4,45	5419,4
8	7,2	896	994,5	1800	5,52	4895,3
9	5,5	880	970,1	1700	7,30	5521,2
10	4,7	864	647,0	1500	9,44	3427,5

<sup>a</sup> товщина після проходу; <sup>b</sup> початкові дані

Таблиця 6.32 – Температурно-деформаційний режим прокатки рулонів з марки сталі В розмірами 5,7×1190 мм на стані 1700

№ кліті	Показники					
	Товщина <sup>a</sup> , мм	Температура, °С	Розрахована сила прокатки, МН×10 <sup>-2</sup>	Максимально допустима сила прокатки, МН×10 <sup>-2</sup>	Швидкість прокатки, м/с	Потужність двигуна, кВт
0 <sup>b</sup>	150					
01	130	1260	555,1	800	0,85	1054,4
1	95	1237	1030,8	2500	1,26	3432,8
2	58	1213	1287,0	2500	1,36	4770,8
3	41	1174	910,8	2000	1,78	3288,1
4	30	1127	854,9	2000	1,78	2503,3
4a	24	1050	805,6	2000	2,89	2873,3
5	18	934	1117,1	2400	2,55	4052,2
6	13	921	1180,6	2400	3,40	5244,3
7	10	909	994,0	2000	4,45	4452,3
8	8	894	871,7	1800	5,52	4029,5
9	6,5	877	840,8	1700	7,30	4522,5
10	5,7	861	606,4	1500	9,44	3212,7

<sup>a</sup> товщина після проходу; <sup>b</sup> початкові дані

дослідна партія прокату може бути вироблена на наявному устаткуванні із

застосуванням розрахованих температурно-деформаційних режимів.

Виробництво дослідної партії гарячекатаних рулонів перерізом  $4,7 \times 1190$  мм та  $5,7 \times 1190$  мм з марки сталі В згідно з базовими вимогами API-5L здійснювалось зі слябів однієї плавки 172648-3.

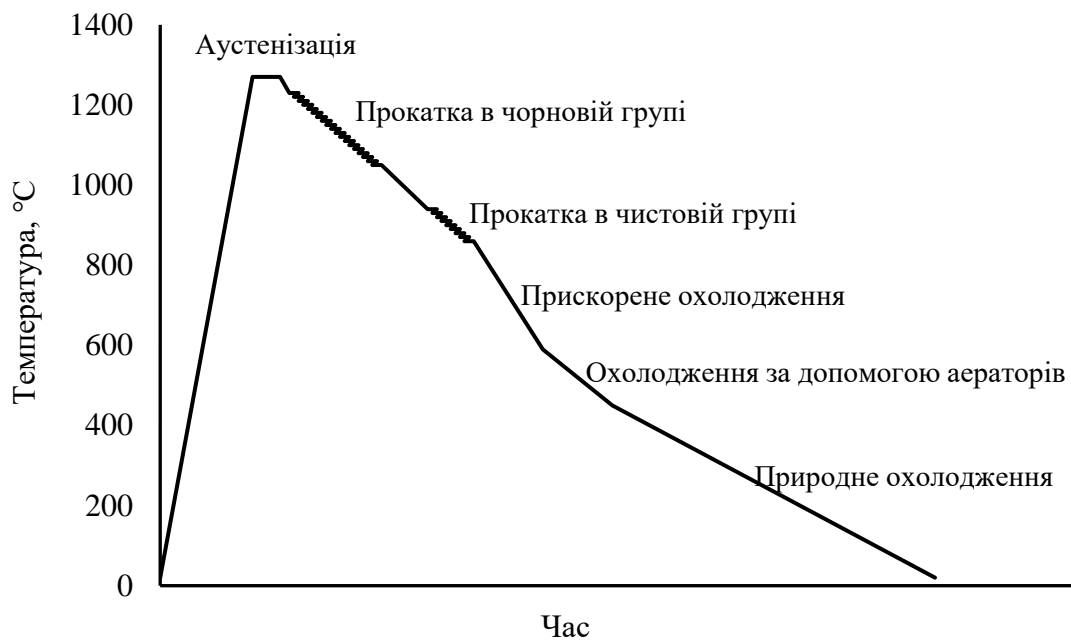


Рисунок 6.19 – Схема термомеханічного процесу прокатки рулонів зі сталі марки В на стані 1700

Після прокатки рулони було оброблено на установці прискореного охолодження. Фактичні термомеханічні параметри виробництва дослідної партії наведені в табл. 6.33.

Слід зазначити, що за умов виробничого процесу час нагрівання всіх слябів було збільшено з 2-35 годин при цільовому розрахунку до 3-56 годин, фактично.

Після змотування рулони були відправлені на додаткове контрольоване повітряне охолодження до температури 450 °C, яке здійснювали за допомогою промислових аераторів з метою зменшення товщини шару повітряної окалини. Після контрольованого охолодження рулони були відправлені на склад для остаточного природнього охолодження.

Таблиця 6.33 – Фактичні термомеханічні показники процесу прокатки

Параметр	Одиниця виміру	Значення параметру
Температура нагрівання слябів	°С	1260-1270
Час нагрівання	Годин-хвилин	3-56
Температура прокатки після кліті 4а	°С	1088-1112
Температура прокатки після кліті 10	°С	851-884
Температура змотування рулонів	°С	583-613
Кількість секцій для прискореного охолодження	шт	10
Швидкість охолодження	°С/с	90

Аналіз якості отриманих результатів виконувався на підставі механічних випробувань та металографічного дослідження.

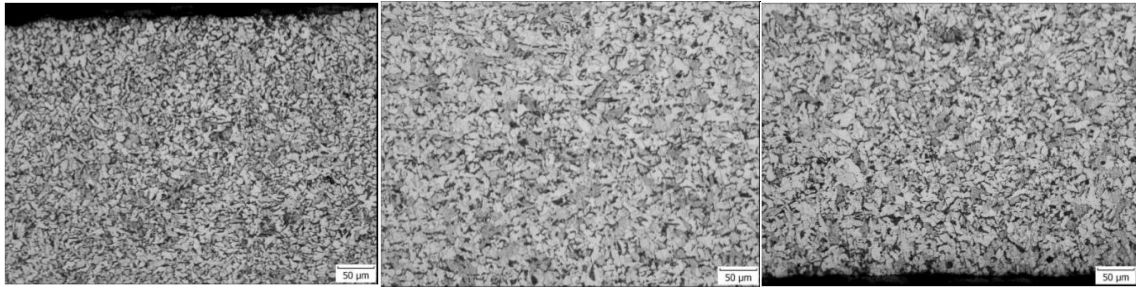
Проби для оцінки механічних властивостей від рулонів дослідницької партії було відібрано після остаточного охолодження. Результати механічних випробувань наведені в табл. 6.34.

Таблиця 6.34 – Результати механічних випробувань дослідної партії рулонів

№ плавки	№ рулону	Товщина рулонів, мм	Механічні властивості				
			Границя плинності, МПа	Тимчасовий опір, МПа	Відносне видовження, %	Вигін по оправці 180°	Границя плинності / Тимчасовий опір
162955-3	1	5,7	360	475	30	Без розтріскування	0,76
	2		340	465	33	Без розтріскування	0,73
	3	4,7	360	480	36	Без розтріскування	0,75
	4		365	485	40	Без розтріскування	0,75
Вимоги API-5L PSL-1			≥245	≥415	≥18	Без розтріскування	-
Вимоги API-5L PSL-2			245-450	415-655	≥18	Без розтріскування	≤0,93

Отримані результати механічних випробувань відповідають вимогам рівня PSL-1 та PSL-2 API-5L для сталі марки В. Слід зазначити, що відповідно до вимог PSL-2 додатково до вказаних (див. табл. 6.34) виконуються випробування на ударну в'язкість, які в даній роботі не досліджувалися.

Для аналізу внутрішньої якості прокату проведені металографічні дослідження зразків від рулонів товщиною 4,7 мм та 5,7 мм, плавки 162955-3. Мікроструктура зразків наведена на рис. 6.20, 6.21. Результати повного металографічного дослідження наведено у додатку О.

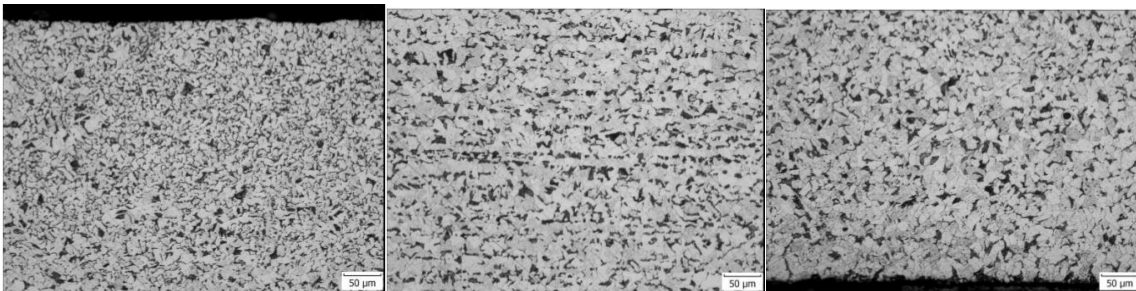


поверхня

вісь

поверхня

Рисунок 6.20 – Мікроструктура поперечних зразків від рулонів товщиною 4,7 мм, плавки 162955-3 після травлення,  $\times 200$



поверхня

вісь

поверхня

Рисунок 6.21 – Мікроструктура поперечних зразків від рулонів товщиною 5,7 мм, плавки 162955-3 після травлення,  $\times 200$

Мікроструктура зразків від рулону товщиною 4,7 мм є ферит-перлітною з зерном фериту 10 номеру. Смугастість на поверхні зразків відсутня. На половині товщини смугастість дорівнює 1 балу.

Мікроструктура зразків від рулону товщиною 5,7 мм є ферит-перлітною з зерном фериту 9, 10 номеру. Смугастість на поверхні зразків відсутня. На половині товщини смугастість дорівнює 2 балам.

Такі відмінності стану мікроструктури прокату та смугастості на різних товщинах свідчать про недостатнє охолодження прокату товщиною 5,7 мм на



установці прискореного охолодження в порівнянні з товщиною рулонів 4,7 мм, що найбільш відбилося на осьовій частині прокату.

Для покращення мікроструктури прокату товщиною 5,7 мм або більшої необхідне додаткове дослідження з корегуванням технології охолодження прокату (збільшення охолоджувальних секцій), а також можливо скорегувати хімічний склад з доданням незначної кількості мікролегуючих елементів в сталь з метою гальмування рекристалізації та зниження крапки структурного перетворення аустеніту, що частково дозволить компенсувати обмежені можливості існуючого устаткування прискореного охолодження.

Таким чином, вперше, для умов стану 1700 «ММК ІМЕНІ ІЛЛІЧА», розроблена технологія термомеханічної контрольованої прокатки рулонів перерізом 4,7×1190 мм та 5,7×1190 мм зі сталі марки В для подальшого виробництва електрозварних труб згідно з вимогами API-5L, рівень PSL-1.

Вперше в умовах стану 1700 ПрАТ «ММК ІМЕНІ ІЛЛІЧА» вироблена дослідницька партія прокату зі сталі марки В для подальшого виробництва електрозварних труб, яка повністю відповідає вимогам американського стандарту API-5L, рівень PSL-1. Акт освоєння нового продукту наведений у додатку П.

Для визначення можливості виробництва прокату зі сталі марки В для подальшого виробництва електрозварних труб з забезпеченням вимог API-5L у повній відповідності до рівня PSL-2 необхідно провести додаткові дослідження випробувань на ударну в'язкість.

Виконано порівняння якості дослідницької партії прокату товщиною 4,7 мм та 5,7 мм. Встановлено, що для покращення мікроструктури прокату товщиною 5,7 мм або подальшого освоєння більших товщин необхідне додаткове дослідження технології охолодження прокату та змінення хімічного складу сталі з доданням мікролегуючих елементів.

### 6.2.2.2 Освоєння виробництва рулонного прокату зі сталі категорії міцності X52M товщиною 8 мм згідно з вимогами стандарту API-5L на стані 1700 «ММК ІМЕНІ ІЛЛІЧА»

Метою дослідження є визначення технічної можливості виробництва гарячекатаних рулонів із сталі категорії міцності X52M для подальшого виробництва електрозварних труб по стандарту API-5L, розмірами 8×1260 мм в умовах стану 1700 ПрАТ «ММК ІМЕНІ ІЛЛІЧА».

Розробка технології термомеханічної контрольованої прокатки для виробництва гарячекатаних рулонів перерізом 8×1260 мм із сталі категорії міцності X52M, для подальшого виробництва електрозварних труб по стандарту API-5L, для умов стану 1700 є актуальним завданням, що дозволить забезпечити виробництво рулонів які відповідають сучасним світовим вимогам та задовольняють потреби вітчизняних та закордонних виробників електрозварних труб.

Вимоги до хімічного складу згідно зі стандартом API-5L, здебільшого, лімітують тільки верхню межу вмісту хімічних елементів та дають широке поле діяльності виробникам у забезпеченні необхідного рівня властивостей, та поділяють на два рівні: базовий – PSL-1, та з додатковими вимогами – PSL-2, табл. 6.35.

Таблиця 6.35 – Вимоги до хімічного складу сталі категорії міцності X52 згідно зі стандартом API-5L

Вимоги	Марка сталі	Хімічний склад, %						
		C	Si	Mn	P	S	Nb+V+Ti	CE P <sub>cm</sub>
API-5L PSL-1	X52	≤0,28	-	≤1,40	≤0,030	≤0,030	≤0,15	-
API-5L PSL-2	X52M	≤0,22	≤0,45	≤1,40	≤0,025	≤0,015	≤0,15	≤0,25
Додаткові вимог PSL-1: Cu ≤ 0,50 %; Ni ≤ 0,50 %; Cr ≤ 0,50 %; Mo ≤ 0,15 %.								
Додаткові вимог PSL-2: Cu ≤ 0,50%; Ni ≤ 0,30%; Cr ≤ 0,30%; Mo ≤ 0,15 %								
Вуглецевий еквівалент розраховується по формулі:								
$CE P_{cm} = C + \frac{Si}{30} + \frac{Mn}{20} + \frac{Cu}{20} + \frac{Ni}{60} + \frac{Cr}{20} + \frac{Mo}{15} + \frac{V}{10} + 5B$								
Формула застосовується при вмісті вуглецю ≤0,12%.								

Також, згідно з вимогами PSL-1 API-5L марка X52 може вироблятися у будь який наступний спосіб: гаряча прокатка, прокатка з нормалізацією, термомеханічна прокатка. Згідно з вимогами PSL-2 API-5L марка X52M може вироблятися тільки способом термомеханічної прокатки. В вимогах також є способи поставки після різноманітних способів термічної обробки, але в даній роботі ми їх не розглядаємо.

Для виробництва дослідної партії гарячекатаних рулонів із сталі категорії міцності X52M, розмірами 8×1260 мм було розроблено два варіанти хімічного складу та виготовлено дві різноманітні плавки, табл. 6.36 [246]. Слід зазначити, що при освоєнні даного сортаменту у якості вимог до прокату застосовувались базові вимоги API-5L, додаткові вимоги с врахуванням трубного переділу замовником не виставлялися. У якості мікролегуючих елементів використано Nb, з різним вмістом по плавках, та Ti. Розроблений хімічний склад відповідає вимогам PSL-1 та PSL-2, та може бути застосований до сталі категорії міцності X52 та X52M [247]. На підставі хімічного складу обох плавки, табл. 6.36, розраховано цільові термомеханічні показники процесу прокатки, з метою забезпечення необхідного комплексу механічних властивостей готового прокату зі сталі категорії міцності X52 та оцінки впливу різного рівня мікролегуючих елементів, табл. 6.37 [248]. Цільова схема термомеханічного процесу прокатки рулонів зі сталі категорії міцності X52 на стані 1700 виглядає наступним чином, рис. 6.22.

Таблиця 6.36 – Хімічний склад плавки сталі категорії міцності X52

Плавка	Масова частка хімічних елементів, %													
	C	Mn	Si	S	P	Cr	Ni	Cu	V	Mo	Nb	Ti	Al	CE P <sub>cm</sub>
254077-2	0,10	1,40	0,21	0,009	0,020	0,03	0,02	0,02	0,003	0,004	0,040	0,017	0,032	0,18
164022-3	0,12	1,36	0,03	0,009	0,019	0,02	0,01	0,01	0,003	0,002	0,026	0,019	0,043	0,19

Таблиця 6.37 – Термомеханічні показники процесу прокатки

Параметр	Одиниця виміру	Значення параметру
Температура прокатки після кліті 10	°C	820-880
Температура змотування рулонів	°C	580-630
Кількість секцій, які використовуються для прискореного охолодження	шт	10-14
Швидкість охолодження	°C/c	45-55



Рисунок 6.22 – Схема термомеханічного процесу прокатки рулонів зі сталі категорії міцності X52 на стані 1700

З метою перевірки технічної можливості виробництва, а також отримання технологічних параметрів, необхідних для здійснення термомеханічного процесу прокатки, попередньо, для двох плавок було розраховано цільовий температурно-деформаційний режим, табл. 6.38, 6.39 [248].

Слід зазначити, що плавка 164022-3 була розлита у сляби розмірами  $150 \times 1620 \times 6200$  мм, плавка 254077-2 була розлита у сляби  $250 \times 1550 \times 6200$ , які після редукування до розмірів  $150 \times 1260 \times 5800$  (з одного сляба  $250 \times 1550 \times 6200$  мм після редукування отримано два сляба з вказаними розмірами) було використано для подальшої прокатки [11, 12, 16].

Необхідно відмітити, що цільові деформаційні параметри прокатки двох плавок є однаковими. Незначна відмінність у температурах, силі прокатки на потужності двигунів по проходах пов'язана з різним хімічним складом двох плавок (див. табл. 6.36), а також різною довжиною слябів, які використовувались.

Таблиця 6.38 – Температурно-деформаційний режим прокатки рулонів плавки 254077-2, сталі категорії міцності X52 розмірами 8×1260 мм на стані 1700

№ кліті	Показники					
	Товщина <sup>a</sup> , мм	Температура, °С	Розрахована сила прокатки, МН×10 <sup>-2</sup>	Максимально допустима сила прокатки, МН×10 <sup>-2</sup>	Швидкість прокатки, м/с	Потужність двигуна, кВт
0 <sup>b</sup>	150					
01	130	1260	551,4	800	0,85	1047,3
1	95	1238	1036,6	2500	1,26	3452,1
2	58	1215	1315,0	2500	1,36	4874,9
3	41	1177	936,1	2000	1,78	3380,0
4	30	1131	891,0	2000	1,78	2608,9
4a	24	1056	856,4	2000	2,89	3054,5
5	19	934	1097,8	2400	2,21	3169,7
6	14	918	1340,0	2400	3,06	5357,0
7	11	906	1115,7	2000	3,92	4397,5
8	9,5	891	764,6	1800	4,63	2608,1
9	8,5	871	646,3	1700	5,16	2060,6
10	8	850	429,5	1500	5,70	1130,5

<sup>a</sup> товщина після проходу; <sup>b</sup> початкові дані

Таблиця 6.39 – Температурно-деформаційний режим прокатки рулонів плавки 164022-3, сталі категорії міцності X52 розмірами 8×1260 мм на стані 1700

№ кліті	Показники					
	Товщина <sup>a</sup> , мм	Температура, °С	Розрахована сила прокатки, МН×10 <sup>-2</sup>	Максимально допустима сила прокатки, МН×10 <sup>-2</sup>	Швидкість прокатки, м/с	Потужність двигуна, кВт
0 <sup>b</sup>	150					
01	130	1260	561,7	800	0,85	1067,0
1	95	1237	1061,7	2500	1,26	3535,6
2	58	1213	1352,4	2500	1,36	5013,3
3	41	1174	969,9	2000	1,78	3501,6
4	30	1127	926,7	2000	1,78	2713,6
4a	24	1050	900,9	2000	2,89	3213,2
5	19	934	1125,7	2400	2,21	3250,3
6	14	918	1377,7	2400	3,06	5508,1
7	11	907	1145,5	2000	3,92	4515,1
8	9,5	892	786,7	1800	4,63	2683,4
9	8,5	873	662,6	1700	5,16	2112,7
10	8	852	440,6	1500	5,70	1159,7

<sup>a</sup> товщина після проходу; <sup>b</sup> початкові дані

Порівняння сили при прокатці дослідних плавко рулонів наведено на рис. 6.23.

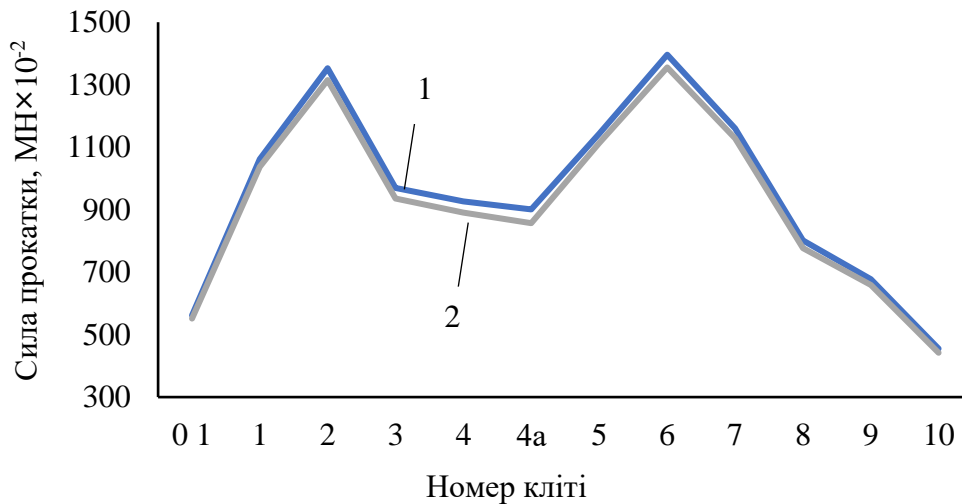


Рисунок 6.23 – Порівняння сили прокатки по клітях при виробництві рулонів з плавки 164022-3 (1), та плавки 254077-2 (2)

Таким чином, згідно з розрахунком, при виробництві рулонів розмірами  $8 \times 1260$  мм по однакових режимах прокатки, плавка 164022-3 з більшим вмістом С та меншим вмістом Nb має більші властивості міцності, ніж плавка 254077-2.

Цей розрахунок підтверджує переваги термомеханічного способу прокатки, та можливість його впровадження на устаткуванні, яке не було розраховане на виробництво прокатних продуктів з рівнями міцності, які перевищують проектні. Сталь яка застосовується для термомеханічної прокатки зазвичай має нижчий рівень міцності в процесі прокатки ніж сталі які виробляються іншими способами, завдяки меншому вмісту хімічних елементів. Особливості цього способу є те, що формування кінцевих властивостей відбувається вже після процесу прокатки. Таким чином прокатне устаткування працює без перевищення експлуатаційних характеристик.

Згідно з виконаними розрахунками, встановлені експлуатаційні обмеження устаткування чорнової та чистової груп клітей не були перевищені. Таким чином, дослідна партія прокату може бути вироблена на наявному устаткуванні із застосуванням розрахованих температурно-деформаційних режимів.

Виробництво дослідної партії гарячекатаних рулонів перерізом  $8 \times 1260$  мм, зі сталі категорії міцності X52 згідно з базовими вимогами API-5L здійснювалось з слябів двох плавок 164022-3, та 254077-2 з різним хімічним складом.

Після прокатки, рулони були оброблені на установці прискореного охолодження. Фактичні термомеханічні параметри виробництва дослідницької партії наведені в табл. 6.40.

Таблиця 6.40 – Фактичні термомеханічні показники процесу прокатки

Параметр	Одиниця виміру	Значення параметру
Температура прокатки після кліті 10	°C	865-885
Температура змотування рулонів	°C	622-644
Кількість секцій для прискореного охолодження	шт	10-11
Швидкість охолодження	°C/c	49

Слід зазначити, що всі температури після кліті 10 та температури змотування знаходились в горі діапазону, та на деяких рулонах перевищили верхній рівень.

Після змотування рулони були відправлені на додаткове контрольоване повітряне охолодження до температури 450 °C, яке здійснювали за допомогою промислових аераторів, з метою зменшення товщини шару повітряної окалини. Після контрольованого охолодження рулони були відправлені на склад для остаточного природнього охолодження.

Аналіз якості отриманих результатів виконувався на підставі механічних випробувань та металографічного дослідження. Повне металографічне дослідження наведено у додатку Р. В дослідженні вказано марку сталі S355MC як порівняльну, хімічний склад якої було використано для виробництва сталі категорії міцності X52 (X52M).

Проби для оцінки механічних властивостей від рулонів дослідницької партії було відібрано після остаточного охолодження. Результати механічних випробувань наведені в табл. 6.41.

Отримані результати механічних випробувань відповідають вимогам рівня PSL-1 та PSL-2 API-5L для сталі категорії міцності X52 та X52M.

Однак, слід зазначити, що отриманий низький рівень відносного видовження, та ударної в'язкості не є типовим для дослідної марки сталі. Низькі результати по цім

Таблиця 6.41 – Результати механічних випробувань дослідницької партії рулонів

№ плавки	Механічні властивості					Ударна в'язкість, КВ, Дж, при температурі випробувань, °С			
	Границя плинності, $\sigma_T$ , МПа	Тимчасовий опір, $\sigma_B$ , МПа	Відносне видовження, $\delta$ , %	Вигін по оправці 180°	$\sigma_T/\sigma_B$	0	-20	-40	-60
254077-2	425	520	24	Без розтріскування	0,82	-	41	37	34
	430	520	24		0,83		37	38	33
164022-3	380	500	24	Без розтріскування	0,76	-	32	30	30
	390	500	27		0,78		34	32	32
Вимоги API-5L PSL-1	$\geq 360$	$\geq 460$	16	Без розтріскування	-	-	-	-	-
Вимоги API-5L PSL-2	360-530	460-760	16	Без розтріскування	0,93	27	-	-	-

показникам отримані в наслідок недостатнього прискореного охолодження та підвищених температур кінця прокатки в кліті 10, та температури змотування.

Для аналізу внутрішньої якості прокату проведені металографічні дослідження зразків від рулонів плавки 254077-2 та плавки 164022-3. Мікроструктура зразків наведена на рис. 6.24, 6.25.

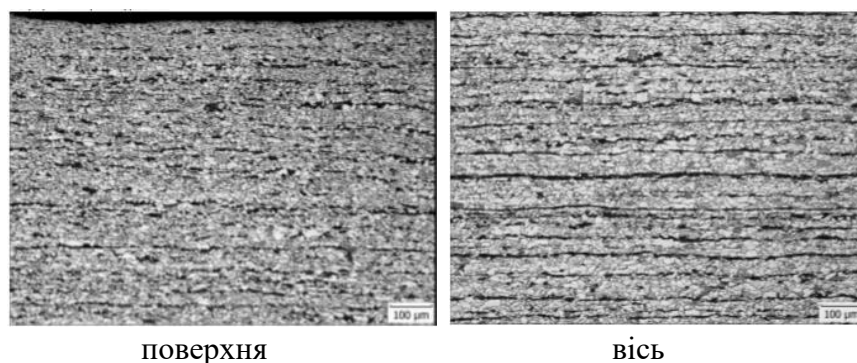
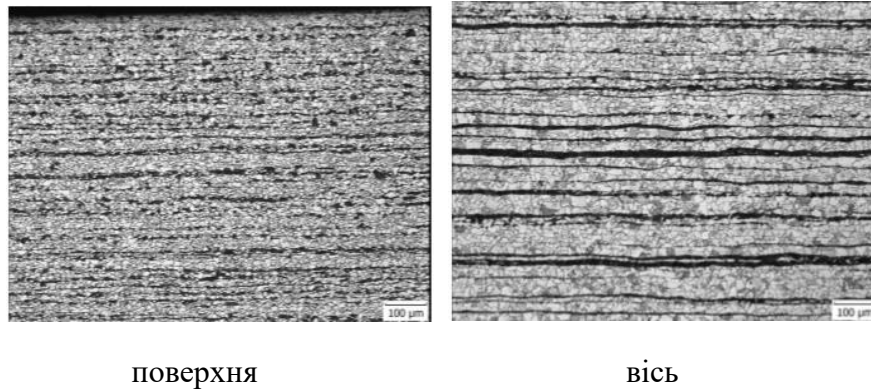


Рисунок 6.24 – Мікроструктура поперечних зразків від рулонів товщиною 8 мм, плавки 254077-2 після травлення,  $\times 100$





поверхня

вісь

Рисунок 6.25 – Мікроструктура поперечних зразків від рулонів товщиною 8 мм, плавки 164022-3 після травлення,  $\times 100$

Мікроструктура зразків від рулонів плавки 254077-2 мм є ферит-перлітною з зерном фериту на поверхні 9-10 номеру, в осі 8-9 номеру. Смугастість на поверхні зразків 1 бал, в осі 2 бал. Мікроструктура зразків від рулону плавки 164022-3 є ферит-перлітною з зерном фериту 10 номеру. Смугастість на поверхні зразків 2 бал, в осі 3-4 бал. Отримані показники мікроструктури свідчать про недостатнє здійснене прискорене охолодження прокату на перевищення цільових термомеханічних температур на обох плавках, що також підтверджується результатами механічних випробувань.

Більш краща мікроструктура та механічні властивості отримані на плавці 254077-2 за рахунок більшого вмісту Nb-0,040%, в порівнянні з плавкою 164022-3 (Nb-0,026%), при однакових температурно-деформаційних параметрах. Таким чином, підтверджено позитивний вплив Nb на формування мікроструктури та властивості прокату при термомеханічному способі обробки.

З метою покращення мікроструктури та механічних властивостей рулонів товщиною 8 мм зі сталі категорії міцності X52 необхідне додаткове дослідження з корегуванням технології в частині зниження температур змотування, збільшення кількості охолоджувальних секцій. Також слід зазначити важливість цього дослідження так як виробництво товщини 8 мм знаходиться на межі технічних можливостей стану 1700.

Таким чином, вперше, для умов стану 1700 «ММК ІМЕНІ ІЛЛІЧА» розроблена технологія термомеханічної контрольованої прокатки рулонів перерізом 8×1260 мм зі сталі категорії міцності X52 для подальшого виробництва електрозварних труб згідно з вимогами API-5L, рівень PSL-1.

Вперше, в умовах стану 1700 «ММК ІМЕНІ ІЛЛІЧА» вироблена дослідницька партія прокату з сталі категорії міцності X52 (X52M), для подальшого виробництва електрозварних труб, яка повністю відповідає вимогам американського стандарту API-5L, рівень PSL-1, та PSL-2.

В роботі підтверджено переваги термомеханічного способу прокатки, завдяки особливостям хімічного складу та нижчого рівня міцності в процесі виробництва, в порівнянні з іншими способами прокатки, та можливість його впровадження на устаткуванні, яке не було розраховане на виробництво продуктів таких рівнів міцності.

Підтверджено позитивний вплив Nb на формування мікроструктури та властивості прокату при термомеханічному способі обробки.

Встановлено, що для покращення мікроструктури прокату граничної для стану 1700 товщини 8 мм необхідне додаткове дослідження з корегуванням технології в частині зниження температур змотування та збільшення кількості охолоджувальних секцій.

### **6.2.3 Освоєння виробництва товстолистого прокату зі сталі марки EN36 товщиною 25 мм способом термомеханічної прокатки згідно з вимогами Правил Bureau Veritas на стані 3600 «МК «АЗОВСТАЛЬ»**

Розробка технології термомеханічної контрольованої прокатки для виробництва товстолистого прокату розмірами 25×2150×8000 мм із судосталі марки EN36 замість термічної обробки нормалізацією в умовах стану 3600 є актуальним завданням, що забезпечить виробництво прокату відповідно до сучасних вимог та дозволить знизити собівартість продукції, додаток С.

Метою дослідження є визначення технічної можливості виробництва товстолистового прокату із судносталі підвищеної міцності марки ЕН36 згідно з вимогами Правил Bureau Veritas (BV), розмірами 25×2150×8000 мм в умовах стану 3600 «МК АЗОВСТАЛЬ».

Детальній сортамент, що виробляється, поточні обмеження, перелік та характеристики основного устаткування стану 3600 «МК «АЗОВСТАЛЬ» наведено в розділі 1.3.1.2.

Стан виробляє товстолистовий прокат конструкційного, машинобудівного, суднобудівного призначення, а також для будівництва морських бурових платформ, для виготовлення електрозварних труб великого діаметру з підвищеним тиском та іншого призначення.

Слід зазначити, що наразі, виробництво прокату із судносталі підвищеної міцності марки ЕН36 товщиною до 50 мм на стані 3600 здійснюється з виконанням термічної обробки – нормалізації, що відповідно зазначено сертифікатом №08458/D0 BV, який видало товариство Bureau Veritas (Бюро Веритас).

Згідно з Правилами BV, товстолистовий прокат товщиною до 100 мм зі сталі марки ЕН36 може виготовлятися з нормалізацією або способом термомеханічної прокатки [163].

Для проведення дослідної прокатки використані сляби розмірами 220×1850×1590-1600 мм вагою 5,080-5,112 т, плавка 2104917, з хімічним складом, наведеними в табл. 6.42.

Хімічний склад дослідних слябів повністю відповідає вимогам «Правил на матеріали та зварювання для класифікації морських споруд» NR216, Глава 2, встановлених для термомеханічного способу виробництва прокату зі сталі марки ЕН36.

Для порівняння хімічних складів в табл. 6.42 наведений типовий хімічний склад, який використовується наразі для виробництва сталі марки ЕН36 з термічною обробкою – нормалізацією. Наведений хімічний склад має незначні відхилення від складу, який використано в дослідній прокатці, але перевищення встановленого

обмеження по вуглецевому еквіваленту унеможливилює його використання для термомеханічного способу прокатки.

При проектуванні технології використовувалися принципи низькотемпературної контрольованої прокатки, а саме формування необхідної структури і властивостей прокату при завершенні деформації у двофазній  $\gamma$  -  $\alpha$  області [249-253]. Затверджена на підприємстві технологія наведена в додатку Т.

Таблиця 6.42 – Параметри слябів для дослідної прокатки

Марка сталі	№ плавки	CE	Вміст хімічних елементів, %													
			C	Mn	Si	S	P	Nb	Cr	Ni <sup>b</sup>	Cu	V <sup>b</sup>	Ti <sup>b</sup>	Mo	Al	N
ЕН36	2104917	0,38	0,16	1,28	0,25	0,0040	0,019	0,033	0,03	0,03	0,03	0,003	0,012	0,005	0,04	4,9
ЕН36	типовий <sup>a</sup>	0,37-0,41	0,14-0,16	1,32-1,35	0,22-0,26	0,005-0,011	0,009-0,018	0,032-0,038	0,03-0,08	0,02-0,13	0,02-0,05	-	-	-	0,028-0,040	3,1-4,7
Правила BV NR216, Глава 2		≤0,38	≤0,18	0,90-1,60	≤0,50	≤0,035	≤0,035	0,02-0,05	≤0,20	≤0,40	≤0,35	0,05-0,10	≤0,02	≤0,08	≥0,015	-
		Сума Nb+V+Ti ≤0,12 %. Вуглецевий еквівалент CE розраховується по формулі: $CE = C + \frac{Mn}{6} + \frac{(Cr+Mo+V)}{5} + \frac{(Ni+Cu)}{15}$														

<sup>a</sup> типовий хімічний склад, який застосовується для поточного виробництва вказаного сортаменту з використанням термічної обробки – нормалізації

<sup>b</sup> вказані елементи використовуються окремо або в комбінації

В якості дослідного сортаменту прийнятий прокат розмірами 25×2150 мм зі сталі марки ЕН36, який наразі виробляється тільки з нормалізацією.

Розраховані наступні цільові термомеханічні показники процесу прокатки: ступінь деформації після розбивання ширини розкату в чорновій кліті – не менше ніж 15 %; температурний режим в чистовій кліті, температура початку деформації 750- 770 °С, температура закінчення деформації 740-720 °С [254, 255].

Цільова схема термомеханічного процесу прокатки товстих листів зі сталі марки ЕНЗ6 на стані 3600 виглядає наступним чином, рис. 6.26.



Рисунок 6.26 – Схема термомеханічного процесу прокатки товстих листів зі сталі марки ЕНЗ6 на стані 3600

На рис. 6.26, під противфлокєнною обробкою (ПФО) мається наувазі уповільнене охолодження прокату в штабелі [251, 252].

Проектування технології виконувалося на базі комплексної аналітичної моделі стану 3600 [256, 257].

Цільовою схемою прокатки в чорновій кліті є поперечно-поздовжня схема з наростанням деформації, що забезпечує, в середньому, постійну, на рівні 23МН, силу прокатки по пропусках. Реалізація процесу термомеханічної прокатки на стані 3600 здійснювалася відповідно до розроблених температурно-деформаційних режимів, табл. 6.43, 6.44.

Фактично, в процесі дослідження було використано дві схеми - поздовжньо-поперечно-поздовжня (розбивка з протягуванням) для партії № 7052 та цільова - поперечно-поздовжня схема для партії № 7053.

Порівняння результатів розрахунку з фактичними параметрами прокатки наведені в табл. 6.43, 6.44.

Таблиця 6.43 – Цільові та фактичні параметри виробництва листового прокату розмірами 25×2150 мм зі сталі марки ЕН36 в чорновій кліті стану 3600

№ проходу	Цільові параметри				Фактичні параметри									
	Товщина, мм	Ступінь деформації, %	Сила прокатки, МН×10 <sup>-2</sup>	Температура, °С	партія № 7052					партія № 7053				
					Товщина (стрілка), мм	Товщина (перерахована) <sup>а</sup> , мм	Ступінь деформації, %	Сила прокатки, МН×10 <sup>-2</sup>	Температура, °С	Товщина (стрілка), мм	Товщина (перерахована) <sup>а</sup> , мм	Ступінь деформації, %	Сила прокатки, МН×10 <sup>-2</sup>	Температура, °С
0	К 221,7				221,7						К 221,7			
1	190	14,3	2045,6	1150	200	202,2	9,6	2250	1128	180	182,7	21,3	2500	1125
2	154	18,9	2386,9	1146	180	182,3	10,9	2300		152	154,2	18,5	2250	
3	К 131	14,9	2299,5	1142	К 145	147,7	23,4	2500		К 115	119,3	29,3	3420	
4	110	16,0	2300,4	1136	123	127,4	15,9	3500		90	93,9	27,1	3200	
5	91	17,3	2302,9	1129	100	103,9	22,6	3200		72	75,2	24,9	2820	
6	75	17,6	2202,7	1121	К 72	76,1	36,5	3300						

К - кантування

<sup>а</sup> фактична товщина розкату, перерахована з урахуванням пружини кліті

Таблиця 6.44 – Цільові та фактичні параметри виробництва листового прокату розмірами 25×2150 мм зі сталі марки ЕН36 в чистовій кліті стану 3600

№ проходу	Цільові параметри				Фактичні параметри										
	Товщина, мм	Ступінь деформації, %	Сила прокатки, МН×10 <sup>-2</sup>	Температура, °С	партія № 7052					партія 7053					
					Товщина (стрілка), мм	Товщина (перерахована) <sup>а</sup> , мм	Ступінь деформації, %	Сила прокатки, МН×10 <sup>-2</sup>	Температура, °С	Товщина (стрілка), мм	Товщина (перерахована) <sup>а</sup> , мм	Ступінь деформації, %	Сила прокатки, МН×10 <sup>-2</sup>	Температура, °С	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	
0	75					76,1					75,2				
1	71	5,3	2427,1	760	66	66,8	12,2	3450	768	65	65,6	12,8	3370	767	
2	65	8,5	3419,2	756	56	58,2	12,9	4300		57	58,4	11,0	3820		
3	59,5	8,5	3322,9	754	48	50,3	13,6	4370		51	52,6	9,9	3950		

Продовж. табл. 6.44

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
4	54	9,2	3452,6	752	42	44,2	12,1	4320		45	46,6	11,4	3950	
5	49	9,3	3345,3	750	38	39,1	11,5	3670		40	41,5	10,9	3900	
6	44	10,2	3501,9	747	34	35,1	10,2	3650		36	37,3	10,1	3750	
7	39,5	10,2	3393,9	744	31	31,6	10,0	3370		32	33,3	10,7	3770	
8	35	11,4	3570,2	741	29	29	8,2	3020		29	30	9,9	3570	
9	31	11,4	3458,9	737	29	26,6	8,3	1550	738	27	27,3	9,0	3200	
10	27,5	11,3	3274,6	736						26,5	25,6	6,2	2470	721
11	25	9,1	2654,1	734										

<sup>a</sup> фактична товщина розкату, перерахована з урахуванням пружини кліті

Фактичні параметри прокатки, у тому числі ступінь деформації після розбивання в чорновій кліті, та температурний режим в чистовій кліті, були витримані.

Схема прокатки в чорновій кліті, яка була застосована при виробництві партії 7053, є більш раціональною, оскільки дозволяє при збільшенні ступеню деформації знизити кількість проходів, зменшити цикл прокатки в чорновій кліті при незначному збільшенні сили прокатки в 3 та 4 проході, та більш наближена до цільової.

Схема прокатки при виробництві партії 7052 за рахунок фази поздовжньої прокатки (проходи 1, 2) та, в наслідок цього, збільшення ступеню деформації по проходах 3, 5 та 6 призвела до підвищення сили прокатки, отже є більш енерговитратною.

Змінення ширини заготовки в чорновій кліті при реалізації різних комбінацій поперечної та поздовжньої схеми прокатки наведено на рис. 6.27.

Після прокатки та остаточного охолодження, від прокату було відібрано проби для здійснення комплексу механічних випробувань (основних та додаткових), відповідно до вимог Правил BV NR 216 Глава 2 та Правил BV NR 480 «Схвалення процесу виготовлення металопродукції». Результати випробувань наведені в табл. 6.45, 6.46. Для порівняння чинної технології з дослідною прокаткою, в табл. 6.45 наведені результати випробувань прокату виробленого з нормалізацією та за технологією ТМСР.

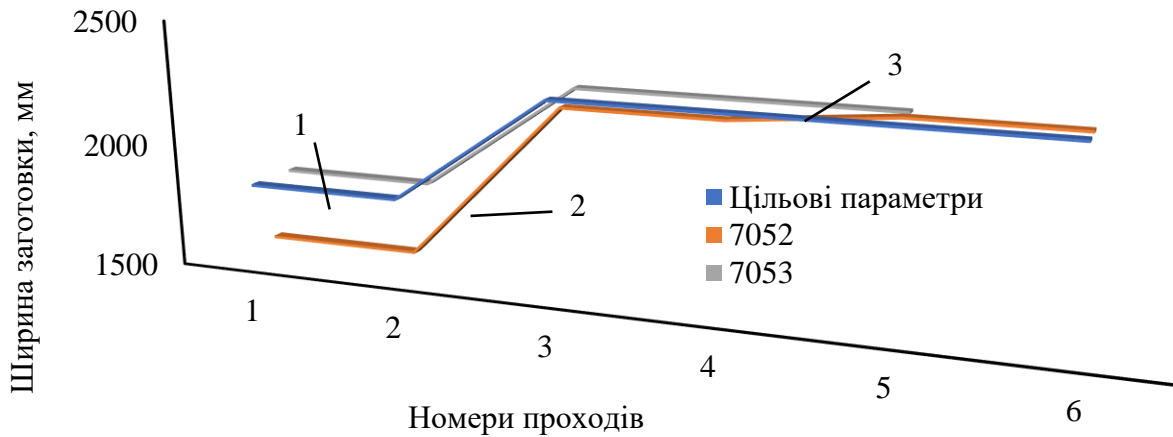


Рисунок 6.27 – Змінення ширини заготовки в чорновій кліті при реалізації цільової схеми прокатки (1), схеми при виробництві партії 7052 (2), схеми при виробництві партії 7053 (3)

Схеми прокатки в чорновій кліті, які були застосовані, наведені на рис. 6.28.

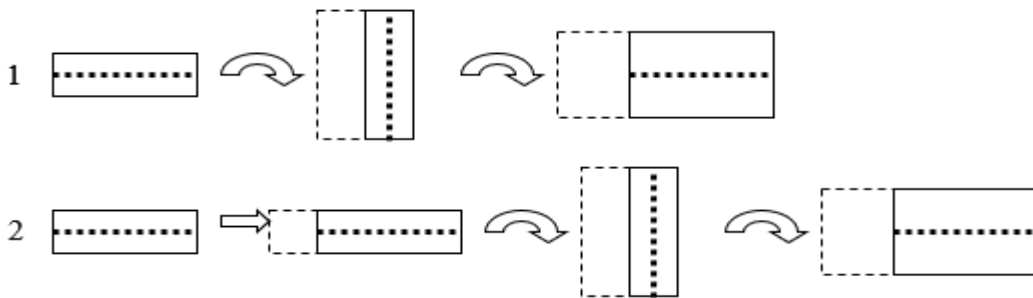


Рисунок 6.28 – Схема прокатки в чорновій кліті цільова та фактично застосована на партії № 7053 (1), фактично застосована на партії № 7052 (2)

Таблиця 6.45 – Результати основних випробувань прокату згідно з вимогами Правил BV NR 216 Глава 2 та Правил BV NR 480

Вид випробувань	Вимоги BV	Результати випробувань		Порівняльні дані зі станом після термічної обробки - нормалізації
		Партія 7052	Партія 7053	
1	2	3	4	5
Товщина прокату, мм		25	25	23-27
Границя плинності, $R_{eH}$ , МПа, не менше	355	437	450	367-426



Продовж. табл. 6.45

Тимчасовий опір, $R_m$ , МПа	490-630	550	560	496-540
Відносне видовження, $A_5$ , %, не менше	21	30	30	25-36
Середня робота удару, Дж				
KVL-40 (поздовжнє випробування)	34	144/166/155	142/125/149	194/204
KVT-40 (поперечне випробування)	24	99/105/107	116/107/117	

Таблиця 6.46 – Результати додаткових випробувань прокату згідно з вимогами Правил BV NR 216 Глава 2 та Правил BV NR 480

Вид випробувань	Результати випробувань	
	Партія 7052	Партія 7053
Випробування на розтягнення (зі зняттям напруження) при 600°C (2мін/мм) мін. 1 час.		
Границя плинності, $R_{eH}$ , МПа, не менше	435	459
Тимчасовий опір, $R_m$ , МПа	548	556
Відносне видовження, $A_5$ , %, не менше	30	31
Випробування на ударний вигін на не зістарених зразках, Дж		
KVL <sub>0</sub>	171/192/187	149/177/182
KVL-20	185/187/192	173/188/146
KVT-20	143/135/132	132/142/136
KVL-40	144/166/155	142/125/149
KVT-40	99/105/107	116/107/117
KVL-60	113/127/117	104/112/115
KVT-60	80/72/81	77/96/86
Випробування на ударний вигін на зразках деформаційна зістарених, Дж		
KVL-20	158/153	184/166
KVL-40	107/113	140/116
KVL-60	48/10	70/84
Волокно-60, %	40/0	90/100
Неметалеві включення середній / максимальний		
Силікати крихкі СХ, бал	2,1/2,5	0,8/1,5
Силікати недеформовані, СН, бал	2,0/2,5	1,5/2,0
Сірчані відбитки	В осевій зоні скупчення сірки у вигляді крапок та окремих коротких переривистих ліквіаційних стежок	
Дослідження мікроструктури	Ферит-перлітна, зі збільшенням долі перлітної складової в осевій зоні	
Визначення розміру зерна	9; 10	9; 10
Випробування на розтягнення у напрямку товщини, $Z$ , %	61/67	60/52

Таким чином, результати основних механічних випробувань прокату виробленого по режимам термомеханічної прокатки, повністю задовольняють

вимогам Правил BV. Додаткові випробування в цілому також показали позитивний результат. Виняток склали результати випробувань зразків партії 7052 на ударний вигін з деформаційним зістаренням і оцінка частки волокна в зламі при температурі «-60 °C», які показали більш низький рівень властивостей. Дані результати вимагають проведення додаткових випробувань та дослідження мікроструктури.

Невелике збільшення властивостей, отриманих при розтягувальних випробуваннях партії 7053, може бути пов'язано з використанням більш напруженого режиму прокатки у чорновій кліті. Прокатка, здійснена по режимах термомеханічної прокатки, забезпечила отримання більш дрібного зерна фериту 10; 9 бал в порівнянні з нормалізацією 8; 9 бал, для порівнянного сортаменту.

У порівнянні з результатами випробувань на розрив на порівнянному сортаменті, зробленому з нормалізацією, при термомеханічній прокатці отримано більш вищий рівень границі плинності та тимчасового опору, що дозволяє зробити висновок про можливість оптимізації технології та хімічного складу сталі.

Таким чином, підтверджена технічна можливість виробництва товстолистового прокату зі сталі марки EN36 для суднобудування способом термомеханічної прокатки, в умовах стану 3600 «МК «АЗОВСТАЛЬ»».

Вперше для умов стану 3600 «МК «АЗОВСТАЛЬ»» способом ТМСР вироблена дослідна партія прокату зі сталі марки EN36, згідно з вимогами Правил BV, проведено комплекс основних та додаткових випробувань, що підтверджує можливість подальшого засвоєння технології та сертифікації продукції.

Впровадження технології термомеханічної прокатки замість нормалізації дозволить знизити собівартість прокату за рахунок виключення витрат природного газу на термообробку.

Для підготовки сертифікації, згідно з Правилами BV, необхідно додатково провести низку досліджень прокату зі сталі марки EN36 різних товщин.

### **6.3 Обґрунтування можливості виробництва прокату за технологією термомеханічної прокатки на станах з існуючим рівнем устаткування**

Розроблені та впроваджені технологічні процеси із засвоєння термомеханічної прокатки, на підставі сучасного попиту, реалізовано на існуючому устаткуванні заводу Ferriera Valsider, Trameal, стані 1700 «ММК ІМЕНІ ІЛЛІЧА» та стані 3600 «МК «АЗОВСТАЛЬ» без проведення додаткових реконструкційних впроваджень.

Різний технічний рівень та комплектність устаткування перелічених виробництв підтверджує можливість розширення їх поточних можливостей із впровадження технології термомеханічної прокатки у всіх її різноманітних варіаціях (термомеханічна прокатка та термомеханічна прокатки з прискореним охолодженням).

Безумовно, використання найсучаснішого устаткування з відповідними технічними характеристиками це є інший рівень технології. Вітчизняні та деякі іноземні підприємства знаходяться тільки на етапі модернізації та намагаються наздогнати. Постійна внутрішня боротьба вітчизняних компаній (підприємств) між економічними показниками проектів та якістю, яка лежить на поверхні та гальмує рівень їх технологічності, не дає бачити процеси які знаходяться глибше, наприклад стабільність параметрів якості, виробництво найвищих категорій міцності, впровадження найновітніших продуктів та технологій на рівні з найкращими світовими виробниками. Для цього потрібно встановлювати відповідне устаткування, яке перевищує сучасні потреби виробництва. Інакше вітчизняні підприємства будуть постійно наздоганяти. Як приклад, встановлення на стані 3600 «МК «АЗОВСТАЛЬ» установки прискореного охолодження, яка на момент встановлення у 2012 р. була вже застаріла, швидкість охолодження не перевищує 45 °C/с, що обмежує як можливості по виробництву сортаменту так і знижує економічні показники поточного виробництва, тоді як сучасні швидкості для охолодження товстолистого прокату сягають 100 °C/с, або встановлення в 2018 р. на стані 1700 «ММК ІМЕНІ ІЛЛІЧА» пневматичної моталки з максимальною вагою змотування рулонів 27 т, та

застарілими показниками по якості змотування, серед яких телескопічність 30 мм, тоді як сучасні вимоги до ваги рулонів знаходяться в межах 32-36 т. Також, заміна на стані 1700 в 2019 р. чорнової групи на сучасну реверсивну кліть, встановлення CoilBox та часткова модернізація чистової групи, без заміни установки прискореного охолодження, що не тільки знижує ефективність виробництва, а взагалі ставить питання по можливостях виробництву проектного сортаменту модернізованого стану.

Таким чином, вперше розроблені та впроваджені на вітчизняних підприємствах технологічні процеси термомеханічної прокатки, безумовно, є найкращими досягнутими результатами, подальший розвиток яких має різні обмеження відповідно до можливостей поточного устаткування, що і встановлено шляхом промислових досліджень.

## **Висновки**

1. На підставі проведених досліджень впливу температурно-деформаційних умов прокатки на формування успадкованих механічних властивостей прокату, уточнення розрахунку теплових втрат, аналізу технічних параметрів устаткування товстолистових станів 3600, 3200, 3000, широкоштабового стану 1700 та стану Стеккеля визначено технічну можливість впровадження технології ТМСР товстолистого та рулонного прокату в поточних умовах.

2. На підставі уточнення розрахунку теплових втрат та з урахуванням результатів досліджень впливу температурно-деформаційних умов прокатки на формування успадкованих механічних властивостей прокату розроблено технологію термомеханічної прокатки з прискореним охолодженням на широкоштабовому стані 1700 «ММК ІМЕНІ ІЛЛІЧА» та засвоєно виробництво рулонного прокату конструкційного сортаменту зі сталей марок S355MC, S460MC, згідно з вимогами стандарту EN 10149-2, рулонного прокату для подальшого виробництва труб зі сталей категорій міцності B, X52M, згідно з вимогами стандарту API-5L. Визначено, що

додаткове додавання 0,014 % Nb при виробництві штаби товщиною 8 мм зі сталі категорії міцності X52M дозволяє підвищити границю плинності на 40 МПа, тимчасовий опір на 20 МПа, зменшує бал смугастість мікроструктури на поверхні та в центрі на 1-2 бали відповідно, що частково дозволяє компенсувати вплив недостатньої потужності установки прискореного охолодження на формування механічних властивостей.

4. Для товстолистового стану 3600 розроблено технологію термомеханічної прокатки з завершенням деформації у двофазній  $\gamma$  -  $\alpha$  області та виготовлено дослідну партію прокату для суднобудування зі сталі підвищеної міцності марки EN36, згідно з вимогами Правил BV, на підставі урахуванням результатів досліджень впливу температурно-деформаційних умов прокатки на формування успадкованих механічних властивостей прокату. Встановлено, що при порівняльному хімічному складі сталі, при термомеханічній прокатці отримано вищі механічні властивості, в том числі границя плинності +40 МПа, тимчасовий опір +37 МПа, ніж при термічній обробці нормалізацією.

5. На підставі уточнення розрахунку теплових втрат та з урахуванням результатів досліджень впливу температурно-деформаційних умов прокатки на формування успадкованих механічних властивостей прокату, шляхом аналітичного моделювання, для стану Стеккеля заводу Ferriera Valsider розроблено технологію виробництва рулонного прокату зі сталі категорії міцності X65 способом термомеханічної прокатки з прискореним охолодженням. Для розрахунку температурно-деформаційного режиму прокатки отримано закономірності для розрахунку часу, який витрачається на втрати тепла випромінюванням та конвекцією, для умов прокатки на стані Стеккеля, і залежність, яка дозволяє визначати змінення температури металу в пічній моталці та додатково враховує усереднену теплоємність вуглецевих та низьколегованих сталей, що нагріваються, радіус барабану моталки та барабану з металом, швидкість прокатки, які включено в аналітичну модель розрахунку технологічного процесу. При перевірці аналітичної моделі, похибка, отримана при розрахунку сили прокатки на стані Стеккеля склала від -4,89 % до

6,59 %, що підтверджує можливість її подальшого використання. При перевірці технічних можливостей наявного устаткування встановлено, що фактична потужності головних двигунів стану 3170 та 1780 є відповідно на 50 % та 20 % нижчою за необхідну для забезпечення максимальної сили прокатки, що враховано при розробці технології прокатки.

6. На підставі аналізу температурно-деформаційних та швидкісних параметрів прокатки, виконаних за допомогою аналітичної моделі для товстолистового стану 3200 заводу Trameal розроблено технологію виробництва прокату товщиною 4 мм зі слябу товщиною 220 мм, замість слябу 150 мм. При розробці технології досягнуто зменшення кількості проходів з 15 до 13 за рахунок зменшення часу пауз між проходами, що призвело до збереження температури та зниження сили прокатки. Розроблена технологія забезпечує отримання температури закінчення чистової прокатки не нижче 820 °С, що дозволяє надалі виробляти прокат по гарячекатаним, нормалізувальним та термомеханічним режимам.

## РОЗДІЛ 7

# РОЗВИТОК МЕТОДОЛОГІЙ КЕРУВАННЯ ЯКІСТЮ, ЗАСВОЄННЯ НОВОГО СОРТАМЕНТУ, ТЕХНОЛОГІЧНОЇ СТРАТЕГІЇ ТА ЇХ РЕАЛІЗАЦІЯ В УМОВАХ ТЕРМОМЕХАНІЧНОЇ ПРОКАТКИ

### 7.1. Оцінка сучасних та перспективних вимог до виробництва прокатної продукції, аналіз додаткових вимог

Як відомо, вимоги до виробництва прокатної продукції, в тому числі і той, що виробляється за режимами ТМСП, у всьому світі регламентовані різноманітними нормативними документами, такими як ДСТУ, EN, ISO, ASTM/ASME, API, CAN, IS, JIS, SAE, Правилами класифікаційних товариств (RINA, IRS, BV, ABS, LR, DNV GL, PCY) та іншими. На підставі цих документів формуються первинні вимоги до способу виробництва та якості продукції.

Але останнім часом, вимоги, що регламентовані нормативними документами є недостатніми для споживачів/Замовників. Для виробників прокатної продукції актуальним стає термін - «додаткові вимоги Замовників», далі додаткові вимоги. Цей термін неможна плутати з додатковими вимогами, що прописані в стандартах та є їх невід'ємною частиною, коли Замовник, відповідно до кінцевого призначення продукції вибирає додаткові параметри якості, що прописані в документі.

Додаткові вимоги, це більш жорсткі вимоги, в порівнянні з відповідним стандартом, що стосуються якості готової продукції.

Під якістю продукції слід розуміти вимоги до хімічного складу, механічних властивостей, мікроструктури та геометричних параметрів, які можуть застосовуватись всі разом або окремо в залежності від вимог.

Підставою для появи цих додаткових вимог є два фактори:

1. Конкурентна якість продукції, яка є на ринку на підставі якої Замовник формує для себе очікуваний рівень якості;

2. Високі технічні можливості конкурентних виробників, які дозволяють отримувати рівень якості, що перевищує вимоги нормативних документів.

Розглянемо на прикладах додаткові вимоги Замовників до деяких видів продукції прокатного виробництва.

Порівняння вимог Замовника з вимогами стандартів EN 10025-2 та EN 10051 на прикладі виробництва гарячекатаних рулонів з марки сталі S355JO, шириною 1320 мм, табл. 7.1–7.4.

Таблиця 7.1 – Порівняння додаткових вимог Замовника та вимог згідно зі стандартом EN10051 щодо граничних відхилень по товщині

Номінальна товщина, мм	Граничні відхилення по товщині при номінальній ширині, мм	
	Вимоги EN	Вимоги Замовника
$t \geq 2$	$\pm 0,22$	$\pm 0,055$
$2,00 < t \leq 2,50$	$\pm 0,24$	$\pm 0,060$
$2,50 < t \leq 3,00$	$\pm 0,25$	$\pm 0,063$
$3,00 < t \leq 4,00$	$\pm 0,28$	$\pm 0,070$
$4,00 < t \leq 5,00$	$\pm 0,30$	$\pm 0,075$
$5,00 < t \leq 6,00$	$\pm 0,32$	$\pm 0,080$
$6,00 < t \leq 8,00$	$\pm 0,35$	$\pm 0,088$
$8,00 < t \leq 10,00$	$\pm 0,38$	$\pm 0,095$
$10,00 < t \leq 12,50$	$\pm 0,41$	$\pm 0,103$
$12,50 < t \leq 15,00$	$\pm 0,44$	$\pm 0,110$
$15,00 < t \leq 25,00$	$\pm 0,48$	$\pm 0,120$

Додаткові вимоги становлять  $\frac{1}{4}$  від вимог стандарту EN 10051 щодо граничних відхилень по товщині (див. табл. 7.1).

Таблиця 7.2 – Порівняння додаткових вимог Замовника та вимог згідно зі стандартом EN10051 щодо граничних відхилень по ширині

Номінальна ширина, мм	Граничні відхилення по ширині для необрізаної крайки, мм	
	Вимоги EN	Вимоги Замовника
$1200 < w \leq 1850$	$-0/+20$	$-0/+12$

Додаткові вимоги Замовника є жорсткішими на 40 % від вимог стандарту EN 10051 щодо граничних відхилень по ширині (див. табл. 7.2).



Таблиця 7.3 – Порівняння додаткових вимог Замовника та вимог згідно зі стандартом EN10051 щодо граничних відхилень від площинності

Номинальна ширина, мм	Граничні відхилення від площинності, мм		
	Вимоги EN (для листів)	Вимоги EN (для рулонів)	Вимоги Замовника
1200 < w ≤ 1500	23	-	23

Застосування Замовниками, що споживають гарячекатані рулони, додаткових вимог до площинності, які, згідно зі стандартом, використовуються тільки при замовленні поставки в листах (див. табл. 7.3).

Таблиця 7.4 – Порівняння додаткових вимог Замовника та вимог згідно зі стандартом EN10025-2 щодо хімічного складу продукції

Марка сталі	Кількість деяких хімічних елементів зі складу сталі, % <sup>a</sup>			
	Вимоги EN		Вимоги Замовника	
	P	S	P	S
S355JO	≥0,040	≥0,040	≥0,018	≥0,010

<sup>a</sup> кількість інших хімічних елементів згідно з вимогами стандарту EN10025-2

Додаткові вимоги Замовника щодо вмісту шкідливих домішок у хімічному складі є жорсткішим до 4-х разів від вимог стандарту EN 10025-2 (див. табл. 7.4).

Слід зазначити, що в наведених вище таблицях вказані тільки ті показники та додаткові вимоги з якими виконувалось порівняння. Показники та вимоги, що не наведені відповідають вимогам вказаним у відповідному стандарті.

Також, окрім вимог, що вказані в стандартах, Замовники встановлюють додаткові вимоги щодо поставок комплексного сортаменту продукції, тобто без поставок одного сортаменту інший сортамент також не замовляється.

Додаткові вимоги Замовників до сортаменту гарячекатаних рулонів, що є часткою комплексного сортаменту наведені в табл. 7.5.

Вимоги, що вказані в табл. 7.5 не пов'язані між собою, так як залежать від багатьох інших технологічних факторів, наприклад вага залежить від ширини, що замовляється, товщина рулонів має обмеження від категорії міцності сталі по стандарту у відповідності з яким виробляється.

Таблиця 7.5 – Додаткові вимоги Замовників до сортаменту гарячекатаних рулонів

Параметр якості	Значення параметру	
	поточні вимоги	перспективні вимоги
Вага гарячекатаних рулонів, т	≥32	≥35
Мінімальна товщина, мм	1,2	0,8
Цільова марка сталі, що виробляється (категорія міцності)	S460MC*	S960MC <sup>a</sup>
Якість поверхні	зменшення кількості повітряної окалини	зменшення кількості повітряної окалини

<sup>a</sup> марка сталі вказана у відповідності з вимогами стандарту EN 10149-2

Порівняння додаткових вимог Замовника з вимогами стандарту API-5L на прикладі виробництва гарячекатаного товстолистового прокату для подальшого виробництва електрозварних труб зі сталі категорії міцності X70, товщиною 18,7 мм, шириною 2390 мм, довжиною 12000 мм наведено в табл. 7.6–7.8.

Таблиця 7.6 – Додаткові вимоги Замовників щодо розмірів та мікроструктури продукції

Параметр якості	Значення параметру	
	вимоги API-5L	вимоги Замовників по поточних проектах
Допуски по товщині стінки труби, мм	±1,5	-0,6/+1,3
Допуски по довжині труб, мм	4270-13720 (мінімальна середня 10670)	12000-12025
Мікроструктура	дрібнозерниста	голчастий ферит; ферито-перлітна або ферито-бейнітна з зерном не більш ніж 9 бал

Замовники суттєво обмежують мінусові допуски по товщині та довжині товстолистової продукції, а також жорстко регламентують вимоги до мікроструктури прокату (див. табл. 7.6).

Таблиця 7.7 – Додаткові вимоги Замовників щодо хімічного складу продукції

Хімічний елемент	Вміст хімічного елементу, %	
	вимоги API-5L (рівень PSL-2)	вимоги Замовників по поточних проектах
C	≥0,12	≥0,09
Si	≥0,45	≥0,35
Mn	≥1,70	≥1,65
P	≥0,025	≥0,020
S	≥0,015	≥0,005
V	сума елементів ≥0,15	≥0,080
Nb		≥0,110
Ti		≥0,025
Cu	≥0,50	≥0,35
Ni	≥0,50	≥0,30
Cr	≥0,50	≥0,30
Mo	≥0,50	-
B	≥0,001	≥0,0005
CEIIW	≥0,43	≥0,42
CEPcm	≥0,25	≥0,23

Замовниками обмежений хімічний склад, особливо вміст шкідливих домішок (див. табл. 7.7).

Таблиця 7.8 – Додаткові вимоги Замовників щодо механічних властивостей

Параметр якості	Значення параметру <sup>a</sup>	
	вимоги API-5L (рівень PSL-2)	вимоги Замовників по поточних проектах
Границя плинності, $\sigma_t$ , МПа	485-635	≥490
Тимчасовий опір, $\sigma_b$ , МПа	570-760	565-685
Коефіцієнт $\sigma_t/\sigma_b$	≥0,93	≥0,90
Поглинена енергія, $Kv_0$ , Дж	≥27	≥150 (температура випробувань «-20 °C»)
Випробування падаючим вантажем при температурі 0 °C, %	≥85	≥85

<sup>a</sup> При порівнянні не враховано ефект Баушингера, який закладено у вимоги Замовника.

Звуження границь механічних властивостей та значне підвищення вимог по окремих показниках, що вимагають Замовники (див. табл. 7.8).

Також до товстолистового прокату поширено застосовуються вимоги по площинності та можливості виробництва підвищених категорій міцності, табл. 7.9.

Таблиця 7.9 – Додаткові вимоги Замовників до сортаменту товстолистового прокату

Параметр якості	Значення параметру	
	поточні вимоги	перспективні вимоги
Площинність, мм/м довжини, мм	$\geq 10$	$\geq 3$
Допуск по товщині	$\frac{1}{2}$ від вимог стандартів	$\frac{1}{4}$ від вимог стандартів
Мінімальна товщина, мм	6	4
Цільова марка сталі, що виробляється (категорія міцності)	X70M <sup>a</sup>	X120M*

<sup>a</sup> марка сталі вказана у відповідності з вимогами стандарту API-5L

Вимоги, що вказані в табл. 7.9 не пов'язані між собою, так як залежать від багатьох інших технологічних факторів, наприклад вимоги до площинності розповсюджуються на товстолистовий прокат, що застосовується для подальшого виготовлення плоских виробів/деталей, вимоги до зменшення допусків по товщині здебільшого стосуються сортаменту конструкційного прокату з метою зменшення ваги конструкцій та підвищення їх точності, зменшення мінімальної товщини прокату, що виробляється на товстолистових станах до 4 мм є бажанням Замовників отримувати прокат шириною більшою ніж можна зробити на більшості станів безперервної прокатки.

Слід зазначити, що вказані вимоги є актуальними на теперішній час, але високі темпи розвитку техніки, технології, вдосконалення виробничого устаткування та конкурентна боротьба за Замовників вже у найближчий час можуть підвищити вимоги до гарячекатаних рулонів та товстолистового прокату (див. табл. 7.5, 7.9), тим паче, що приклади виробництва такої продукції в світі вже є [51].

Таким чином ми бачимо, що в залежності від кінцевого призначення продукції, вимоги Замовників стосуються різних параметрів якості. Але всі ці параметри можна об'єднати в групи з метою отримання комплексу напрямків по яких формуються підвищені вимоги, рис. 7.1.

Загальне змінення вимог до виробництва прокатної продукції вітчизняними виробниками має декілька етапів, які пов'язані з переходом від виробництва по ГОСТ до засвоєння продукції по зарубіжним стандартам та подальшим збільшенням частки

реалізації продукції на експорт. За 2018 рік частка прокатної продукції, що була експортована сягає 43,9 % (по даним ДП «ДЕРЖЗОВНІШІНФОРМ» та УКРІНФОРМ). Також слід враховувати поступову гармонізацію вітчизняних стандартів зі стандартами Євросоюзу відповідно до закону України «Про технічні регламенти та оцінку відповідності» від 15.01.2015р.

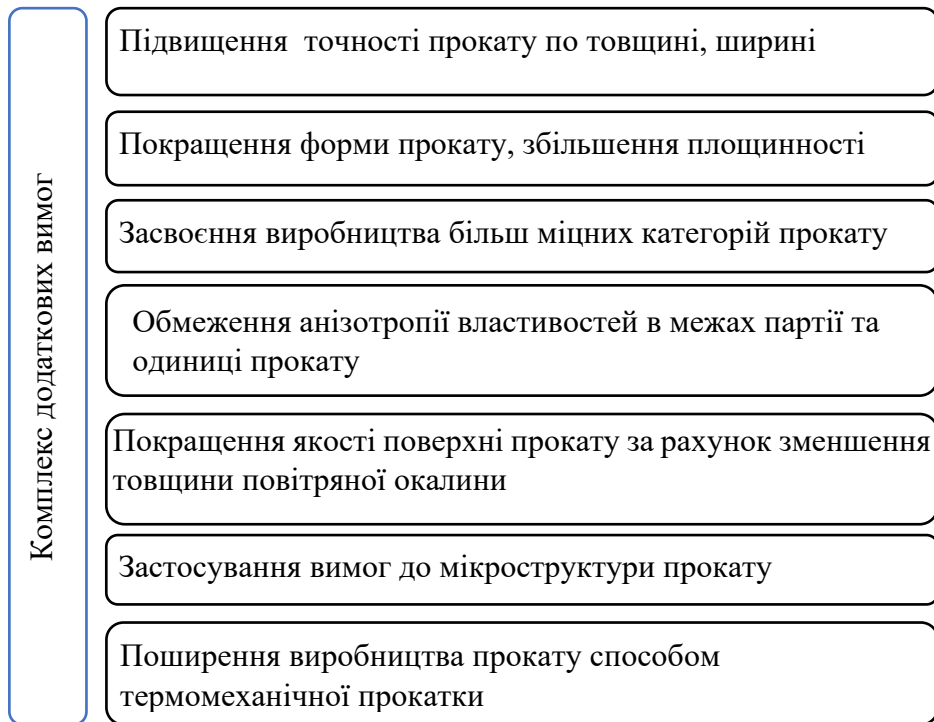


Рисунок 7.1 – Комплекс додаткових вимог Замовників щодо гарячекатаного рулонного та товстолистового прокату

Таким чином йде поступове вирівнювання вимог до продукції та пропозиції щодо сортаменту, який може бути вироблений на вітчизняних підприємствах.

Аналіз змінення вимог до гарячекатаної рулонної та товстолистової продукції по вказаних етапах зроблено на прикладі виробництва найпоширенішого сортаменту та аналогів марок сталі, табл. 7.10-7.11.

Таким чином, при майже однаковому рівні вимог ГОСТ та EN для аналогічного товстолистового прокату, що є базовим для виробництва, поточні додаткові вимоги Замовників до сортаменту, вмісту шкідливих домішок та вимоги до суцільності суттєво відрізняються. Ця тенденція свідчить про подальше посилення вимог

Таблиця 7.10 – Змінення вимог до товстолистого гарячекатаного прокату

Параметр якості	Значення параметру		
	Вимоги ГОСТ	Вимоги EN	Поточні вимоги Замовників
1	2	3	4
Гарячекатаний товстолистий прокат з базової марки сталі Ст3сп, розмірами 16×2560×12000 мм, крайка обрізана			
Базовий нормативний документ	ГОСТ 14637 ГОСТ 19903 ГОСТ 380	EN 10025-2 EN 10029	EN 10025-2 EN 10029
Базова марка сталі - аналога	Ст3сп	S235JO	S235JO
Вимоги до сортаменту			
Допуски по товщині, мм	+1,0/-0,8	+1,0/-0,6 <sup>a</sup>	½ від вимог
Допуски по ширині, мм	+15	+20	+20
Допуски по довжині, мм	+35	+75	+75
Серповидність, мм	≤10 мм/3 м	-	-
Площинність, мм	покращена 10 мм/1 м	7 мм/1 м <sup>b</sup>	3 мм/1 м <sup>c</sup>
Хімічний склад, %			
C	0,14-0,22	≤0,17	≤0,17
Mn	0,40-0,65	≤1,40	≤1,40
Si	0,15-0,30	-	-
S	0,050	≤0,030	≤0,010
P	0,040	≤0,030	≤0,018
Cr	≤0,30	-	-
Ni	≤0,30	-	-
Cu	≤0,30	≤0,55	≤0,55
N	≤0,010	≤0,012	≤0,012
As	≤0,080	-	-
Вуглецевий еквівалент, CEV, %	-	0,35	0,35
Механічні властивості			
Тимчасовий опір, МПа	370-480	360-510	360-510
Границя плинності, МПа	≥245	≥235	≥235
Відносне видовження, %	≥26	≥24	≥24
Ударна в'язкість, КСУ, Дж/см <sup>2</sup>			
температура випробувань +20 °С	≥69		
температура випробувань -20 °С	≥29		
після механічного старіння	≥29		
Ударна в'язкість, КСV, Дж/см <sup>2</sup>			
температура випробувань +20 °С	≥34		

Продовж. табл. 7.10

1	2	3	4
Робота удару, KV, Дж			
температура випробувань 0 °C		≥27	≥27
Норми суцільності	3кл по ГОСТ 22727	S0; E0 по EN 10160	S1; E1 по EN 10160

<sup>a</sup> вимоги до Класу А; <sup>b</sup> нормальні відхилення від площинності<sup>c</sup> спеціальні відхилення від площинності

Таблиця 7.11 – Зміння вимог до гарячекатаного рулонного прокату

Параметр якості	Значення параметру		
	Вимоги ГОСТ	Вимоги ASTM	Поточні вимоги Замовників
Гарячекатаний товстолистовий прокат з базової марки сталі Ст3сп, розмірами 2,5x1250 мм, крайка не обрізана			
Базовий нормативний документ	ГОСТ 16523 ГОСТ 19903 ГОСТ 1050	ASTM A1011/A1011M ASTM A568/A568M	ASTM A1011/A1011M ASTM A568/A568M
Базова марка сталі - аналог	08пс (К270В)	CS Type B	CS Type B
Вимоги до сортаменту			
Допуски по товщині, мм	±0,20 <sup>a</sup>	-0/+0,26	½ від вимог
Допуски по ширині, мм	+30	+32	+32
Серповидність, мм	-	≤25 мм/ 6000 мм	≤25 мм/ 6000 мм
Телескопічність, мм	100	-	20
Площинність, мм	-	-	45 мм <sup>b</sup>
Хімічний склад, %			
C	0,05-0,11	0,02-0,15	0,02-0,15
Mn	0,35-0,65	≤0,60	≤0,60
Si	0,05-0,17	-	-
S	0,035	≤0,035	≤0,010
P	0,030	≤0,030	≤0,018
Cr	≤0,10	≤0,15	≤0,15
Ni	≤0,30	≤0,20	≤0,20
Cu	≤0,30	≤0,20	≤0,20
Mo	-	≤0,06	≤0,06
V	-	≤0,008	≤0,008
Sb	-	≤0,008	≤0,008
Ti	-	≤0,025	≤0,025
As	≤0,080	-	-
Механічні властивості			
Тимчасовий опір, МПа	270-410	-	-
Границя плинності, МПа	-	205-340	205-340
Відносне видовження, %	≥26	≥25	≥25

<sup>a</sup> нормальна точність; <sup>b</sup> нормальні відхилення від площинності

до виробництва не тільки базового, а і всього сортаменту товстолистового прокату.

Таким чином, при схожих вимогах ГОСТ та ASTM, для аналогічного рулонного прокату, що є базовим для виробництва, поточні вимоги Замовників до сортаменту та вмісту шкідливих домішок суттєво відрізняються. Особливо слід зазначити вимоги Замовників щодо площинності та телескопічності прокату в рулонах, які не регламентуються нормативами ASTM, а площинність застосовується тільки для поставки продукції в листах. Ця тенденція свідчить про подальше посилення вимог Замовників до виробництва всього сортаменту рулонного прокату.

Окремо, слід зазначити, що такий стан справ з вимогами Замовників є цілеспрямованим на продукцію Українських виробників. Це пов'язано з поточною якістю продукції та станом існуючого устаткування. Введення додаткових вимог дозволяє Замовнику наближувати якість продукції, яка поставляється з України, до рівня якості продукції відповідних світових виробників.

Таким чином, застосування додаткових вимог Замовниками до продукції, що поставляється з України, дозволяє вітчизняним виробниками оцінити поточний рівень якості продукції, встановити цільовий рівень якості, а також розробити технологічну стратегію розвитку та модернізації своїх підприємств.

## **7.2 Розвиток системних підходів до превентивного керування якістю термомеханічного прокату. Методологія керування якістю.**

Якість продукції — це сукупність властивостей продукції, які обумовлюють її придатність задовольнити певні потреби відповідно до призначення.

Для повноцінного функціонування та досягнення розвитку підприємства/компанії, система якості, відповідно до вимог стандартів ISO 9000 [258] та ISO 9001 [259], повинна бути впроваджена на всіх процесних ділянках, починаючи від постачання сировини, в тому числі включаючи роботу з постачальниками, обслуговування устаткування і закінчуючи процесами роботи з Замовниками - споживачами продукції.



Історично склалося, що система якості на вітчизняних підприємствах працює тільки у сфері технології. Задіяння системи якості в інших сферах, що контактують з технологією є формальним. Слід зазначити, що система якості на підприємстві це не тільки підтвердуючі документи по всіх процесах, це комплексна система, яка повинна працювати на досягнення загальної мети підприємства.

Поєднання системи якості ISO 9001 з інструментами системи ошадливого виробництва Lean (Lean — проривний підхід до менеджменту і керування якістю, який забезпечує довготривалу конкурентоздатність без істотних капіталовкладень. Lean або Ошадливе виробництво — це система організації і управління розробленням продукції, виробництвом, взаємовідношеннями з постачальниками і споживачами, коли продукція виготовляється у точній відповідності із запитам споживачів і з меншими втратами) дозволить отримати найкращий сукупний результат [260, 261].

Мета також повинна бути формалізованої згідно з принципами SMART (Specific, Measurable, Attainable, Relevant, Time-bound – конкретна, вимірювана, досяжна, доцільна, обмежена в часі).

Для моніторингу стану та безперервного поліпшування системи якості, серед інших можуть бути використані такі інструменти аналізу, які поширено використовуються в Lean системі та в методах статистичної обробки:

- бенчмаркінг – система порівняння показників, результатів, параметрів якості тощо з аналогічними виробництвами, виробниками з метою пошуку найкращого досвіду;

- діаграма Ішикави (риб'яча кістка) – графічний спосіб дослідження та визначення найбільш суттєвих причинно-наслідкових взаємозв'язків між чинниками (факторами) та наслідками у досліджуваній ситуації чи проблемі;

- Принцип Парето - емпіричне правило, яке стверджує, що для багатьох явищ 80 відсотків наслідків спричинені 20 відсотками причин.

Одним з формалізованих процесних підходів в стандарті ISO 9001 редакції 2015 року є ризик-орієнтоване мислення, яке дає змогу організації визначати чинники, які можуть спричинити відхилення її процесів та системи управління якістю

від запланованих результатів, щоб установлювати запобіжні заходи контролю для унайменшення негативних впливів і якнайбільшого використання можливостей, у міру їх виникнення.

Згідно зі стандартом Системи, необхідно розробляти дії стосовно ризиків для запобігання небажаним ефектам. Безумовно, базою для обробки та створення критеріїв контролю є інформація по вже виробленій продукції та результатах контролю її якості, як безпосередньо на підприємстві, так і в умовах використання у Замовників. Організація повинна планувати у який спосіб інтегрувати та запровадити дії до процесів її системи управління якістю, та оцінювати їх результативність. Тобто повинен працювати цикл Демінга, або цикл PDCA — плануй (Plan), роби (Do), перевіряй (Check), впливай (Act), який працює і у всій загальній системі якості. Таким чином, дискретні процеси системи повинні працювати таким самим чином, що і загальна система.

Потрібно, щоб дії, які виконуються стосовно ризиків і можливостей, були пропорційні їх потенційному впливу на відповідність продукції [259]. Треба розуміти, що дією не може бути розірвання подальшої взаємодії з клієнтом якому поставлена продукція невідповідної якості, так як ця дія не змінить якості самої продукції.

Кожне підприємство будує свою систему якості, яка враховує особливості його устрою та виробництва [262-265]. На сучасних підприємствах поширено застосовуються різноманітні системи превентивного керування якістю, та методи контролю [266], які спрямовані на попередження появи продукції невідповідної якості. Умовами здійснення термомеханічного процесу прокатки, серед інших, є підвищений контроль технологічних параметрів. Для превентивного керування показниками якості термомеханічного прокату, які є більш чутливими до стабільності технологічного процесу запропоновано впровадження підходу ризик-орієнтовного мислення в технологічному процесі виробництва – методологію керування якістю.

Для здійснення контролю процесу виробництва та забезпечення якості прокатної продукції необхідно встановлення та керування відповідними технологічними показниками.

## Встановлення показників

Технологічні показники, що впливають на параметри якості (також можуть встановлюватись і інші показники, при необхідності), які необхідно контролювати, можна встановити наступними способами:

- Встановлення вже відомих показників які вказані в технологічних інструкціях, документації тощо;
- Встановлення показників за допомогою діаграми Ішикави, рис 7.2.

Встановлення показників може бути загальною для комплексу параметрів якості, або для окремих параметрів/груп параметрів якості. Також для первинного встановлення показників може бути використано результати бенчмаркінгу по аналогічних виробництвах, якщо такі дані є відкритими.

Перелік показників може бути нескінченно великим. Тому у деяких випадках можливо та необхідно контролювати тільки показники, які є дійсно значущими. Визначення переліку значущих показників, які впливають на якість продукції, можливо за допомогою методу Парето, рис. 7.3. Безумовно, для встановлення значущості необхідно мати масив з факторів.

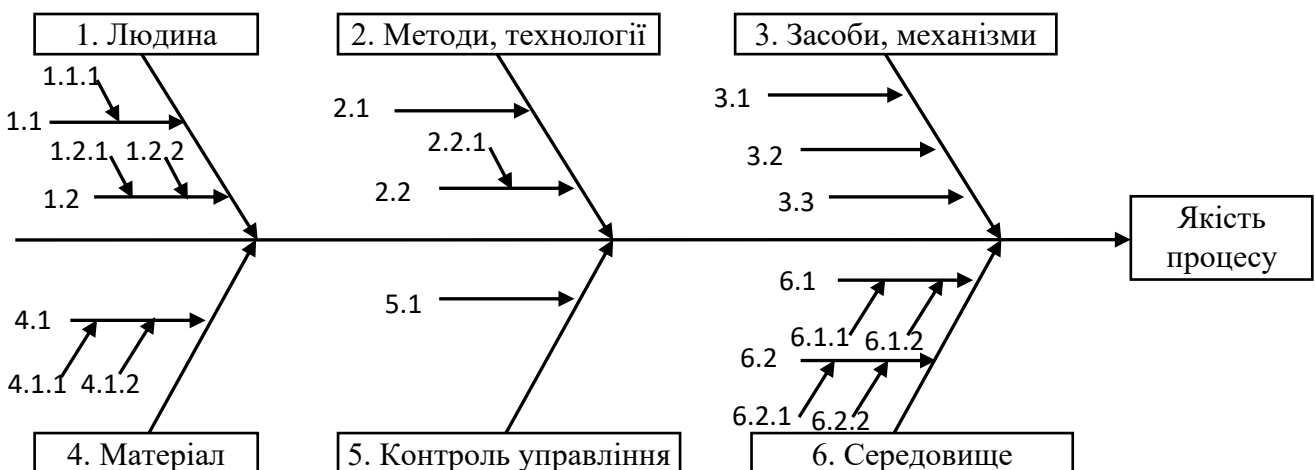


Рисунок 7.2 – Діаграма Ішикави в загальному вигляді

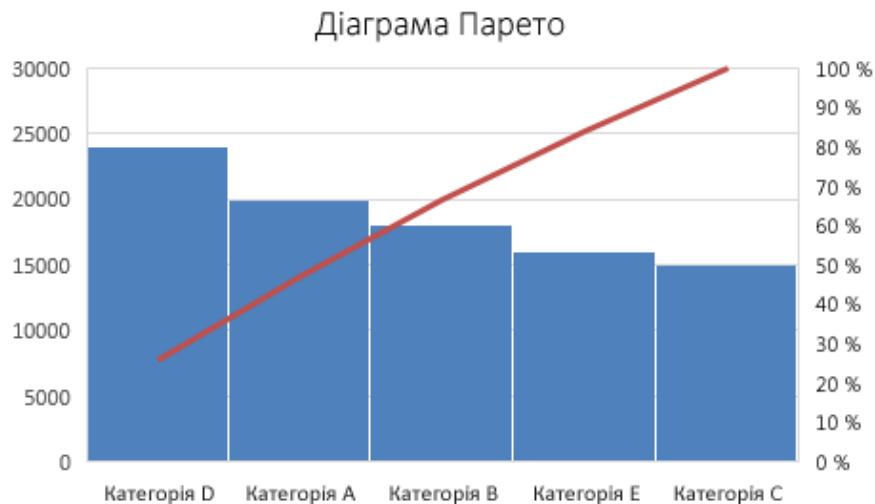


Рисунок 7.3 – Діаграма Парето в загальному вигляді

#### Визначення значень показників

Значення технологічних показників можуть встановлюватись безпосередньо на підставі аналізу виробництва аналогічної продукції, на підставі статистичної обробки наявної інформації, наукових досліджень, по літературних джерелах та іншими технологічними або статистичними способами.

#### Накопичення статистичної інформації

При виробництві прокатної продукції необхідно контролювати значення всіх встановлених показників, зберігати інформацію, яка надалі буде базою для обробки та вдосконалення якості продукції.

Встановлені технологічні або інші показники повинні бути об'єднані з параметрами якості продукції за допомогою системи простежування. Система простежування є обов'язковою вимогою для сучасного виробництва без якої неможливе відстежування та покращення якості.

#### Обробка накопиченої інформації

Обробка здійснюється як багатofакторний аналіз. Кожен з параметрів якості повинен аналізуватися окремо, або в групі з параметрами аналогічного рівня. Наприклад, в групу можуть бути об'єднані всі або окремі параметри механічних властивостей, деякі параметри геометрії прокату та інші.

Першим кроком аналізу є побудова діаграм розподілу по кожному з параметрів якості з встановленням обмеження згідно з Правилами 3 $\sigma$  або 6 $\sigma$ , в залежності від процесу, рис.7.4.

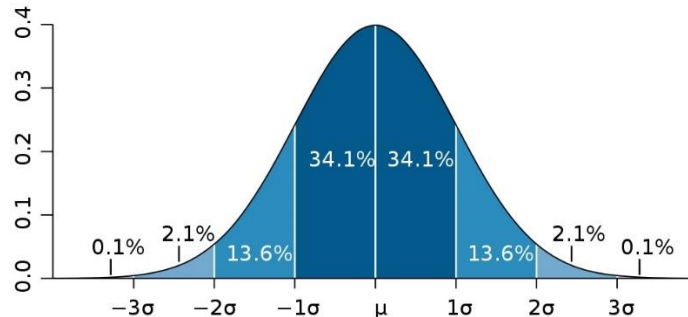


Рисунок 7.4 – Діаграма нормального розподілу в загальному вигляді

Слід враховувати, що встановлені обмеження повинні відповідати або бути більш жорсткими ніж обумовлені відповідними стандартами на виробництво продукції, або іншими нормативними документами.

Тобто, якщо, наприклад, згідно з розподілом, границя плинності прокату становить 235 МПа зі стандартним відхиленням  $\pm 10$  МПа, а обмеження згідно з нормативним документом становить 210-255 МПа, то згідно з Правилами 3 $\sigma$  розподіл границі плинності становить 205-265 МПа. В даному випадку встановлене обмеження не повинно перевищувати меж згідно з нормативним документом 210-255 МПа.

Якщо процес недостатньо стабільний, обмеження можуть бути встановлені на рівні вимог нормативних документів. Поступове звуження обмежень надалі буде забезпечувати підвищення стабільності процесу виробництва.

Для подальшої обробки масиву використовується тільки ті дані параметру якості, які відповідають встановленому обмеженню.

Далі, для кожного з технологічних показників які впливають на параметр якості, що безпосередньо розглядається, необхідно побудувати діаграми розподілу та встановити обмеження, які забезпечують отримання бажаного результату з якості.

Слід уникати окремого встановлення меж для взаємозалежних технологічних параметрів, а також встановлення різних меж для одного і того ж параметру, який впливає на різні показники якості.

Для встановлення обмежень, у тому числі для параметрів, що мають взаємозалежність, рекомендовано використовувати комплексні статистичні моделі, які побудовані на підставі отриманих масивів даних. Такі моделі зручно побудувати в програмних додатках типу Statistica, або в пакеті аналізу Microsoft Excel.

Останнім часом поширено використовуються кольорові маркери, які допомагають візуально оцінити стан процесу. При встановленні меж технологічних показників/параметрів, кольорові маркери можна застосувати наступним чином, рис. 7.5:

- червоний маркер встановлюють, коли технологічний показник/параметр відхиляється від меж, які забезпечують отримання параметру якості у відповідності зі стандартом;
- жовтий маркер встановлюють, коли технологічний показник/параметр відхиляється від меж, які забезпечують підвищені вимоги, встановлені в межах керування системою якості, при цьому параметр ще знаходиться у межах відповідності стандарту;
- зелений маркер встановлюють, коли технологічний параметр відповідає межам встановлених (підвищених) вимог.

Параметр якості / технологічний показник	Рівні процесу				
	порушення процесу	потребує уваги	стабільний	потребує уваги	порушення процесу
Границя плинності, МПа	<210	210-214	215-250	251-255	>250
Температура закінчення прокатки, °С	<800	800-809	810-830	831-840	>840

Рисунок 7.5 – Приклад використання кольорових маркерів для оцінки стану процесу

В залежності від поточного стану системи якості та технології, а також на початкових стадіях формування технології, можуть встановлюватись тільки червоний та зелений маркери.

Слід зазначити, що такий підхід допомагає не тільки стабілізувати технологічний процес та підвищити якість продукції, а ще дає можливість знизити

витрати на виробництво, в межах поєднання систем ISO та Lean, через застосування обмежень отримання надвисоких рівнів параметрів якості. Наприклад стабільне утримання механічних властивостей прокату на середньому рівні вимог дозволяє економити мікролегуючі елементи.

#### Відстежування результату, карти Шухарта

Відстежування результату та контроль за дотриманням встановлених обмежень по технологічних параметрах необхідно здійснювати за допомогою будь яких зручних способів, існуючих на підприємстві.

Це може бути безпосередній контроль співробітником відділу контролю якості на місці фіксації параметру, за допомогою системи візуалізації (контролю) технологічних параметрів, або за допомогою автоматичної системи контролю технологічного процесу.

Одним з найвідоміших способів аналізу результатів відстежування стабільності процесу є контрольні карти Шухарта [266], які являють собою графік зміни параметрів вибірки, зазвичай середнього значення і стандартного відхилення, який розраховується в процесі накопичування даних, рис. 7.6.

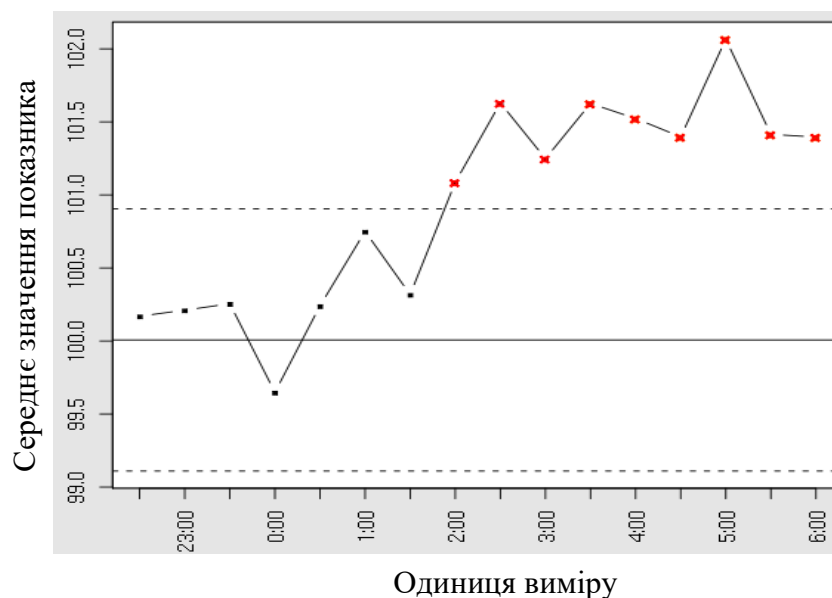


Рисунок 7.6 – Контрольна карта Шухарта в загальному вигляді

При перевищенні допустимого рівня відхилення, або при попаданні показника в жовте чи червоне поле, технологічним персоналом виконуються дії по забезпеченню входження показника в необхідні межі/зелене поле. Одиницю продукції, партію або інше, що вироблено за межами зеленого поля повинно бути відстежено окремо.

Прийняття рішення по продукції, що вироблена з відхиленнями

Отримання інформації по відхиленням дозволяє керувати подальшою долею такої продукції відповідно до вимог п. 8.6 та 8.7 ISO 9001 [259].

Продукція, що виробляється партією, при виробництві кожної одиниці якої, всі показники знаходяться в межах зеленого маркеру вважається відповідною.

Продукція, що виробляється партією, при виробництві якої, по окремих одиницях продукції є показники, які знаходяться в межах жовтого маркеру призначається на додатковий контроль якості. Додатковому контролю/випробуванням піддаються одиниці продукції з показниками в межах жовтого маркеру. Продукція з жовтими маркерами вважається відповідною тільки після підтвердження по результатах додаткового контролю. Цей метод може застосовуватись аж до поштучного контролю продукції, якщо це не заперечує Замовник.

Продукція, що виробляється партією, при виробництві якої, по окремих одиницях є показники, які знаходяться в межах червоного маркеру, якщо це не узгоджено з Замовником, вважається невідповідною та переводиться в нижчу якість або брак.

Партія прокату може містити набір одиниць продукції з комбінацією будь яких маркерів, якщо це узгоджено із Замовником, або відокремлюватися в різні партії відповідно до маркерів.

При виробництві нової продукції, базовими межами технологічних параметрів можуть бути параметри аналогів цієї продукції, якщо така є. Загалом, запропонована методика застосовується для продукції, яка пройшла стадію засвоєння та виробляється в промислових об'ємах.



Запропонований принцип може бути застосовано для компаній-партнерів, які займаються наданням продукції підприємства-виробника додаткової доданої вартості (наприклад додаткова обробка поверхні прокату), у разі якщо кінцевий продукт реалізує підприємство-виробник або афілійовані з ним компанії, для обробки інформації про якість продукції по даних наданих Замовниками.

Таким чином, методологія керування якістю, яка передбачає встановлення, визначення значень технологічних показників, які впливають на якість продукції, їх контроль, накопичення, обробка та механізми покращення, як окремий елемент Системи якості, підпорядкована циклу PDCA, та є підтвердженням невід'ємності Системи якості загалом та окремих її елементів. Відображення запропонованої методології у формі циклу PDCA наведена в додатку У.1.

Період оновлення циклу PDCA може відрізнятися для різних продуктів. Встановлення періоду оновлення даних може бути стаціонарним або динамічним.

Стаціонарним або періодом за планом є встановлення періодичності оновлення для конкретного виду продукції в залежності від об'єму виробництва, наприклад кожні 50 тис.т, або в залежності від часу виробництва, наприклад кожного місяці або кожного кварталу.

Динамічний або оперативний період оновлення застосовується для конкретного виду продукції або сортаменту та може бути розділений по наступних принципах:

- оновлення циклу при перевищенні встановленої межі по невідповідній продукції, наприклад 3 %;
- оновлення циклу при перевищенні встановленої межі по кількості показників, що попали в межу жовтого та/або червоного маркерів;
- оновлення циклу при перевищенні встановленої межі по кількості продукції, що потребує додаткового контролю, наприклад більш ніж 10 %.

Виконання циклу тісно пов'язане з технологією, так як для покращення якості безперервно виконується моніторинг і аналіз показників та корегується технологія. Технологічна інформація, що використовується та результати її обробки є частиною загальної «Бази знань» підприємства.

Розглянемо застосування розробленої методології для встановлення поточного рівня якості та напрямків для покращення таких показників якості як границя плинності  $\sigma_T$ , тимчасовий опір  $\sigma_B$  та відносне видовження  $\delta$ , при виробництві товстолистового прокату зі сталі марки К60, товщиною 14 мм, що вироблявся по режимах термомеханічної прокатки з прискореним охолодженням на стані 3600 «МК «АЗОВСТАЛЬ» в період червень-квітень 2017 року.

Перелік показників, які впливають на рівень параметрів якості - границя плинності, тимчасовий опір та відносне видовження візьмемо з технологічної документації комбінату. Серед показників - хімічний склад сталі з такими елементами, які впливають на механічні характеристики (С, Мп, Nb, V, Мо, Cr, Ni, Cu), технологічні параметри: температура початку прокатки в чорновій кліті (ТППч), температура початку другої стадії прокатки в чорновій кліті, яка обумовлена початком гальмування рекристалізації (ТГР), температура початку та закінчення прокатки в чистовій кліті (ТПП, ТЗП), температура металу на початку та на закінченні прискореного охолодження в установці УКО (ТПО, ТЗО).

Для визначення показників, які впливають на параметри якості, що досліджуються, з усього вказаного переліку показників, побудуємо діаграми Парето по кожному з параметрів, рис. 7.7-7.9.

Підставою для побудови діаграм Парето є величина вірогідності апроксимації  $R^2$  та величина коефіцієнту кореляції Пірсона (по модулю), які отримані при визначенні залежності між кожним показником та параметром якості, наведені в додатку У.2.

Для масиву, що використовувався в розрахунках, критичне значення кореляції Пірсона становить 0,17, для рівня значимості 0,05. Показники, коефіцієнт кореляції Пірсона яких до відповідного параметру якості є меншим за 0,17, не є значимими.

Таким чином, показники, які по результатах статистичної обробки даних є значимі наведені в табл. 7.12.

Надалі, дії щодо процесів покращення якості будуть розроблятися тільки для значимих показників.

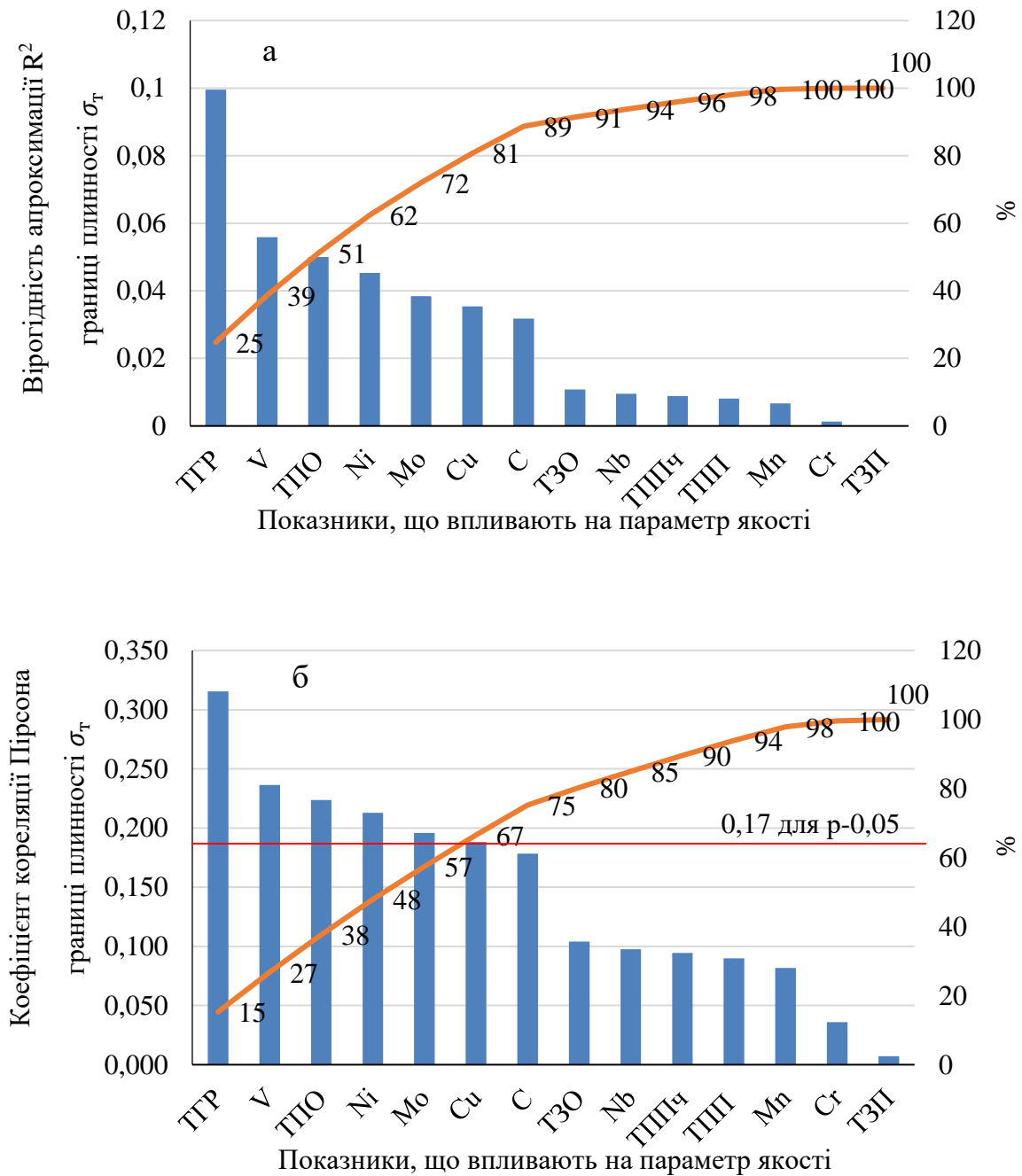


Рисунок 7.7 – Діаграма розподілу вірогідності апроксимації (а) та коефіцієнту кореляції Пірсона (б) по показниках, які впливають на границю плинності прокату зі сталі марки К60

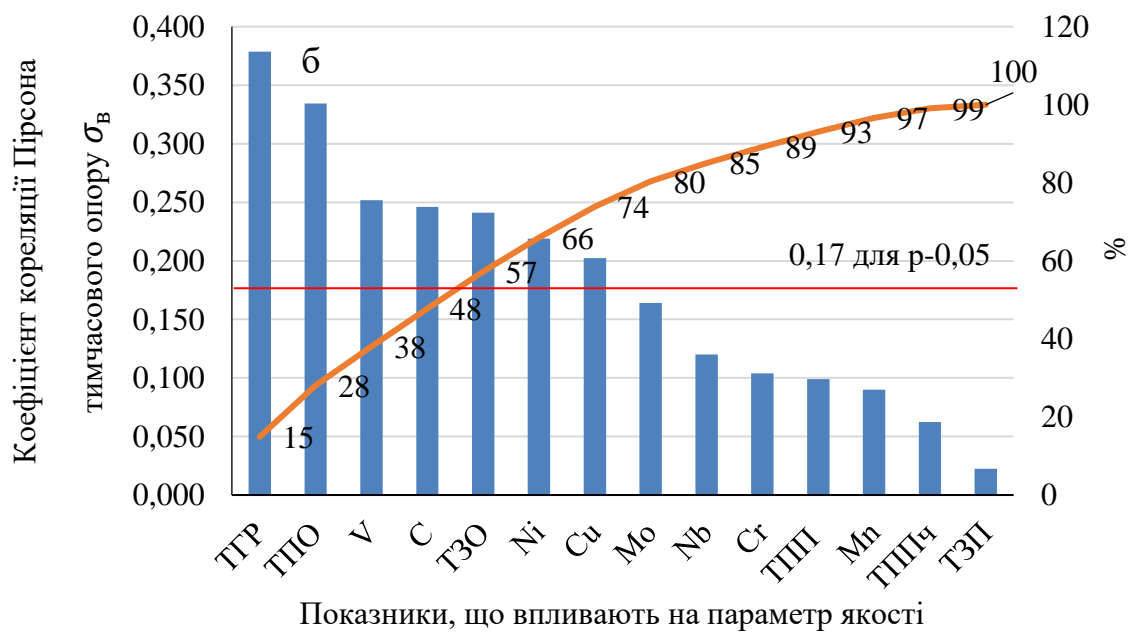
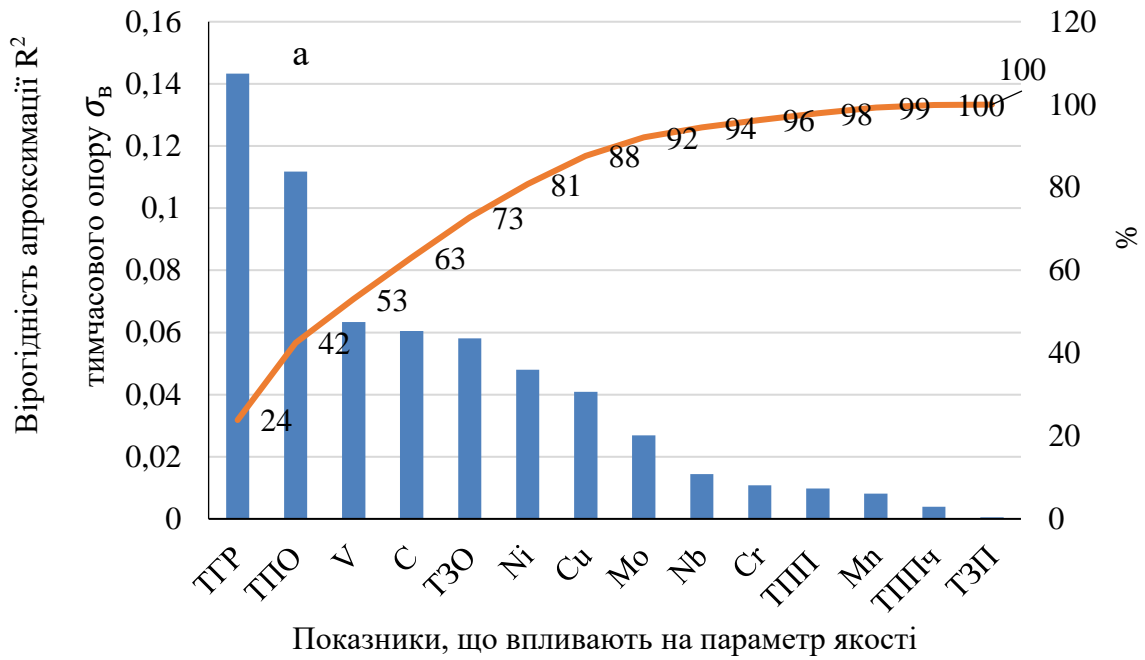
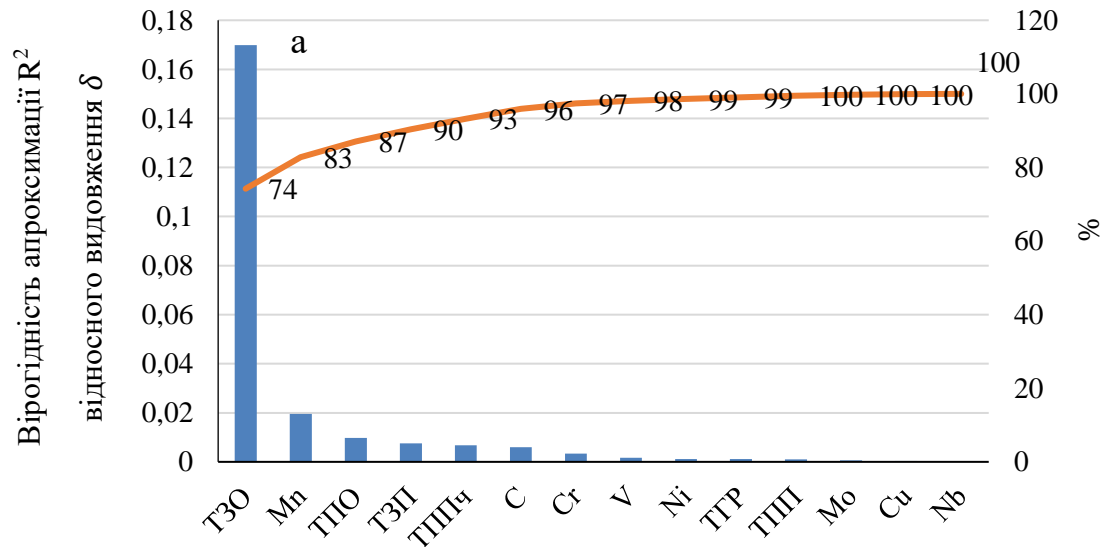
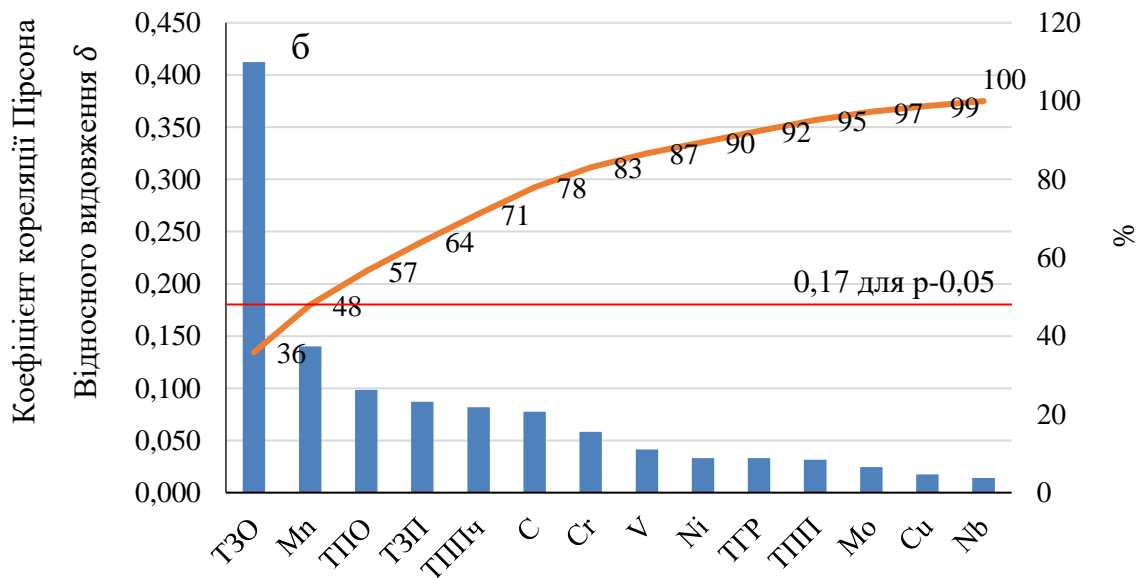


Рисунок 7.8 – Діаграма розподілу вірогідності апроксимації (а) та коефіцієнту кореляції Пірсона (б) по показниках, які впливають на тимчасовий опір прокату зі сталі марки К60



Показники, що впливають на параметр якості



Показники, що впливають на параметр якості

Рисунок 7.9– Діаграма розподілу вірогідності апроксимації (а) та коефіцієнту кореляції Пірсона (б) по показниках, які впливають на відносне видовження прокату зі сталі марки К60

Незначимі показники залишаються на рівні, який наразі встановлено технологією. Будуємо діаграми розподілу по параметрах якості, які розглядаються, для встановлення поточного стану технології виробництва прокату товщиною 14 мм зі сталі марки К60 на стані 3600 «МК «АЗОВСТАЛЬ», рис. 7.10-7.12.

Таблиця 7.12 – Показники, які є значимі при визначенні відповідного параметру якості

Показник	Значення кореляції Пірсона по параметрах якості		
	$\sigma_T$	$\sigma_B$	$\delta$
ТГР	0,316	0,379	-
V	0,236	0,252	-
ТПО	-0,224	-0,334	-
Ni	-0,213	-0,219	-
Mo	-0,196	-	-
Cu	-0,188	-0,202	-
C	0,178	0,246	-
ТЗО	-	-0,241	0,412

В таблиці 7.12, знак «-» встановлено у відповідності зі знаком в отриманих залежностях, додаток Д

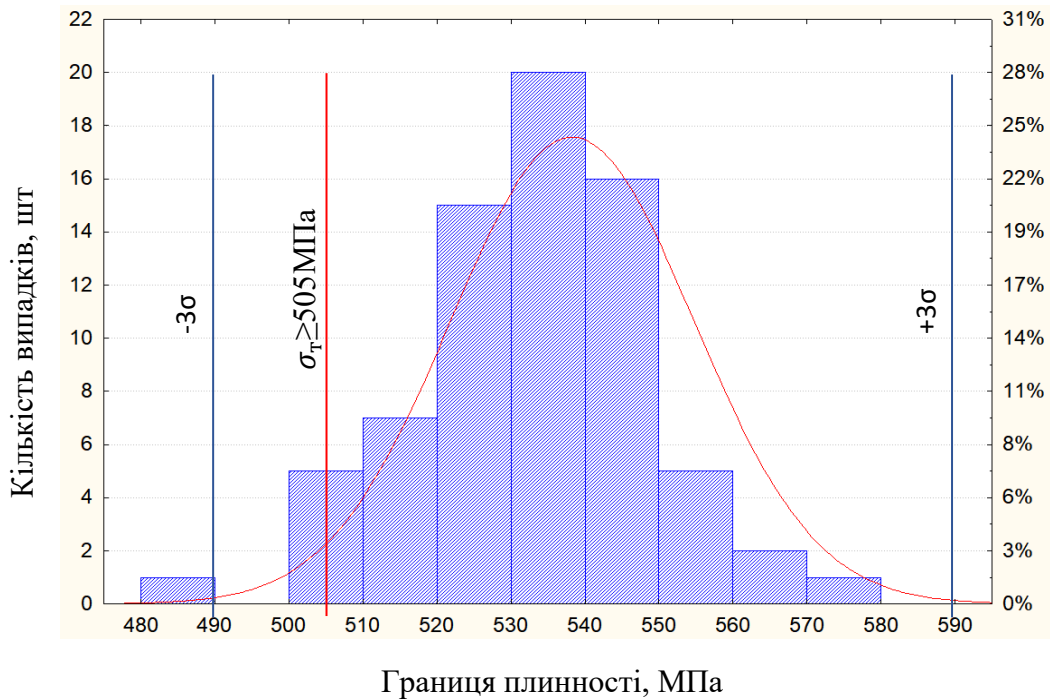
Згідно з діаграмами розподілу (див. рис. 7.10-7.12), маємо наступний стан якості прокату, що досліджується:

- розподіл границі плинності має випадки отримання нижчого за нормативний рівень та граничних з мінімальними нормативними рівнями вимог. Загальний розподіл зміщений до нижнього рівня вимог;

- розподіл тимчасового опору також має випадки отримання нижчого за нормативний рівень вимог;

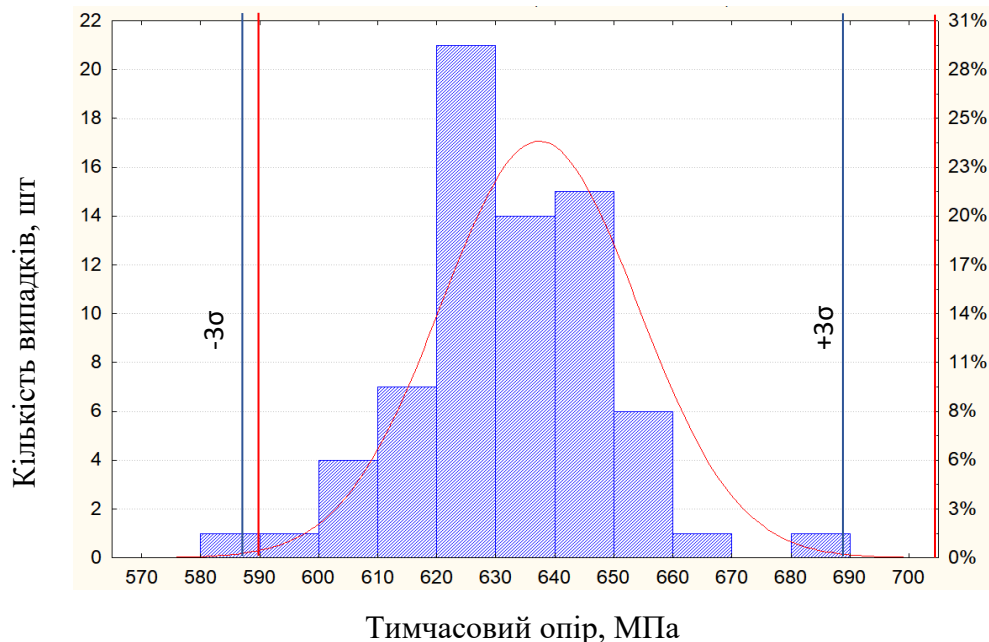
- розподіл відносного видовження має суттєву кількість випадків отримання нижчого за нормативний рівень вимог. Розподіл відносного видовження свідчить про нестабільність технологічного процесу щодо отримання даного параметру якості.

Для стабілізації технологічного процесу та підвищення якості продукту по параметрам, що досліджуються, встановимо наступні обмеження, табл. 7.13. Для отримання необхідного рівня показників технології по встановлених обмеженнях параметрів якості, в масиві даних, що досліджується, за допомогою фільтрів залишимо тільки ті дані, які відповідають стабільному або зеленому рівню процесу та встановимо їх межі, табл. 7.14.



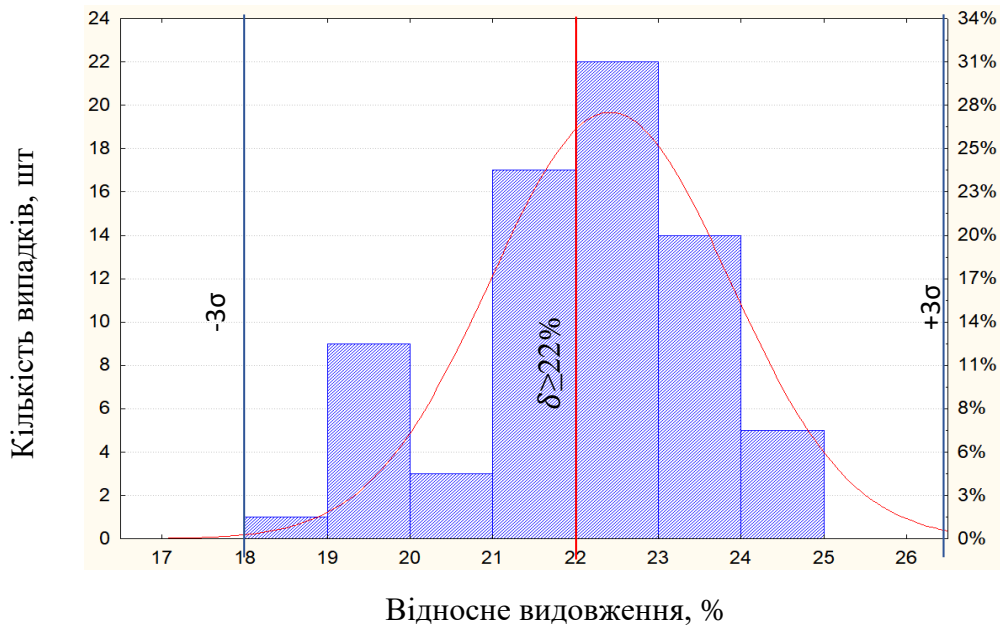
Нормативні параметри —  $\sigma_T \geq 505$  МПа  
 Статистичні параметри: середнє значення 537,99 МПа  
 стандартне відхилення 16,35 МПа  
 Розраховані параметри —  $3\sigma = 489-587$  МПа

Рисунок 7.10 – Розподіл границі плинності прокату товщиною 14 мм зі сталі марки К60



Нормативні параметри —  $\sigma_B = 590-710$  МПа  
 Статистичні параметри: середнє значення 637,04 МПа  
 стандартне відхилення 16,596 МПа  
 Розраховані параметри —  $3\sigma = 587-687$  МПа

Рисунок 7.11 – Розподіл тимчасового опору прокату товщиною 14 мм зі сталі марки К60



Нормативні параметри	—	$\delta \geq 22\%$
Статистичні параметри:		середнє значення 22,39 %
		стандартне відхилення 1,44 %
Розраховані параметри	—	$3\sigma = 18,07-26,71\%$

Рисунок 7.12 – Розподіл відносного видовження прокату товщиною 14 мм зі сталі марки К60

Таблиця 7.13 – Встановленні обмеження показників якості

Параметр якості / технологічний показник	Рівні процесу				
	порушення процесу	потребує уваги	стабільний	потребує уваги	порушення процесу
Границя плинності, МПа	<505	505-510	511-570	571-580	>580
Тимчасовий опір, МПа	<590	590-600	600-660	661-710	>710
Відносне видовження, %	<22	22-22,5	22,5-25	25-26	>26

Фільтрацію необхідно починати з найбільш нестабільного параметру, в нашому випадку це відносне видовження. Так як перелік значимих показників перетинається між параметрами якості, для всіх трьох параметрів вони будуть однакові.

При встановленні жовтого та червоного рівнів необхідно враховувати негативне або позитивне значення кореляції Пірсона, див. табл. 7.12.

Межами жовтого рівня для показників вибрані дані, які відповідають межим нормативних вимог параметрів якості.



Таблиця 7.14 – Встановленні обмеження показників та параметрів якості до них

Параметр якості / технологічний показник	Рівні процесу				
	порушення процесу	потребує уваги	стабільний	потребує уваги	порушення процесу
Границя плинності, МПа	<505	505-510	511-570	571-580	
Тимчасовий опір, МПа	<590	590-600	600-660	661-710	>710
Відносне видовження, %	<22	22-22,4	22,5-25	25,1-26	
ТГР	<876	876-908	909-1008		>1008
V	<0,055	0,056-0,059	0,06-0,08		>0,08
ТПО	<717	718-720	721-737		>737
Ni			0-0,29		>0,29
Mo			0-0,07		>0,07
Cu			0-0,28		>0,28
C			0,08-0,11		>0,11
ТЗО	<541	542-595	596-640		>640

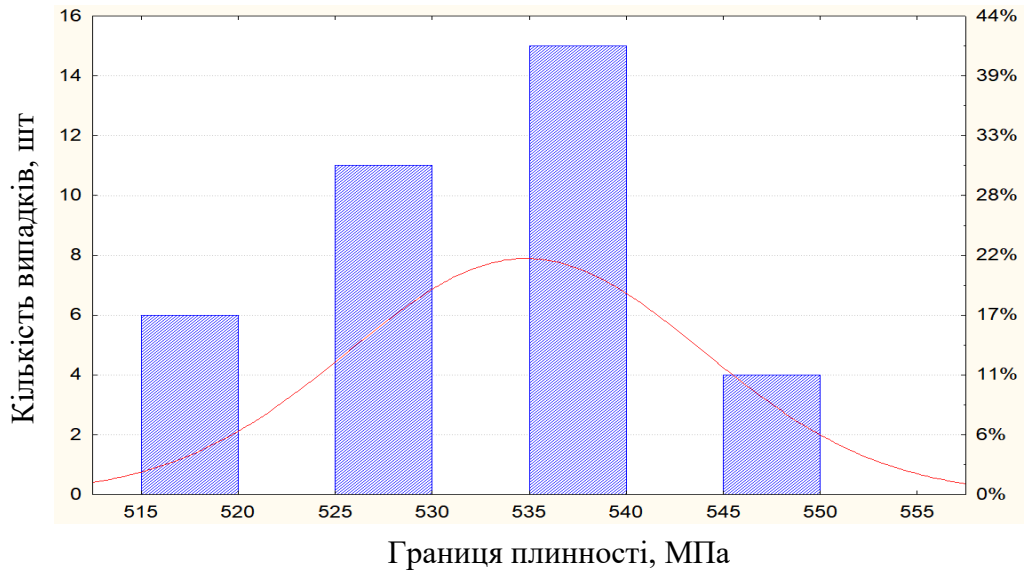
Також, важливу роль при використанні даного методу при встановленні рівнів процесу відіграє якість первинно розробленого технологічного процесу.

В даному випадку комбінатом розроблена помилкова технологія термомеханічної прокатки з прискореним охолодженням, яка не дозволяє отримувати необхідні механічні властивості за допомогою охолодження, що видно по негативних кореляціях параметрів охолодження. Необхідні властивості досягаються здебільшого за допомогою параметрів процесу прокатки.

Перевагою запропонованого методу додатково є можливість виявлення помилок в розроблених технологіях.

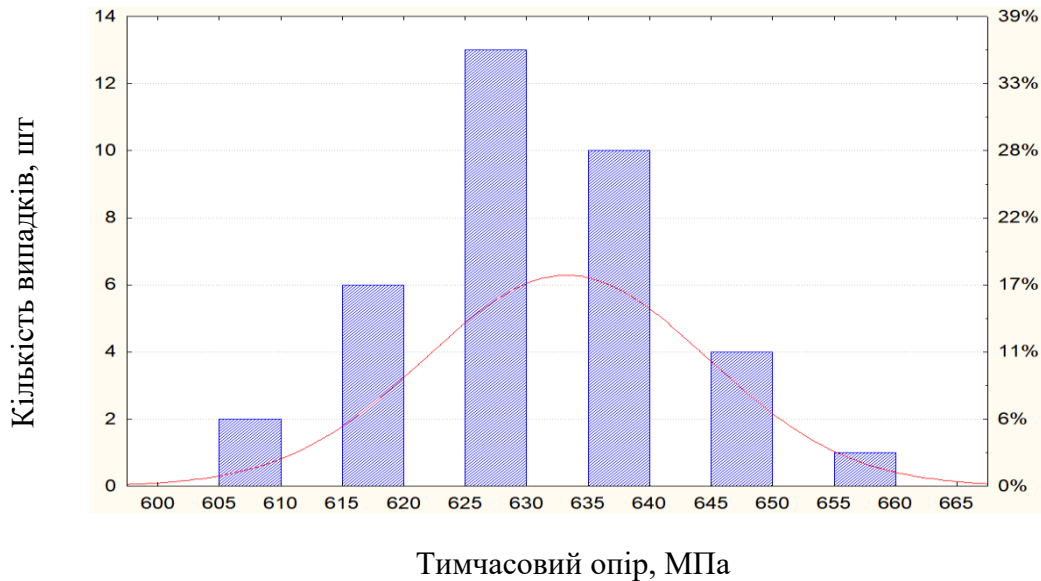
Після встановлення необхідних рівнів технологічних показників для отримання стабільних параметрів якості, маємо наступний їх розподіл, рис. 7.13-7.15.

Таким чином, зелений рівень процесу забезпечив отримання механічних властивостей в межах нормативних вимог, при цьому зменшилося стандартне відхилення границі плинності, тимчасовому опору та відносному подовженню на 44 %, 31 % та 46 % відповідно, що свідчить про підвищення стабільності технології та отриманих результатів [267].



Нормативні параметри —  $\sigma_T \geq 505$  МПа  
 Статистичні параметри: середнє значення 534,72 МПа  
 стандартне відхилення 9,10 МПа  
 Розраховані параметри —  $3\sigma = 507-562$  МПа

Рисунок 7.13 – Розподіл границі плинності прокату товщиною 14 мм зі сталі марки К60, зелений рівень процесу



Нормативні параметри —  $\sigma_B = 590-710$  МПа  
 Статистичні параметри: середнє значення 633,06 МПа  
 стандартне відхилення 11,42 МПа  
 Розраховані параметри —  $3\sigma = 599-667$  МПа

Рисунок 7.14 – Розподіл тимчасового опору прокату товщиною 14 мм зі сталі марки К60, зелений рівень процесу



Рисунок 7.15 – Розподіл відносного видовження прокату товщиною 14 мм зі сталі марки К60, зелений рівень процесу

Розподіл відносного видовження не є нормальним, та після впровадження відповідних змін в технологію, його результати повинні стабілізуватися.

Таким чином, в межах превентивного керування якістю вперше запропоновано та формалізовано методологію з встановлення, визначення значень технологічних показників які впливають на якість продукції, їх контроль, накопичення, обробка та механізми покращення в якій використовуються принцип Парето, 3 $\sigma$ , критерій Пірсона, та, яка спрямована на безперервне покращення якості технологічних процесів і продукції.

### 7.3 Методологія освоєння нового сортаменту

Освоєння нового сортаменту продукції, це безперервний процес, який тісно пов'язаний із Замовником. Особливу актуальність цей процес отримує при освоєнні сортаменту, що виробляється способом термомеханічної прокатки, так як потребує

виконання аналізу можливостей існуючого устаткування, визначення аналогів, статистичної обробки даних.

Мобільність компанії в процесах освоєння нових продуктів/сортаменту свідчить про рівень її розвитку.

Процес освоєння нових продуктів може бути реалізовано в умовах існуючого устаткування, або потребувати деяких технічних змінень, модернізації, реконструкції. Від цього залежать строки освоєння продуктів.

Процес освоєння нових продуктів, як окрема процедура, є одним з інструментів, який забезпечує сучасний рівень ефективності компанії, якості та продуктових пропозицій [268], та складається з наступних кроків:

1. Аналіз ринку, або нова потреба/пропозиція від Замовника.

Потреби в новому продукті можуть формуватися на підставі Технологічної стратегії, результатів опитувань та пропозицій Замовників. Після цього робиться ринковий аналіз та визначається наскільки продукт потрібен, який обсяг ринку і можливий прибуток компанії.

2. Техніко-економічний аналіз

Аналізується можливість виробництва нового сортаменту на потужностях компанії, розробляється проект технології та виконується підрахунок потреб у додатковому фінансуванні, плановий рівень собівартості прокату.

Якісно та оперативно підготувати цей розділ можливо при наявності сформованої «Бази знань».

При розробці проекту технології виконуються наступні кроки:

- статистична обробка показників якості продукції, що виробляється зараз, бенчмаркінг технології інших виробників, або використання доступних науково-дослідних матеріалів, публікацій;

- формування технологічних вимог/параметрів технології та устаткування для забезпечення параметрів якості нового продукту. При потребі в додатковому устаткуванні необхідно також вказати його цільові параметри.

- безпосередня розробка технологічного документу для виробництва дослідної партії прокату.

Слід зазначити, що у великих металургійних компаніях більше можливостей для виробництва нових продуктів, так як стадії виробництва можуть бути організовані на різних виробничих дільницях/підприємствах. Так, наприклад, для виробництва гарячекатаної травленої штаби з низьковуглецевої сталі  $C \leq 0,05$  % з низьким вмістом  $S \leq 0,005$  % та  $P \leq 0,010$  % (виробництво сталі такого рівня якості в Україні наразі можливо тільки на «МК «АЗОВСТАЛЬ»») можливо з безперервнолитих слябів які виготовлені в конвертерному цеху «МК «АЗОВСТАЛЬ», прокатані на стані 3600 до необхідних розмірів, або відредуковані на слябінгу «ММК ІМЕНІ ІЛЛІЧА», прокатані на стані 1700, а потім протравлені на агрегаті цеху холодного прокату.

Порівнюючи результати ринкового аналізу та планових економічних показників, компанія виконує техніко-економічний аналіз на підставі якого приймається рішення про доцільність освоєння нового продукту. Якщо по результатах аналізу виробництво нового продукту є ефективним, процес переходить до наступного кроку.

Почати освоєння нового продукту можливо як по узгодженню із Замовником, так і для перспективних потреб ринку коли по результатах ринкового аналізу підтверджено потенціал продукту. В останньому випадку, коли немає наявного замовлення, продукт може вироблятися як аналог вже засвоєного продукту, але з більш вищим рівнем якості, якщо це не заперечено діючим стандартом.

Наприклад, товстолистовий гарячий прокат товщиною 10 мм згідно зі стандартом EN 10149-2 марки сталі S420MC може бути виготовлено в межах виробництва сталі марки S355JO по EN 10025-2, при однакових вимогах до сортаменту, табл. 7.15. Таким чином, при узгодженні стану постачання, дослідний прокат з марки сталі S420MC згідно зі стандартом EN 10149-2 може бути вироблений в межах поточних замовлень на марку сталі S355JO згідно стандарту EN 10025-2.

Застосування такого методу дозволяє зменшити ризики при освоєнні нових продуктів у випадках коли при дослідних прокатках необхідні більш високі

властивості нового прокату не були отримані. Прокат, який вироблено, завжди можна призначити по існуючому замовленню.

Таблиця 7.15 – Порівняння вимог по стандартах для виробництва нових продуктів

Параметр якості	Значення параметру згідно зі стандартом	
	EN 10149-2	EN 10025-2
Нормативний документ (технічні вимоги)	EN 10149-2	EN 10025-2
Марка сталі	S420MC	S355J0
Стан постачання	термомеханічна прокатка	Нормалізувальна або термомеханічна прокатка
Хімічний склад, %		
C	≤0,12	≤0,20
Mn	≤1,60	≤1,60
Si	≤0,50	≤0,55
S	≤0,015	≤0,030
P	≤0,025	≤0,025
Cr	-	-
Ni	-	-
Cu	-	≤0,55
Mo	-	-
V	≤0,20 <sup>a</sup>	-
Nb	≤0,09 <sup>a</sup>	-
Сb	-	-
Ti	≤0,15 <sup>a</sup>	-
As	-	-
Вуглецевий еквівалент, CE, %	-	≤0,45
Механічні властивості		
Тимчасовий опір, МПа	480-620	470-630
Границя плинності, МПа	≥420	≥355
Відносне видовження, %	≥19	≥22

<sup>a</sup>Nb+V+Ti ≤ 0,22 %; «-» вміст елемента не регламентовано

### 3. Підготовка виробництва нових продуктів.

На цьому етапі планується виробництво дослідної партії, розробляється остаточна технологічна документація, при необхідності, виконується забезпечення устаткуванням, інструментами, сировиною та матеріалами, феросплавами та іншим.

### 4. Виробництво дослідної партії

Дослідна партія, це мінімальний об'єм продукту який можна виробити без втрат

для виробництва. Наприклад мінімальний об'єм – одна конвертерна плавка, або одна партія вагою 60-80 т (у випадках, коли для нового продукту використовується сталь поточного виробництва, але технологічні параметри прокату відрізняються). Виробництво дослідної партії суттєво зменшує ризики як для Виробника так і для Замовника.

Виробництво дослідної партії нового продукту підпадає під вимоги Системи якості, як і вся продукція, що виробляється загалом.

Приймання дослідної партії нового продукту може здійснюватися спільно із Замовником.

Слід зазначити, що необхідний комплекс випробувань, у великих металургійних компаніях, може бути виконано в різних (розташованих на різних підприємствах) атестованих для цього випробувальних лабораторіях, або в спеціалізованих сторонніх лабораторіях.

Прикладом цього може бути випробування товстолистового прокату для труб у сірководневному виконанні, який вироблено на стані 3000 «ММК ІМЕНІ ІЛЛІЧА», в умовах спеціалізованої сірководневої лабораторії «МК «АЗОВСТАЛЬ», яка є найбільшою та найпотужнішою на території України.

#### 5. Випробування нового продукту в умовах Замовника

Маркером який дозволяє зробити висновок про успішність нового продукту, є відгук Замовника. Слід зазначити, що переробка продукту Замовником може відбуватися з представниками виробника, що дозволяє оцінити якість та побачити напрямки для подальшого вдосконалення продукту.

Відгук Замовника по результатах переробки є підставою для подальшого виробництва дослідної, або вже промислової партії з урахуванням побажань Замовника, якщо такі були при переробці.

Виробництво дослідних партій, буде відбуватися доки Замовник не отримає продукт, який задовольняє всі його вимоги.

#### 6. Промислове виробництво

Коли технологія відпрацьована, а отримана якість задовольняє Замовника,

продукт вважається засвоєним та може вироблятися в промислових об'ємах.

Освоєний продукт включається до загального переліку продуктів та може бути запропонований іншим Замовникам компанії.

Запропоновану схему функціонування Методології освоєння нового сортаменту наведено на рис. 7.16.

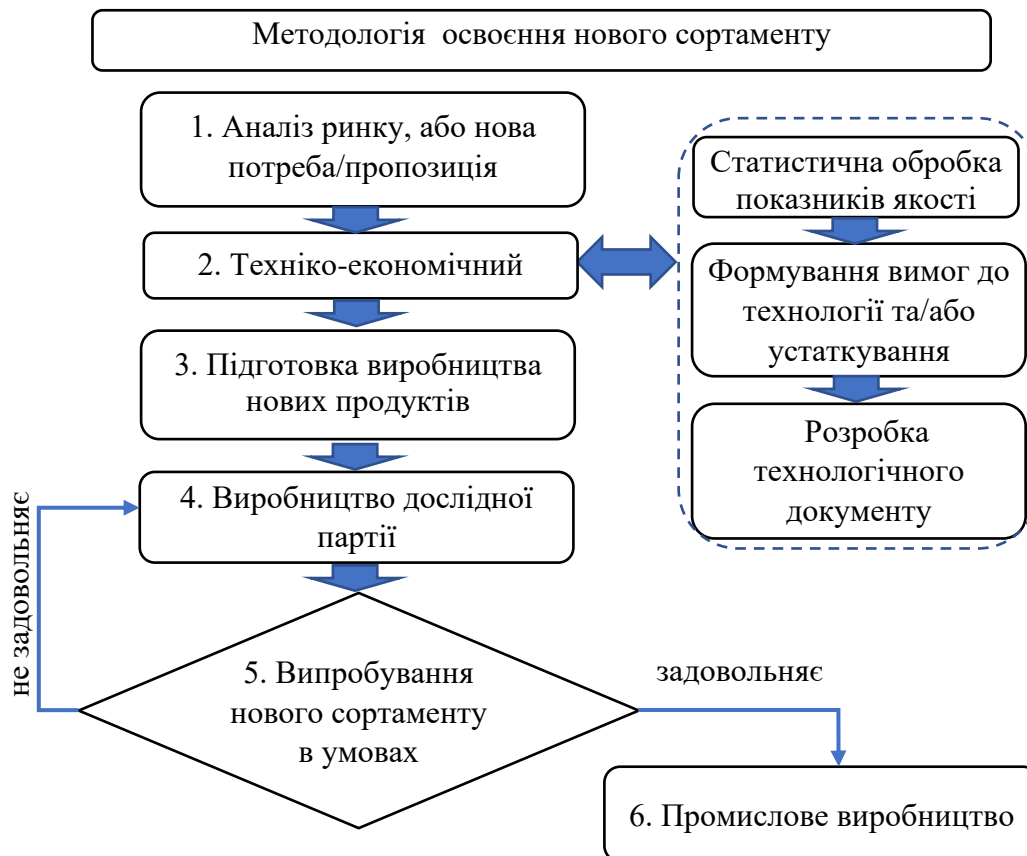


Рисунок 7.16 – Схема функціонування Методології освоєння нового сортаменту.

Продукт може надалі вдосконалюватися в залежності від вимог (індивідуальних особливостей переробки) конкретних Замовників з отриманням зворотного зв'язку.



## **7.4. Технологічна стратегія та її реалізація**

### **7.4.1. Обґрунтування вибору підприємства для реалізації технологічної стратегії**

Технологічна стратегія, це є перспективний план розвитку компанії/підприємства (далі компанії), який засновано на розвитку сортаменту, що виробляється, технології, устаткуванні, змінні питомих витрат металу та ресурсів пов'язаних з цим, який закінчується фінансовим розрахунком.

Побудова технологічної стратегії дозволяє одночасно розуміти стан в якому знаходиться компанія/підприємство та в якому напрямку треба «рухатись» для досягнення мети.

Для формування цього плану задіяні служби компанії майже по всіх напрямках: продажі, забезпечення, виробництво, технічний/технологічний, капітального будівництва та інвестиції, фінансовий.

Головною метою Технологічної стратегії є досягнення фінансового результату компанії за рахунок виконання сучасних та закладання фундаменту для засвоєння перспективних вимог ринку. Запропоновану методологія побудови технологічної стратегії наведено в додатку Ф.

Вибір підприємства для реалізації технологічної стратегії, або розставлення пріоритетів з модернізації безумовно є керівним рішенням компанії для прийняття якого необхідно мати відповідний об'єм інженерної інформації. В даному конкретному випадку пропонується розглянути окреме виробництво продукції способом термомеханічної прокатки в межах одного з підприємств металургійної компанії МЕТІНВЕСТ ХОЛДІНГ. Для отримання всього переліку можливостей від впровадження системи, що пропонується, необхідно розуміти існуючі та потенціальні зв'язки всередині компанії. Структура МЕТІНВЕСТ ХОЛДІНГУ [269] зі структурою виробництва та можливі зв'язки у загальному вигляді, в межах підприємств, що виробляють плоский прокат, наведено на рис. 7.17.

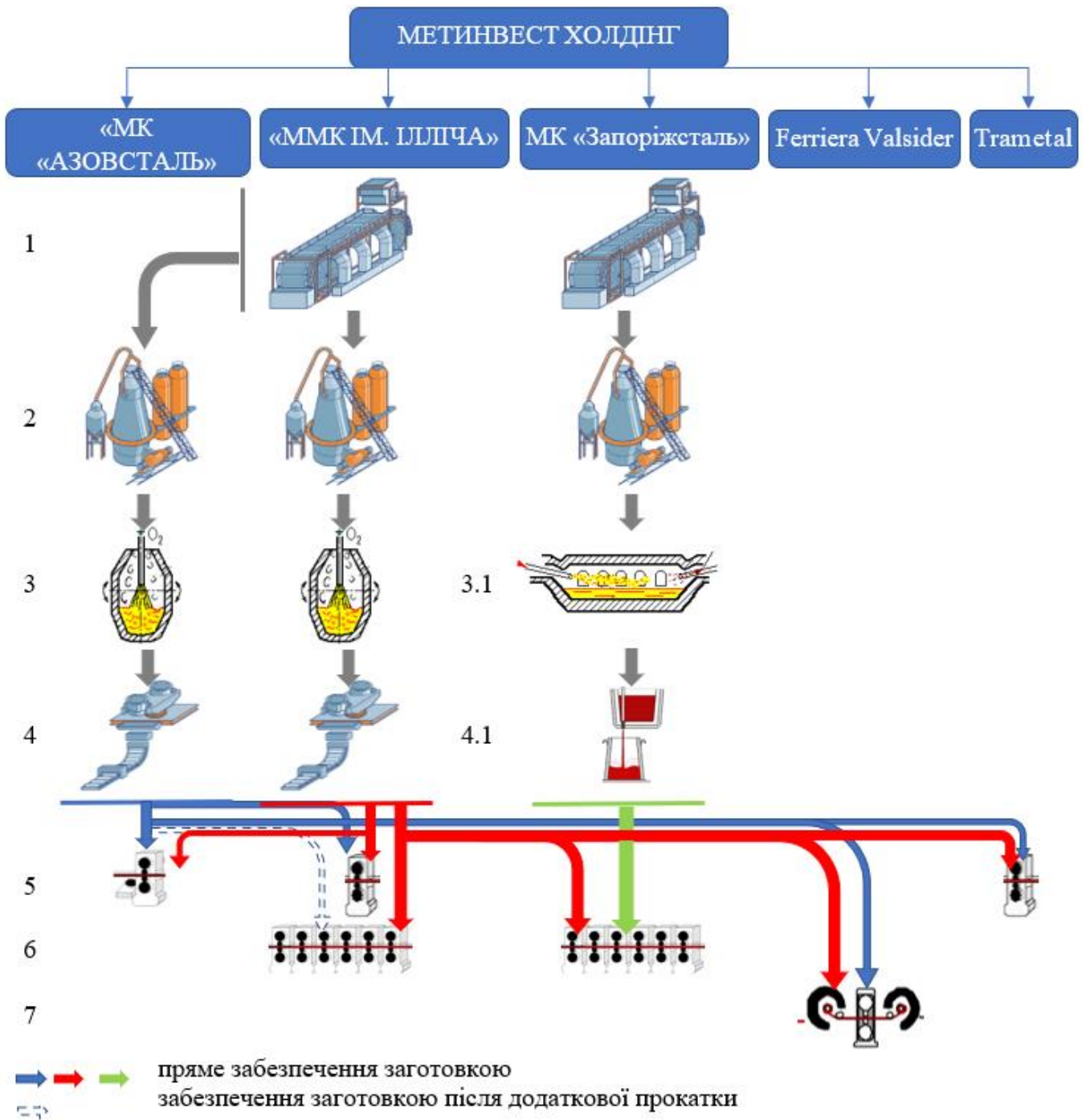


Рисунок 7.17 – Структура виробництва компанії МЕТИНВЕСТ ХОЛДІНГ (1) агломераційне виробництво, (2) доменне виробництво, (3) сталеплавильне виробництво, конвертерне або (3.1) мартенівське, (4) розливка сталі, безперервна або (4.1) в зливки, (5) виробництво товстолистого прокату на реверсивних станах гарячої прокатки, (6) виробництво штаб на безперервних станах гарячої прокатки, (7) виробництво штаб на стані Стеккеля, та можливі зв'язки із забезпечення заготовкою між підприємствами

Структуру виробництв показано схематично, без врахування кількості одиниць устаткування та додаткових можливостей виробництва.

Через відносно мале виробництво, 231 тис. т/рік, завод Spartan, UK з реверсивним станом кварто 2200 в даній роботі не розглядається.

Існуюча схема виробництва компанії МЕТИНВЕСТ ХОЛДІНГ дозволяє двом підприємствам «МК «АЗОВСТАЛЬ» та «ММК ІМЕНІ ІЛЛІЧА» забезпечувати якісною заготовкою у вигляді безперервнолитих слябів всі підприємства компанії, з деякими обмеженнями.

Схема забезпечення підприємств компанії слябами, які вироблені на «МК «АЗОВСТАЛЬ» вже відпрацьована.

Можливості конвертерного цеху дозволяють виробляти сляби з обробкою в ківш-печі та вакууматорі, що забезпечує вимоги Замовників щодо сортаменту та якості кінцевої продукції - прокату.

Сляби виробляють в товщинах 220-250-300 мм, які наразі не дозволяють використовувати їх для виробництва на безперервних станах компанії, без додаткового зменшення товщини (яке можливо через попередню прокатку слябів на стані 3600 або в кліті Слябінгу), та на товстолистовому стані 3200 заводу Trametel для виробництва відносно тонкого сортаменту, наприклад товщиною 4,0 мм.

Забезпечення підприємств компанії слябами, які вироблено на «ММК ІМЕНІ ІЛЛІЧА», товщинами 150-250 мм раніше було обмежено через невідповідну якість, обумовлену станом устаткування машин безперервної розливки, відсутністю ківш-печі, використання технології хімічного підігріву Al. Зі встановленням в 2019 році комплексу з новою машиною безперервного лиття слябів №4, яка дозволяє виробляти сляби товщиною від 170 мм до 250 мм та ківш-піч, суттєво розширилися можливості комбінату. Запропонована схема передбачає можливість забезпечення заготовкою всі підприємства компанії, в тому числі безперервні стани та стан 3200 заводу Trametel для виробництва відносно тонкого сортаменту товщиною 4,0 мм у відповідній якості.

Вперше, запропоновано використовувати безперервнолиті сляби виробництва «ММК ІМЕНІ ІЛЛІЧА» для виробництва гарячекатаних рулонів на безперервному

стані 1680 МК «Запоріжсталь». Такий захід дозволить суттєво розширити сортамент стану 1680 та частково зняти навантаження зі стану 1700 «ММК ІМЕНІ ІЛЛІЧА». Межі сортаменту, який можна передати на стан 1680, потребує окремого технологічного дослідження з оцінкою економічної ефективності.

Забезпечення інших підприємств заготовкою виробництва МК «Запоріжсталь» не розглядається через застарілий спосіб виробництва та розливання сталі, наслідками якого є підвищена анізотропія хімічного складу та властивостей по довжині заготовки та прокату, наявність дефектів в прокаті які властиві тільки зливку.

В даній роботі розглядаються тільки технологічні аспекти зв'язку з метою забезпеченні вимог Замовників, без врахування розподілу об'ємів заготовки та виробництва між підприємствами.

Слід зазначити, що наразі незбалансованим залишається процес виробництва слябів та можливості їх прямого використання на стані 1700 «ММК ІМЕНІ ІЛЛІЧА». Оновлена ливарна потужність комбінату, яка розрахована на виробництво гарячекатаних рулонів, дозволяє виробляти сляби товщиною 150-170-200-250 мм, в той же час можливості стану 1700 обмежені використанням заготовки товщиною не більше ніж 200 мм. Використання заготовки товщиною від 150 мм до 200 мм пов'язане з виникаючими обмеженнями сортаменту по ширині, рис. 7.18.

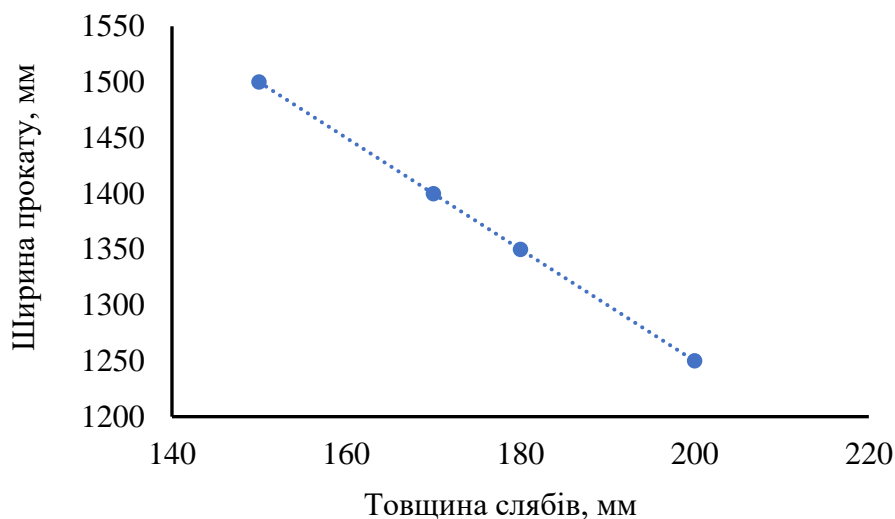


Рисунок 7.18 – Залежність ширини прокату від товщини слябів при виробництві на стані 1700 «ММК ІМЕНІ ІЛЛІЧА»

Залежність, яка наведена на рис. 7.18, отримана шляхом розрахунку режиму прокатки слябів зі сталі марки S355MC, згідно зі стандартом EN 10149-2, при виробництві підкату товщиною 24 мм в чорновій групі клітей при максимальному їх навантаженні.

Додатковим обмеженням є існуючі відстані між клітьми чорнової групи, яка не дозволяє використовувати сляби вагою більшою за 12-16 т через відсутність можливості синхронізувати роботу клітей, в залежності від сортаменту. Таким чином, обґрунтовано вибір підприємства «ММК ІМЕНІ ІЛЛІЧА» для реалізації проекту модернізації устаткування на стані 1700.

#### 7.4.2 Цільовий сортамент стану 1700 після модернізації, існуючі обмеження

Поточний сортамент стану 1700 суттєво відрізняється від сортаменту сучасних аналогічних станів. Детальний сортамент, що виробляється, перелік та характеристики основного устаткування наведені в розділі 1.3.2.1. На підставі додаткових вимог Замовників та ринкового аналізу виробництва гарячекатаних рулонів, які є складовою технологічної стратегії, сформовано загальні вимоги щодо рулонів та цільовий сортамент, який необхідно виробляти після модернізації стану 1700, табл. 7.15, 7.16, серед якого термомеханічний прокат категорії міцності до X70 та S700MC.

Таблиця 7.15 – Загальні вимоги та цільовий сортамент стану 1700 після модернізації

Марка сталі	Нормативний документ	Границя плинності, МПа	Тимчасовий опір, МПа	Розміри (товщина×ширина), мм	Вага, т
DD11- DD14	EN 10111	≥170	≤440	1,2-12,7 × 900-1600	До 32 <sup>b</sup>
-----	-----	-----	-----		
S460MC	EN 10149-2	>460	520-670		
X70	API-5L <sup>a</sup>	485-635	570-760		

<sup>a</sup> мається на увазі вимоги до прокату для виготовлення труб по стандарту API-5L.

<sup>b</sup> максимальна вага рулонів.

В таблиці позначкою «-----» вказана наявність проміжного сортаменту.

Таблиця 7.16 – Розширений цільовий марочний сортамент стану 1700 після модернізації

Клас міцності	Границя плинності, МПа	Тимчасовий опір, МПа	Стандарт	Марка сталі
1	>170	≤440	EN 10130	DC01-07
			EN 10209	DC01-06EK/ED
			EN 10111	DD11-DD14
			ASTM A568/A568M	SAE 1006-1010
2	>185	290-540	EN 10025-2	S185
			API 5L	A
3	>235	360-510	EN 10025-2	S235 JR, JO, J2
			EN 10155	S235
			EN 10028-2	P235GH+N, P265GH+N
4	>235	370-580	EN 10025-2	S275 JR, JO, J2
			EN 10028-2	P295GH+N
			EN 10028-2	P275N, NL1, P275NH, NH1
			API 5L	B, X42, X46
			EN 10208-2	L245, L290
			EN 10113-2	S275N/NL
5	>355	430-680	EN 10149-2	S315MC
			EN 10025-2	S355 JR, JO, J2
			EN 10025-2	E295
			EN 10155	S355
			EN 10028-2	P355GH+N
			EN 10028-3	P355N/NH/NH1/NH2
			API 5L	X52, X56
			EN 10208-2	L360
6	>420	480-620	EN 10113-2	S355 N/NL
			EN 10149-2	S420MC
			API 5L	X60
			EN 10208-2	L415
7	>460	520-670	EN 10113	S420 N/NL
			EN 10025-2	E335
			API 5L	X65, X70
			EN 10208-2	L450, L485
8	>500	550-760	EN 10113-2	S460N/NL
			EN 10149-2	S460MC
			EN 10025-2	E360
9	>650	700-950	EN 10149-2	S500MC, S550MC
			EN 10149-2	S650MC, S700MC

Для забезпечення виробництва рулонів максимальної ваги для кожного розміру, у якості заготовки повинен використовуватись сляб товщиною 250 мм та

довжиною 10500 мм, згідно з технічним завданням.

Виробництво вказаного в табл. 7.15 сортаменту, масою до 32 т з заготовки товщиною 250 мм має наступні обмеження в умовах існуючого устаткування дільниці стану, табл. 7.17 [270, 271].

Таблиця 7.17 – Існуючі обмеження дільниці стану 1700 з виробництва рулонів масою до 32 т

Цільові вимоги		Існуючі обмеження
Показник	Значення показника	
Маса рулонів	до 32 т	Максимальна допустима вага рулонів на 2-х діючих моталках 9 т, на моталці №3 – 27 т
Товщина заготовки	250 мм	Кліть «01» з максимальним валковим проміжком - 250 мм, максимальним обтисненням - 34 мм; Кліть «1» з максимальним валковим проміжком - 200 мм, максимальним обтисненням - 46 мм;
Довжина заготовки	10500 мм	Відстань між клітьями: «01» та «1» становить 10150 мм; «1» та «2» становить 18500 мм
Категорія міцності рулонів	До X70	Тимчасовим опором в холодному стані не більше ніж 590 МПа
Мінімальна товщина рулонів	1,2 мм	Мінімальна товщина рулонів 1,5 мм
Температурний клин	Максимум 25 °С	60 °С на поточній довжині (для розміру 4×1310 мм) яка становить 206 м

На підставі оцінки поточних технічних можливостей існуючого устаткування, опрацювання пропозиції щодо проведення реконструкцій для виробництва цільового сортаменту та виконання необхідних об'ємів, ланцюг існуючих обмежень з початку технологічного процесу прокатки виглядає наступним чином:

– Максимальне обтиснення в кліті «01» не дозволяє отримати потрібну товщину заготовки для задачі її в кліть «1»;

– Відстань між клітью «01» та «1» менша ніж довжина прокатоної заготовки, що призведе до перебування розкату одночасно у двох клітьях. Кліті чорнової групи мають асинхронні двигуни з швидкістю обертів, яка не регулюється, що унеможливорює впровадження такого варіанту роботи;

– Існуючі теплозберігаючі панелі не забезпечують потрібного температурного клину, особливо при збільшенні довжини розкату.

Схема розміщення основного устаткування стану 1700 та його характеристики наведено в розділі 1.3.2.1.

Існуючі технологічні обмеження при розрахунку процесу термомеханічної прокатки поширеного сортаменту рулонів розмірами  $2,65 \times 1500$  мм зі сталі марки S355MC згідно з EN 10149-2 з цільовими вимогами - маса рулонів 31т, розміри слябів, які використовуються  $250 \times 1500 \times 10500$  мм, в умовах існуючого устаткування стану 1700, виглядають наступним чином, табл. 7.18.

Таблиця 7.18 – Результати розрахунків та обмеження виробництва великовагових рулонів на стані 1700

№ кліті	Показники						
	Товщина <sup>a</sup> , мм	Валковий проміжок, мм	Довжина розкату <sup>b</sup> , мм	Відстань між клітями, мм	Температура, °С	Сила прокатки, МН $\times 10^{-2}$	Максимальна сила прокатки, МН $\times 10^{-2}$
0 <sup>c</sup>	250		10500		1260		
01	228	250	11630	10150	1243	631	800
1	198	200	13400	18500	1228	926	2500
2	165	200	16080	22980	1211	1112	2500
3	137	150	19360	35420	1195	1056	2000
4	110	150	24110	53000	1172	1160	2000
4a	85 (30)	150	31210	87000	955 (1092)	1352	2000
5	19	150	139610	5800	941	2016	2400
6	12	150	221050	5800	934	1951	2400
7	7,7	150	344490	5800	927	1796	2000
8	5,2	150	510110	5800	915	1529	1800
9	3,5	150	757870	5800	900	1460	1700
10	2,65	150	1000960	5800	888	1069	1500

<sup>a</sup> товщина після проходу; <sup>b</sup> розмір вказано у гарячому стані; <sup>c</sup> початкові дані; в дужках (...) вказано потрібне значення показника

На підставі виконаного аналітичного моделювання процесу прокатки рулонів з урахуванням технічних обмежень існуючого устаткування стану 1700 не вдалось отримати наступні технологічні параметри:

– неможливо збільшити обтиснення в кліті 01, так як сила прокатки перевищить максимальну силу, що призведе до порушень природніх умов захоплення розкату



валками, в наслідок чого неможливо задати підкат товщиною 228 мм в кліть 1, так як валковий проміжок становить 200 мм;

– товщина заготовки після чорної групи становить 85 мм, замість потрібної 30 мм внаслідок недостатньої обтискної здатності клітей 01-4а;

– температура початку прокатки в чистовій групі становить 955 °С, що нижче за потрібну 1092 °С внаслідок недостатньої теплозберігаючої можливості існуючих екранів при збільшенні довжини розкату з вагою 31 т.

Таким чином, існуючі технічні обмеження не дозволяють забезпечити виробництво рулонів цільового сортаменту, вказаного в табл. 7.15.

#### **7.4.3 Комплекс устаткування, що підлягає модернізації, аналіз вузьких місць, визначення необхідних технічних характеристик**

Для усунення вузьких місць треба реконструювати наступні дільниці стану, рис. 7.19:

– чорнова група – замість клітей 01-4а встановити одну реверсивну кліть, що дозволить використовувати сляб товщиною 250 мм та регулювати товщину заготовки для чистової групи в залежності від технологічних потреб;

– встановити, додатково, після теплозберігаючих екранів установку CoilBox, яка дозволить додатково зберегти температуру та суттєво зменшити температурний клин по довжині заготовки.

За допомогою аналітичної моделі шляхом декількох ітерацій виконано розрахунок технологічного процесу термомеханічної прокатки рулонів розмірами 1,8×1500 мм зі сталі марки S355MC (розміри слябів 250×1500×10500 мм), з метою визначення необхідних технічних характеристик устаткування, яке необхідно реконструювати. Вибраний сортамент рулонів є найбільш показовим у сукупності розмір / марка сталі. Результати розрахунку наведені в табл. 7.19.

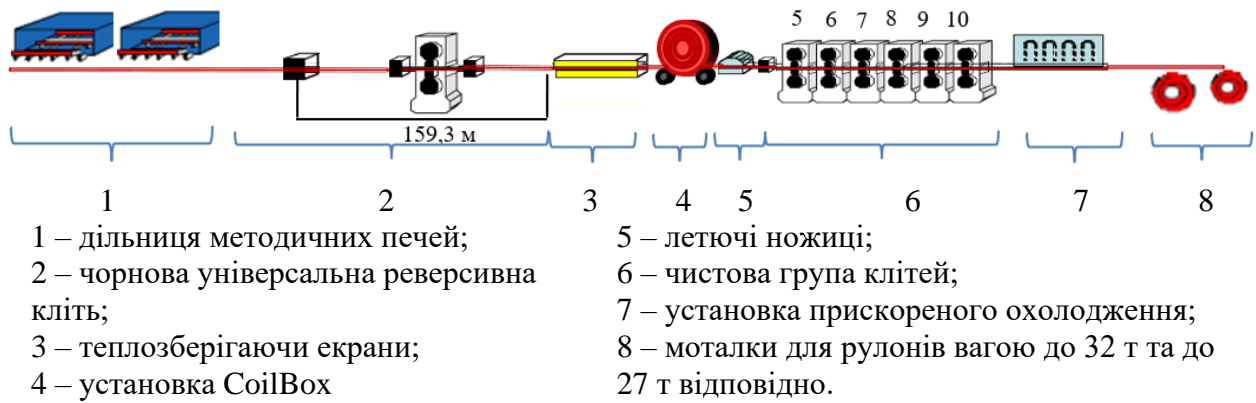


Рисунок 7.19 – Схема розміщення основного устаткування стану 1700 після реконструкції

Таблиця 7.19 – Результати розрахунку процесу термомеханічної прокати рулонів розмірами 1,8×1500 мм зі сталі марки S355MC в умовах реконструйованого устаткування

№ проходу / кліті	Показники				
	Товщина <sup>a</sup> , мм	Довжина розкату <sup>b</sup> , мм	Температура, °C	Швидкість, м/с	Сила прокати, МН×10 <sup>-2</sup>
0 <sup>c</sup>	250	10500	1220		
1	218	12110	1211	2,39	1209
2	184	14350	1203	2,98	1346
3	150	17610	1195	3,58	1502
4	115	22970	1184	3,58	1703
5	80	33010	1167	3,58	1966
6	45	58690	1130	3,58	2460
7	23	110820	1034	4,18	2708
CoilBox	23		1004,5		
5	19	139610	941	1,36	2016
6	12	221050	934	2,38	1951
7	7,7	344490	927	3,92	1796
8	5,2	510110	915	5,70	1529
9	3,5	757870	900	7,83	1460
10	2,65	1000960	888	9,61	1069

<sup>a</sup> товщина після проходу; <sup>b</sup> розмір вказано у гарячому стані; <sup>c</sup> початкові дані

В запропонованому варіанті модернізації три штовхальні методичні печі замінюються на одну нову крокуючого типу. Таким чином, на ділянці буде дві схожі методичні печі, що забезпечить підвищення продуктивності, уніфікацію технології та нагрівання слябів розмірами до 250×1600×10500 мм, вагою до 32т.

Мінімально необхідний рівень технічних характеристик, які повинно мати нове устаткування після реконструкції, отриманих на підставі розрахунку процесу прокатки наведені в табл. 7.20.

Таким чином, по результатах розрахунку з використанням аналітичної моделі мінімально необхідні характеристики основного реконструйованого устаткування стану 1700, а також його розташування забезпечують гнучкість технології чорнової прокатки.

Серед отриманих переваг такі як можливість керування товщиною заготовки для чистової групи, можливість використання слябів товщиною до 250 мм та довжиною до 10500 мм, що забезпечить виробництво рулонів вагою до 32 т, відсутність обмежень довжини заготовки, обумовленої відстанню між клітьми чорнової групи, зменшенням втрат температури заготовки перед чистовою групою за рахунок встановлення CoilBox.

Таблиця 7.20 – Мінімально необхідні характеристики устаткування після реконструкції

Устаткування	Показник	Характеристика
Чорнова реверсивна кліть	Діаметр робочих валків, мм	1140
	Оберти головного двигуна, об/мін	40-80
	Потужність головного двигуна, кВт	2x7000
	Максимальна сила прокатки, МН×10 <sup>-2</sup>	3000
	Максимальна швидкість прокатування, м/с	5
CoilBox	Вага заготовки, яка перемотується, т	32
	Формований внутрішній діаметр, мм	700
	Товщина заготовки, мм	20-40
Моталка	Вага рулонів, які змотуються, т	32
	Товщина рулонів, мм	1,2-12,7

Виконані розрахунки стали підставою для узгодження між компанією METINVEST та провідною компанією з розробки технології та виробництва металургійного устаткування «Primetals», принципового дизайну проекту модернізації стану 1700 та мінімально необхідного рівня його технічних характеристик, додаток X.

Також, необхідно виконати модернізацію установки для прискореного охолодження прокату із забезпеченням технічних та технологічних параметрів, необхідних для виробництва цільового сортаменту.

Важливою перевагою запропонованого варіанту модернізації є можливість впровадження технології термомеханічної прокатки, що дасть можливість забезпечити виробництво цільового сортаменту.

Таким чином, виконані розрахунки та встановлені існуючі обмеження, які не дозволяють збільшити вагу гарячекатаних рулонів та виробляти марочний сортамент з тимчасовим опором більш ніж 590 МПа.

Запропоновано перелік основного устаткування, яке треба замінити, що дасть можливість виробляти гарячекатані рулоні категорії міцності до X70 вагою до 32 т, згідно з цільовими вимогами.

Виконано розрахунок найбільш показового сортаменту рулонів, що виробляються способом ТМСП, розмірами 1,8×1500 мм із сталі марки S355MC, на підставі якого запропоновані мінімально необхідні характеристики, які повинно мати устаткування стану 1700 після модернізації.

#### **7.4.4 Вдосконалення методології аналітичних розрахунків температурного режиму прокатки на широкоштабовому стані з установкою CoilBox**

З метою розрахунку характеристик технологічного устаткування, в межах розрахунків по проекту модернізації стану 1700, вдосконалено методологію аналітичних розрахунків температурного режиму прокатки на широкоштабовому стані з CoilBox.

Актуальність цих розрахунків обумовлена необхідністю їх врахування при розробці технологічних рекомендацій із застосуванням устаткування CoilBox, у тому числі на МК «Запоріжсталь», а також його установкою в ході майбутньої реконструкції стану 1700 «ММК ІМЕНІ ІЛЛІЧА» для забезпечення температурних умов виробництва термомеханічного прокату.

Метою дослідження є уточнення методики розрахунку втрат температури металу при використанні устаткування CoilBox, що враховує фактори швидкості руху штаби, довжину рольганга і довжину розкату, з урахуванням умов безперервних станів гарячої прокатки МК «Запоріжсталь» та «ММК ІМЕНІ ІЛЛІЧА».

Типова модель розрахунку станів гарячої прокатки включає в себе наступні етапи [57, 129]:

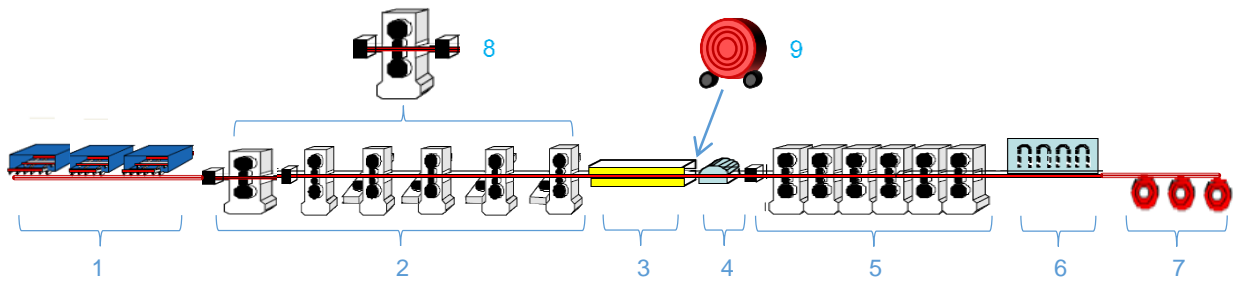
1. Розрахунок розмірів вихідної заготовки, який включає розрахунок питомих витрат металу на прокатку, перерахування розмірів заготовки в гарячий стан;
2. Розрахунок енергосилових параметрів прокатки включає розрахунок температурного режиму прокатки, коефіцієнту тертя, дійсного опору деформації, сили та моменту прокатки;
3. Розрахунок швидкісного режиму прокатки включає розрахунок часу прокатки, в залежності від типу швидкісного режиму, цикл прокатки;
4. Розрахунок середнього квадратичного моменту електродвигуна складається з розрахунку моментів по кожному циклу прокатки, середньоквадратичного інтегралу, а також з розрахунку потужності двигуна прокатного стану.

Типовий проект безперервного стану гарячої прокатки, на прикладі стану 1700 «ММК ІМЕНІ ІЛЛІЧА» наведено на рис. 7.20.

Принципи, що викладені в такій структурі розрахунку є універсальними і можуть бути застосовані для моделювання технології на різноманітних станах гарячої прокатки.

В даному дослідженні розглянуто особливості моделювання технології гарячої та термомеханічної прокатки на безперервних штабових станах на прикладі комплексу устаткування стану 1700 «ММК ІМЕНІ ІЛЛІЧА, з урахуванням проекту реконструкції (див. позиції 8 та 9, рис. 7.20).

Основне технологічне устаткування безперервних станів може включати одну або декілька універсальних реверсивних клітей або комбінацію реверсивних та неревверсивних замість неревверсивної чорнової групи, проміжний перемотувальний пристрій типу CoilBox перед чистовою групою, також можливі і інші варіанти.



- |                                |   |
|--------------------------------|---|
| 1 – дільниця методичних печей; | 6 – установка охолодження прокату;                  |
| 2 – чорнова група клітей;      | 7 – моталки;  |
| 3 – теплозберігаючі екрани;    | 8 – реверсивна чорнова кліть (після реконструкції); |
| 4 – летючі ножиці;             | 9 – установка CoilBox (після реконструкції).        |
| 5 – чистова група клітей;      |   |

Рисунок 7.20 – Схема розміщення основного устаткування стану 1700 з урахуванням проекту реконструкції

Розрахунок температурного режиму прокатки враховує наступні фактори [122, 124, 127-130]:

1. Зниження температури розкату за рахунок втрат тепла випромінюванням;
2. Втрати тепла конвекцією;
3. Втрати температури при контакті металу з валками;
4. Зниження температури внаслідок втрат тепла при гідрозбиві окалини;
5. Підвищення температури розкату за рахунок енергії деформації.

В нереверсивних клітях чорнової та чистової груп сумарний час, який витрачено на втрати тепла випромінюванням та конвекцією, визначається залежністю:

$$\tau_{\Sigma} = \tau + \tau_t, \quad (7.1)$$

де  $\tau$  – час, який витрачається на прокатку розкату в кліті, с;  $\tau_t$  - час транспортування розкату між клітями чорнової групи, с.

При розрахунку чистової групи, в формулі (7.1) параметр  $\tau_t$  замінюється на  $\tau_{t1}$  – час транспортування розкату між клітями чистової групи, с.

При цьому, для чорнової групи де прокатка здійснюється послідовно в кожній кліті час, що витрачається на прокатку  $\tau$ , визначається розрахунком швидкісного режиму прокатки [57, 129].

Час транспортування розкату між клітями чорнової групи, визначається залежністю:

$$\tau_t = \frac{l_r - l}{v_r}, \quad (7.2)$$

де  $v_r$  – швидкість руху штаби по рольгангу, м/с;  $l_r$  – довжина рольгангу, м;  $l$  – довжина розкату, що транспортується, м, за умов  $l_r > l$ .

Для чистової групи, де прокатка здійснюється одночасно в кількох клітках, час, що витрачається на прокатку в кліті, розраховується по формулі:

$$\tau = \frac{l_g}{v_{roll} \times 1000}, \quad (7.3)$$

де  $l_g$  – довжина дуги контакту, мм;  $v_{roll}$  – швидкість прокатки, м/с.

Час транспортування розкату між клітями чистової групи визначається залежністю:

$$\tau_{t1} = \frac{l_r}{v_{roll}}, \quad (7.4)$$

Розрахунок втрат температури металу при змотуванні розкату на установці CoilBox можна визначити з рівняння Ю.В. Коновалова, В.В. Кисиля [129]:

$$\Delta t = k_{uk} \left( \frac{t_o + 273}{100} \right)^4 \times \tau_c / h_c, \quad (7.5)$$

де  $h_c$  – товщина рулону, мм;  $t_o$  – температура розкату, що поступає на установку CoilBox, °С;  $\tau_c$  – тривалість технологічної операції, с;  $k_{uk}$  – коефіцієнт, що встановлюється, згідно з рекомендаціями авторів, по графіку [129].

Перетворивши графік [129] на вираз, для визначення коефіцієнту  $k_{uk}$ , отримаємо наступну залежність, рис. 7.21:

$$k_{uk} = (2,0284 \ln(t_o) - 12.195) / 1000. \quad (7.6)$$

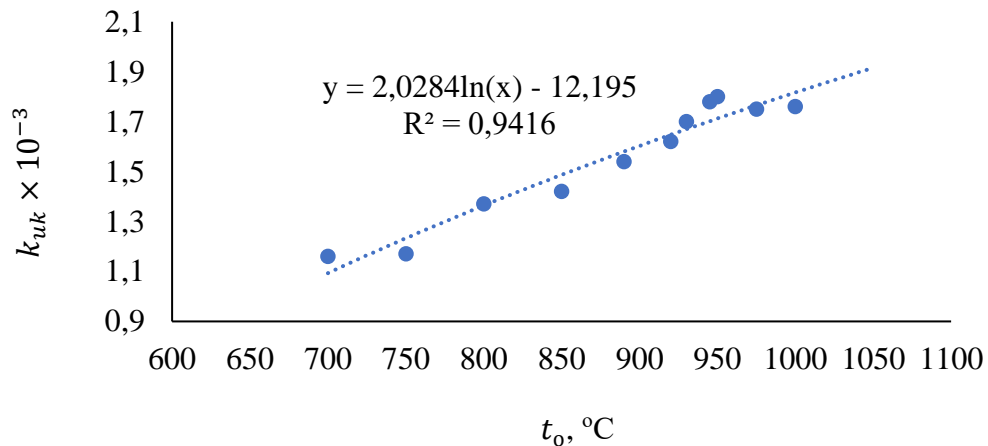


Рисунок 7.21 – Залежність коефіцієнту  $k_{uk}$  від температури розкату

З врахуванням залежності (7.6), формула для розрахунку втрат температури розкату після установки CoilBox має вигляд:

$$\Delta t_1 = \left( \frac{\left( \frac{2,0284 \ln(t_o) - 12,195}{1000} \right) \times \left( \frac{\tau_c}{h_c} \right) \times (t_o + 273)}{100^4} \right), \quad (7.7)$$

Тривалість технологічної операції змотування та розмотування рулону встановлюємо наступним чином:

$$\tau_c = \frac{L}{v_w \times 1000} + \frac{L}{v_{uw} \times 1000} + \tau_p, \quad (7.8)$$

де  $L$  – довжина розкату, мм;  $v_w$  – швидкість змотування, м/с;  $v_{uw}$  – швидкість розмотування, м/с;  $\tau_p$  – час знаходження змотаного рулону на установці, с.

Товщину рулону встановлюємо з рівняння:

$$H \times B \times L \times \rho = (\pi R^2 - \pi r^2) B \times \rho, \quad (7.9)$$

де  $H, B, L$  – товщина, ширина та довжина розкату, що змотується, мм;  $\rho$  – щільність стали,  $7,85 \text{ г/см}^3$ ;  $R$  – зовнішній радіус рулону після змотування на установці CoilBox, мм;  $r$  – внутрішній радіус рулону, що формується, згідно з характеристиками устаткування, мм.

Після перетворення рівняння (7.9) отримаємо залежність для визначення зовнішнього радіусу рулону:

$$R = \sqrt{\frac{H \times L}{\pi} + r^2}, \quad (7.10)$$

Товщина рулону, який виходить після змотування, розраховуємо:



$$h_c = \left( \sqrt{\frac{H \times L}{\pi} + r^2} - r \right) \times 1,05, \quad (7.11)$$

де 1,05 – коефіцієнт нещільності змотування.

З урахуванням залежностей (7.8) та (7.11), формула для розрахунку втрат температури розкату після установки CoilBox набуває вигляду:

$$\Delta t_1 = \left( \frac{(2,0284 \ln(t_o) - 12,195)}{1000} \right) \times \left( \frac{\frac{L}{v_w \times 1000} + \frac{L}{v_{tw} \times 1000} + \tau_p}{\left( \sqrt{\frac{H \times L}{\pi} + r^2} - r \right) \times 1,05} \right) \times (t_o + 273) / 100^4. \quad (7.12)$$

Слід зазначити, що отримана залежність враховує втрати температури металу в стаціонарному стані змотаного рулону. Для урахування додаткових втрат температури металу від неврахованих факторів (вплив товщини підкату, втрати температури на початковому етапі змотування та наприкінці розмотування, вплив ефекту «термосу» при витримці рулону в змотаному стані) виконано обробку масиву розрахункових даних компанії «Primetals», рис. 7.22.

В результаті обробки даних отримано наступну залежність для встановлення втрат температури від неврахованих факторів:

$$\Delta t_{ur} = -16,05 \ln(\tau_p) + 76,694. \quad (7.13)$$

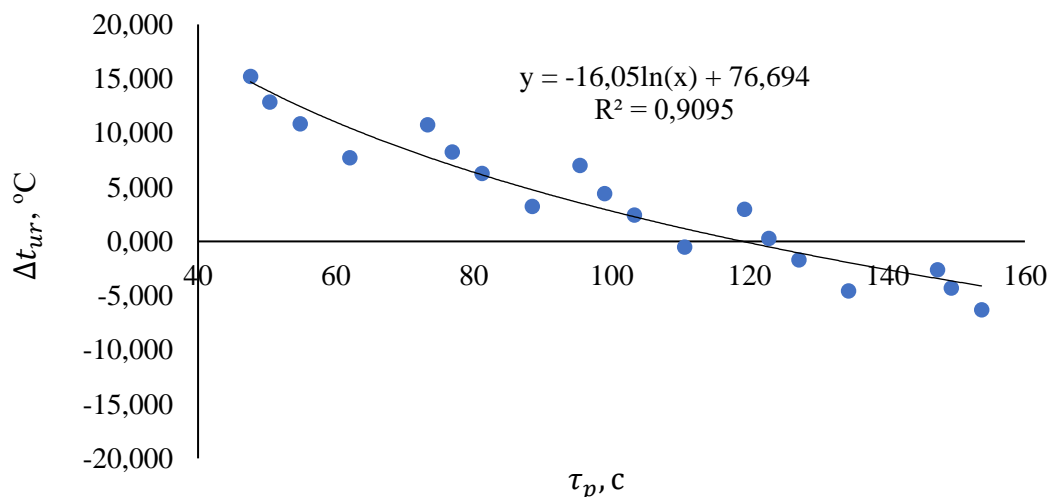


Рисунок 7.22 – Залежність втрат температури від неврахованих факторів, відображених через  $\tau_p$

Таким чином, з урахуванням залежності (7.13), сумарні втрати температури металу після установки CoilBox визначаємо як:

$$\Delta t_{\Sigma} = \Delta t_1 + \Delta t_{ur} . \quad (7.14)$$

Змінення температури металу, з початкових 1100 °С, на установці CoilBox в залежності від часу охолодження (змінення швидкості змотування/размотування) та товщини сформованого рулону  $h_c$ , при інших рівних умовах, які отримано з використанням залежності (7.14) наведено на рис. 3.7.

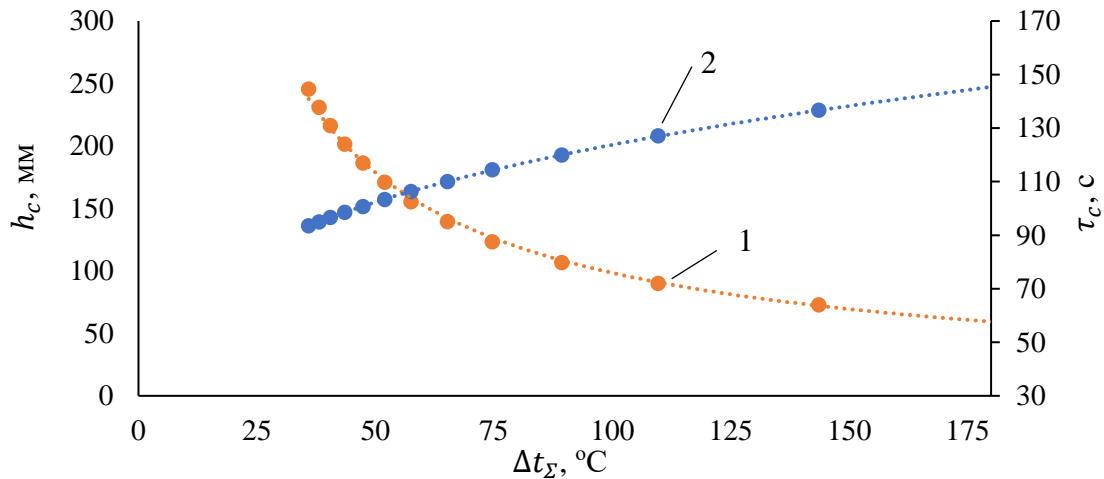


Рисунок 7.23 – Залежність втрат температури в CoilBox від товщини змотаного рулону (1), часу охолодження (2)

Отримані формули (7.12-7.14) можна застосовувати в температурному діапазоні 700-1100 °С, з часом охолодження рулону на установці від 30 с до 1000 с, для вуглецевих та мікролегованих марок сталі. Для перевірки результатів розрахунку в інших діапазонах необхідно проведення додаткових досліджень.

Перевірка залежності (7.14) виконувалась на даних отриманих авторами роботи [120]. Відхилення розрахованої температури металу на виході з CoilBox від фактичної склало від -4,2 % до -6,4 %, табл. 7.21.

Отримані відхилення можуть бути пов'язані з відсутністю інформації щодо додаткових факторів втрат та місць встановлення пірометрів для заміру температур.

Також перевірку виконано на розрахункових даних компанії «Primetals».

Відхилення температури металу на виході з CoilBox, що визначена згідно з залежністю (7.14), від розрахованих даних компанії «Primetals» склало від -0,91 % до 0,39 %. Стандартне відхилення склало 2,95 °С.

Таблиця 7.21 – Перевірка залежності для визначення втрат температури металу при змотуванні на установці CoilBox

$r^a$ , мм	$t_o$ , °C	L, мм	$v_w$ , м/с	$v_{uw}$ , м/с	$\tau_p^a$ , с	H, мм	$t_1$ (факт), °C	$h_c$ , мм	$\Delta t_{\Sigma}$ (факт), °C	$\tau_c$ , с	$\Delta t_{\Sigma}$ (розрахунок), °C	$t_1$ (розрахунок), °C	$\Delta$ , %
700	1096	64558	2,2	1,79	70	23	992	295,2	104,0	135,4	41,0	1055,0	-6,4
700	1018	243417	6,5	6,25	70	6,1	942	295,2	76,0	146,4	36,4	981,6	-4,2
700	1053	228437	6,5	6,25	70	6,5	965	295,2	88,0	141,7	38,6	1014,4	-5,1

<sup>a</sup> дані відсутні в роботі [120], прийняті по характеристиках аналогічного устаткування, встановленого на МК «Запоріжсталь».

В таблиці 3.7,  $t_1 = t_o - \Delta t_{\Sigma}$  – температура металу на виході з CoilBox, °C.

Перевірка точності розрахунку температурного режиму прокатки з урахуванням залежностей (7.1-7.4) виконано на аналітичній моделі [57], адаптованій для умов безперервного стану 1700 «ММК ІМЕНІ ІЛЛІЧА», табл. 7.22.

Таблиця 7.22 – Перевірка розрахунку температурного режиму прокатки

Параметр	Чорнова група	Чистова група			
	№ кліти				
	кліть 4а	кліть 6	кліть 7	кліть 8	кліть 9
$t_1$ (расчет), °C	1068	972	932	885	854
$t_1$ (факт), °C	1075	963	921	874	845
$\Delta$ , %	-0,66	0,89	1,19	1,21	1,1

В таблиці 7.22,  $t_1$  – температура розкату після прокатки у відповідній кліті.

Відхилення розрахованих температур прокату від фактичних в кліті 4а чорнової групи та в клітях 6-9 чистової групи, по результатах прокатки гарячекатаних рулонів розмірами 1,2×1000 мм зі сталі марки 08пс згідно з ГОСТ 9045 (аналог DC01 згідно з EN 10130), плавка №262753-3 склало від -0,66 % до 1,21 %.

Точність вдосконаленого розрахунку температурного режиму прокатки, в тому числі з використанням устаткування CoilBox, дозволяє його використовувати при проектуванні технології ТМСП.

Таким чином в даному дослідженні уточнені особливості розрахунку часу, що витрачається на втрати тепла випромінюванням та конвекцією на безперервних станах гарячої прокатки при послідовній прокатці та прокатці розкату одночасно в декількох клітках. Похибка розрахунку температурного режиму прокатки на базі фактичних даних отриманих на стані 1700 «ММК ІМЕНІ ІЛЛІЧА» склала від -0,66 % до 1,2 %.

Розроблено залежність для встановлення втрат температури розкату при змотуванні на установці CoilBox, яка враховує вплив швидкості змотування/розмотування, часу знаходження рулону на установці, а також додаткові втрати через вплив товщини підкату, температури на початковому етапі змотування і на при кінці розмотування, вплив ефекту «термосу» при витримуванні рулону у змотаному стані. Похибка запропонованої залежності перевірена на різноманітних фактичних та розрахункових даних та складає від -0,91 % / 0,39 % до -4,2 % / -6,4 %.

### **7.5 Синхронізація роботи клітей чорнової групи стану 1700 з метою збільшення ваги готових рулонів**

З метою часткового виконання вимог Замовників по збільшенню ваги гарячекатаних рулонів на проміжному етапі модернізації стану 1700 розроблено технологію та виконано промислові випробування синхронізації роботи клітей чорнової групи.

Постійне підвищення вимог споживачів та покращення якості провідними світовими виробниками металопродукцій в комплексі формує цільові показники та світовий тренд якості прокату. В даний час вимоги до металопродукції вже перевищили вимоги стандартів на їх виробництво. Так, до підвищених вимог до гарячекатаних рулонів можна віднести обмеження мінімальної ваги, наприклад, деякі переробники використовують рулони вагою від 18 т до 30 т, обмеження телескопічності, наприклад, не більше 20 мм або 10 мм, обмеження толерансу по

товщині від  $\frac{1}{2}$  до  $\frac{1}{4}$  вимог стандартів, підвищені вимоги до механічних властивостей та інші.

Актуальність впровадження технології прокатки з синхронізацією клітей для стану 1700 «ММК ІМЕНІ ІЛЛІЧА» обумовлена необхідністю збільшення ваги рулонів більшою ніж 9,0 т на проміжному етапі модернізації стану, в умовах діючого устаткування.

Метою цього дослідження є розробка технологічних рекомендації з синхронізації роботи клітей чорнової групи стану 1700 «ММК ІМЕНІ ІЛЛІЧА», що забезпечить виробництво рулонів вагою більшою ніж 9,0 т.

Схема розміщення основного устаткування стану 1700 та його характеристики наведено в розділі 1.3.2.1.

В умовах діючого стану 1700 відбувається поетапна модернізація основного устаткування. Цільовий сортамент рулонів після модернізації наведений в табл. 7.15, 7.16. На даний час вже розпочала роботу піч для нагрівання слябів довжиною до 10500 мм та встановлена моталка для рулонів вагою до 27 т, що є першим етапом модернізації. Другим етапом модернізації є заміна клітей чорнової групи на реверсивну чорнову кліть. Період часу між двома етапами становить від одного до двох років. Тож дуже важливо у цей перехідний час налагодити виробництво рулонів вагою більшою за 9 т.

Суттєвим технічним обмеженням збільшення ваги рулонів є мала відстань між клітьями 01 та 1, яка не дозволяє збільшити довжину слаба до 10500 мм. Існуючі відстані між клітьями чорнової групи наведені в таблиці 7.22.

Таблиця 7.22 – Відстань між клітьями чорнової групи стану 1700

№ кліті	01	1	2	3	4	4a
Відстань між клітьями, мм	10150	18500	22980	35420	53000	87000
Швидкість прокатування, м/с	0,84	1,27	1,35	1,74	1,74	2,9

В таблиці 7.22, відстань між клітьями є відстанню між вказаною та наступною прокатною кліттю.

Наступним обмеженням є неможливість керування швидкістю прокатки, яка є постійною по клітях, згідно з проектом (див. табл. 7.22). Таким чином в існуючих умовах збільшити вагу рулонів можливо тільки синхронізацією деформаційно-швидкісних параметрів клітей чорнової групи [272, 273].

При цьому необхідно розрахувати довжину сляба, який можна використовувати, з метою синхронізації роботи тільки двох клітей. Використання для цієї технології більшої кількості клітей обмежена їх силовими характеристиками, які не дозволяють витримати необхідний режим деформації. Загальна технологія синхронізації, що була запроваджена на «ММК ІМЕНІ ІЛЛІЧА» наведена в додатку Ц. Розрахунок режимів прокатки розкатів з синхронізацією у чорновій групі виконувався для найбільш важкого сортаменту, таблиця 7.23. Загальними умовами розрахунку було дотримання встановлених технологічних та експлуатаційних параметрів устаткування.

Таблиця 7.23 – Сортамент розкатів після чорнової групи стану 1700

Переріз розкату після чорнової групи, мм	Марка сталі	Стандарт на марку
23×1500	S355	EN 10025-2

На підставі розрахунку [46], отримали наступні показники, таблиця 7.24.

Розрахунок синхронізації виконано для кліті №01 та №1 при прокатці слябу довжиною 9320 мм. Вага готового рулону становить 15,83 т. Подальше збільшення довжини слябу призведе до необхідності синхронізації роботи клітей №2–3 та №3–4, які мають суттєву різницю у швидкостях прокатки.

Перевищення довжини розкату над довжиною міжклітьового проміжку склало 400 мм. Таким чином, розкат знаходився у двох клітях одночасно. Повної синхронізації досягти не вдалось через наближення до максимальної сили прокатки у кліті №01 (див. табл. 7.24) та перевищення природнього кута захоплення в кліті №1. Досягнута швидкість виходу розкату з кліті №01 – 0,85 м/с, а швидкість входу у кліть №1 – 0,91 м/с. Таким чином, вдалося зменшити розсинхронізацію з 0,43 м/с (див. табл. 7.22) до 0,06 м/с (див. табл. 7.24).

Таблиця 7.24 – Технологічні та експлуатаційні показники режиму синхронізації клітей чорнової групи стану 1700

№ кліті	Показники									
	Товщина <sup>a</sup> , мм	Довжина розкату <sup>b</sup> , мм	Відстань між клітями, мм	Швидкість перед кліттю, м/с	Швидкість за кліттю, м/с	Температура, °С	Розрахована сила прокатки, МН×10 <sup>-2</sup>	Максимальна сила прокатки, МН×10 <sup>-2</sup>	Розрахована необхідна потужність двигуна, кВт	Проектна потужність двигунів, кВт <sup>d</sup>
0 <sup>c</sup>	150	9320								
01	132	10550	10150	0,74	0,85	1260	672	800	1215,7	2×4000
1	95	14660	18500	0,91	1,26	1238	1400	2500	4791,4	
2	62	22470	22980	0,89	1,37	1218	1540	2500	5400,5	
3	42	33170	35420	1,21	1,79	1180	1312	2000	5123,5	
4	29	48030	53000	1,24	1,80	1132	1266	2000	4017,1	
4a	23	60560	87000	2,33	2,93	1048	1105	2000	3940,9	

<sup>a</sup> товщина після проходу; <sup>b</sup> розмір вказано у гарячому стані; <sup>c</sup> початкові дані;

<sup>d</sup> на кожній кліті встановлено по два головних двигуни

Слід зазначити, що при неповній синхронізації при прокатці розкату має місце пікове зміння навантаження на двигуни кліті №01 та №1, результати розрахунку якого наведені в таблиці 7.25.

Пікове зміння необхідної потужності двигунів для кожної кліті отримано шляхом її розрахунку при зменшенні або збільшенні обертів однієї кліті за рахунок іншої, необхідних для повної синхронізації швидкості розкату.

Таблиця 7.25 – Результати розрахунку пікового зміння необхідної потужності двигунів при неповній синхронізації

№ кліті	Розрахована необхідна потужність двигунів, кВт	Пікове зміння необхідної потужності двигунів, кВт	Проектна потужність двигунів, кВт
01	1215,7	1073,2	2×4000
1	4791,4	5266,5	

Зміння необхідної потужності двигунів кліті №01 та №1 по довжині розкату з урахуванням пікового навантаження під час знаходження розкату одночасно у двох

клітях наведено на рис. 7.24. Таким чином, при синхронізації роботи клітей за рахунок розподілу режиму обтиснення, пікове навантаження на головні двигуни клітей №01 та №1, під час знаходження розкату одночасно у двох клітях, не перевищило встановлене проектом обмеження у 8000 кВт, табл. 7.25.

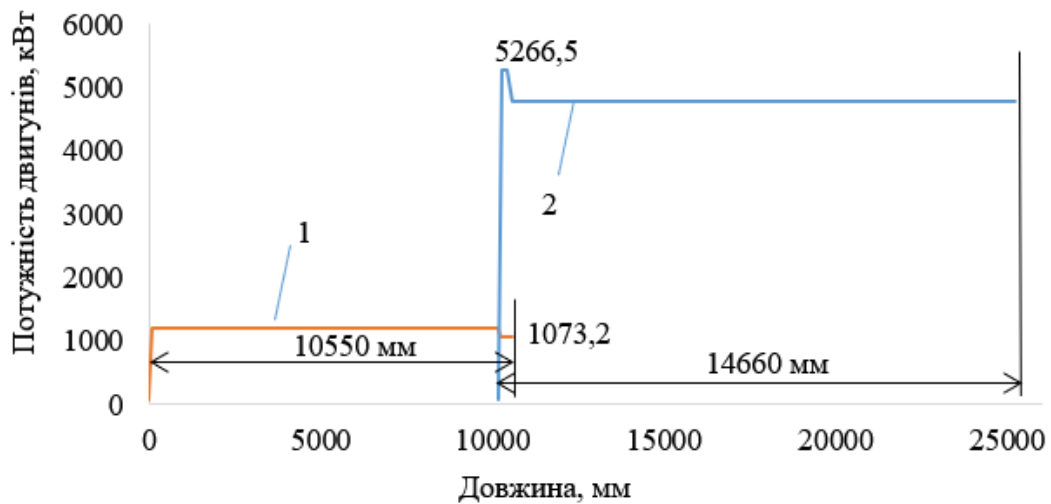


Рисунок 7.24 – Діаграма змінення потужності двигунів кліті №01 (1) та кліті № 1 (2) по довжині розкату

На підставі проведеного дослідження отримано наступні результати:

1. Підтверджена можливість впровадження технології синхронізації за рахунок розподілу режимів обтиснення у чорновій групі клітей стану 1700.

2. Розроблена технологія дозволяє збільшити вагу рулонів на проміжному етапі реконструкції стану 1700 з 9 т до 15,83 т.

3. Виконано розрахунок максимальної довжини слябу товщиною 150 мм, яка становить 9320 мм і яку можна використовувати для впровадження технології синхронізації на стані 1700. Подальше збільшення довжини слябу призведе до необхідності додаткової синхронізації роботи клітей №№2-3-4.

4. Виконано розрахунок необхідної потужності двигунів синхронізованих клітей з врахуванням навантаження під час знаходження розкату одночасно у двох клітях. Необхідна потужність двигунів не перевищила встановлене проектом обмеження у 8000 кВт.



## Висновки

1. На підставі аналізу встановлено, що додаткові вимоги до прокатної продукції перевищують встановлені нормативними документами та потребують врахування при розробці технологій.

2. Визначено, що на підставі встановлених, за допомогою комплексу методів статистичної обробки даних, зв'язків між технологічними параметрами прокатки та механічними властивостями готового ТМСП прокату, які закладено в методологію керування якістю, можливо підвищити стабільність технологічних процесів прокатки. Перевірка запропонованої методології показала зменшення стандартного відхилення границі плинності, тимчасового опору та відносного подовження на 44 %, 31 % та 46 % відповідно, від первинних даних, отриманих при прокатці сталі категорії міцності К60 на товстолистовому стані 3600, що свідчить про можливість підвищення стабільності технологічного процесу термомеханічної прокатки.

3. На підставі розрахунків, виконаних за допомогою вдосконаленої аналітичної моделі, визначено поточні технічні можливості стану 1700. Виконано розрахунок необхідного рівня технічних характеристик устаткування, яке буде змінено в ході реконструкції стану 1700 серед якого чорнова реверсивна кліть, установка CoilBox, моталка та розраховано його мінімально необхідні технічні характеристики для забезпечення виробництва термомеханічного прокату з категорією міцності до Х70.

4. Обґрунтовано, з метою розширення сортаменту стану 1680 МК «Запоріжсталь» та освоєння технології термомеханічної прокатки, можливість використання безперервнолитих слябів виробництва «ММК ІМЕНІ ІЛЛІЧА»

5. З метою виконання розрахунків температурних режимів прокатки на безперервних станах з різноманітним комплексом основного устаткування уточнені особливості розрахунку часу, що витрачається на втрати тепла випромінюванням та конвекцією на безперервних станах гарячої прокатки при послідовній прокатці та прокатці розкату одночасно в декількох клітях. Похибка розрахунку температурного режиму прокатки на базі фактичних даних по стану 1700 «ММК ІМЕНІ ІЛЛІЧА» склала від -0,66 % до 1,2 %. Розроблено залежність для встановлення втрат

температури розкату при змотуванні на установці CoilBox, яка враховує вплив швидкості змотування/розмотування, часу знаходження рулону на установці, а також додаткові втрати через вплив товщини підкату, вплив температури на початковому етапі змотування і на при кінці розмотування, вплив ефекту «термосу» при витримуванні рулону у змотаному стані. Похибка запропонованої залежності перевірена на різноманітних фактичних та розрахункових даних та склала від -0,91 % / 0,39 % до -4,2 % / -6,4 %.

6. На підставі аналізу температурно-деформаційних та швидкісних параметрів прокатки, виконаних за допомогою аналітичної моделі та з урахуванням уточненого розрахунку теплових втрат, на проміжному етапі модернізації стану 1700 «ММК ІМЕНІ ІЛІЧА» підтверджена можливість та впроваджена технологія синхронізації роботи клітей №01 та №1 за рахунок розподілу режимів обтиску у чорновій групі клітей стану 1700. Розроблена технологія дозволяє збільшити вагу рулонів, що виробляються методом ТМСР з 9 т до 15,83 т.

## ВИСНОВКИ

В дисертації вирішена важлива науково-практична проблема розширення сортаменту продукції з підвищеним рівнем механічних властивостей, що виготовляється на товстолистових, широкоштабових станах та станах Стеккеля на підставі розвитку наукових основ процесу термомеханічної прокатки і розробки методологій удосконалення технологій, що враховують різний конструктивний та структурний склад основного прокатного устаткування.

1. На підставі проведеного аналізу літературних джерел встановлено, що процес термомеханічної прокатки дозволяє підвищити механічні показники міцності, пластичності, покращити зварюваність і зменшити енерговитрати на виробництво. Однак, на даний момент існує ряд проблем, що стримують його широке впровадження, серед яких невизначеність розподілу температур у прокаті, ефекту впливу деформації на чорновій стадії прокатки на властивості металу, що успадковуються, вирішення яких можливе через поглиблене вивчення умов теплообміну та уточнення градієнту температур по ширині розкату, встановлення зв'язків між розміром зерна аустеніту ( $a$ , відповідно, і між опором деформації) від значень температури та обтиснення в процесі прокатки.

2. Уточнені закономірності розподілу температур при охолодженні підкату після пічних моталок або пристроїв міжклітьового перемотування шляхом скінченно-різницевого розв'язання задачі теплообміну, що уточнює вплив конвекційної складової в загальному тепловому балансі для умов термомеханічного процесу прокатки. Доведено необхідність врахування впливу конвекційного теплового потоку при зниженні температури підкату з 1100 °C до 800 °C, складова якого в загальному тепловому балансі на крайці підкату збільшується з 1 % до 93 %. Для стану Стеккеля встановлено, що впродовж кожного етапу нагрівання в пічних моталках та охолодження перед прокаткою в діапазоні температур 830-790 °C різниця між температурами центральної частини та крайки штаби збільшується відповідно з 8 °C до 44 °C перед останнім проходом, що перевищує рекомендований для технології

ТМСР перепад у 25 °С. Запропоновано технічне рішення, яке полягає у корегуванні режимів роботи пальників пічних моталок.

3. Встановлено, що ступінь деформацій при чорновій прокатці має суттєвий вплив на розмір зерна аустеніту, якій визначає такі успадковані механічні властивості, як границя плинності, тимчасовий опір, енергія удару, доля в'язкої складової. Зокрема встановлено, що найбільш інтенсивне зменшення розміру зерна аустеніту (з 51 мкм до 38 мкм, тобто на 50 % в загально дослідженому діапазоні) сталей категорії міцності Х65 при температурі 1050 °С, яка передує температурі початку гальмування рекристалізації, відбувається при обтисненні від 10 % до 20 %. Подальше збільшення обтиснень з 20 % до 70 % є менш ефективним, через зменшення зерна аустеніту лише з 38 мкм до 25 мкм. Встановлено, що з метою отримання якомога більш дрібного розміру зерна аустеніту при чорновій прокатці мікролегованих марок сталей категорії міцності Х65 та подальшого успадкованого зерна фериту ступінь деформації за прохід повинен бути  $\geq 20$  %, на відміну від відомих результатів, в яких достатнім вважався рівень обтиснень у 10 %.

4. Встановлено на основі результатів лабораторних та теоретичних досліджень, що реологічні властивості сплаву 0Х18МФТ та сталей марок 15Х25Т, DD11, 65Г, Х80, Х70, Ст3сп при температурі деформації 1200-1000 °С, швидкості деформації  $u = 1 \text{ c}^{-1}$  та ступеню деформації 0,1-0,54 відн. од. наближені до реологічних властивостей свинцю марки ССу при температурі 20 °С, що обґрунтовано дозволяє його використовувати як основний модельний матеріал для фізичного моделювання процесів гарячої прокатки вказаних матеріалів. На підставі розрахункових поліноміальних моделей отримано коефіцієнти пропорційності  $n_i$  та коефіцієнти зміни істинного опору деформації  $K_\sigma$ , які дозволяють розраховувати опір деформації сплаву 0Х18МФТ та сталей марок 15Х25Т, DD11, 65Г, Х80, Х70, Ст3сп використовуючи моделі реологічних кривих свинцю марки ССу. Отримані залежності перевірено на фактичних даних силових режимів за результатами чорнової прокатки товстих листів зі сталі категорії міцності Х70 на стані 3600

«МК «АЗОВСТАЛЬ», при цьому середня похибка для сили прокатки становить 11,6 %, що підтвердило можливість використання отриманих результатів.

5. Визначено, що комбінування температурно-деформаційних умов дозволяє підвищити рівномірність розподілу деформації по товщині підкату. Встановлено методом скінченно-елементного моделювання, що підвищення рівномірності деформації по товщині підкату при чорновій прокатці конструкційних марок сталі типу S355 досягається при ступенях деформації 14-20 %, що забезпечує підвищення рівномірності розподілу успадкованих механічних властивостей по товщині. Запропоновано коефіцієнт  $K_{нд}$  для оцінки рівномірності деформації по товщині прокату, який розраховують як відношення мінімального до максимального значення еквівалентної деформації (інтенсивності деформації). Встановлено, що при обтисненнях 14-20 %, температурі  $\leq 1150$  °C та показнику осередку деформації  $l_d/h_{cp} \geq 0,83$  значення коефіцієнту  $K_{нд}$  становить 0,70-0,92 (70-92 %). Визначено, що обтиснення  $\geq 20$  % дозволяє досягти значення коефіцієнту  $K_{нд}$  на рівні 0,92 (92 %), що забезпечує найкращу рівномірність деформації в дослідженому діапазоні. Отримані результати дозволяють підвищити рівномірність розподілу механічних властивостей в готовому прокаті.

6. На підставі результатів дослідження температурно-деформаційних та швидкісних режимів прокатки, виконаних за допомогою аналітичної моделі, підтверджено технічну можливість виробництва відносно тонкого прокату розмірами  $4 \times 3125 \times 16000$  мм за технологією гарячої, нормалізувальної та термомеханічної прокатки на товстолистовому стані 3200 заводу Tramet (Італія) зі слябу товщиною 220 мм замість слябу 150 мм. При розробці технології враховано скорочення часу пауз між проходами, що дозволило зберегти температуру розкату по проходах та температуру кінця прокатки не нижче 820 °C та, відповідно, отримати силові характеристики прокатки у встановлених обмеженнях.

Підтверджено шляхом промислового експерименту можливість впровадження технології термомеханічної прокатки товстого листа для суднобудування зі сталі марки EN36 згідно з Правилами Bureau Veritas на стані 3600 «МК «АЗОВСТАЛЬ» на

підставі урахування результатів досліджень впливу температурно-деформаційних умов прокатки на формування успадкованих механічних властивостей прокату. Встановлено, що при застосуванні термомеханічної прокатки отримано більш високі механічні властивості (для границі плинності на 40 МПа, для тимчасового опору на 37 МПа), ніж при прокатці з термічною обробкою нормалізацією.

7. Отримано закономірності для розрахунку часу, який витрачається на втрати тепла випромінюванням та конвекцією в умовах прокатки на стані Стеккеля, і залежність, яка дозволяє визначати зміну температури металу в пічній моталці та додатково враховує усереднену теплоємність вуглецевих та низьколегованих сталей, що нагріваються, радіус барабану моталки та рулону, довжину штаби і швидкість прокатки. Це дало змогу зменшити похибку розрахунків зазначеної температури металу на 11,25 % (з 9,15 % до -2,1 %). На підставі уточнення розрахунку теплових втрат та з урахуванням результатів досліджень впливу температурно-деформаційних умов прокатки на формування успадкованих механічних властивостей прокату шляхом аналітичного моделювання підтверджено можливість впровадження технології термомеханічної прокатки рулонів товщиною 12 мм зі сталі категорії міцності X65 на стані Стеккеля заводу Ferriera Valsider (Італія). Режими розроблено з урахуванням обмеженої потужності двигунів робочих клітей.

8. На підставі проведених досліджень розроблено та впроваджено на стані 1700 «ММК ІМЕНІ ІЛЛІЧА» технологію термомеханічної прокатки рулонів зі сталей марок S355MC та S460MC конструкційного сортаменту згідно зі стандартом EN 10149-2 та трубного сортаменту зі сталей марок В та X52М для подальшого виробництва електрозварних труб згідно зі стандартом API-5L. Визначено, що додаткове додавання 0,014 % Nb при виробництві сталі марки X52М та прокатки з неї штаби товщиною 8 мм дозволяє підвищити границю плинності на 40 МПа, тимчасовий опір на 20 МПа, зменшує бал смугастості мікроструктури на поверхні та в центрі на 1-2 бали відповідно, що частково дозволяє компенсувати вплив недостатньої потужності установки прискореного охолодження на формування

механічних властивостей. Очікуваний економічний ефект від виробництва нового сортаменту складає 1,75 млн. грн/рік.

9. Для виконання проектних розрахунків при реконструкції стану 1700 «ММК ІМЕНІ ІЛЛІЧА» з метою визначення необхідного рівня технічних характеристик нового устаткування розроблено залежність для встановлення втрат температури розкату при змотуванні на установці CoilBox, яка враховує вплив швидкості змотування/розмотування та часу знаходження рулону на установці. Крім того враховуються додаткові втрати, пов'язані з впливом товщини підкату, температури на початковому етапі змотування і наприкінці розмотування, ефекту «термосу» при витримуванні рулону у змотаному стані. На основі перелічених факторів вдосконалено аналітичну модель для розрахунку параметрів термомеханічної прокатки на широкоштабових станах. Встановлено, що похибка запропонованої моделі розрахунку втрат температури металу у CoilBox у порівнянні з фактичними значеннями температур склала від -4,2 % до -6,4 %, що підтвердило можливість її використання. Уточнені необхідні технічні характеристики у проекті реконструкції стану 1700, який прийнято до реалізації на комбінаті «ММК ІМЕНІ ІЛЛІЧА». Очікуваний економічний ефект від реконструкції стану 1700 складає 2,90 млн. грн/рік.

Методики і результати теоретичних та експериментальних досліджень використані в навчальному процесі та в науково-дослідних роботах ДВНЗ «ПДТУ».

## СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. “Steel Statistical Yearbook 2019, 2020. World Steel Association”, available at: <https://www.worldsteel.org/steel-by-topic/statistics/steel-statistical-yearbook.html>
2. Kukhar, Volodymyr., Yelistratova, Nelly., Burko, Vadym., Nizhelska, Yulia., Aksionova, Olga. (2018), “Estimation of Occupation Safety Risks at Energetic Sector of Iron and Steel Works”, *International Journal of Engineering & Technology (UAE)*, Vol. 7 (2.23), pp. 216-220. DOI: <https://doi.org/10.14419/ijet.v7i2.23.11922>
3. Militzer, M. (2014), “Thermomechanical Processed Steels Reference Module in Materials Science and Materials Engineering Comprehensive”, *Materials Processing*, Vol. 1, pp. 191-216. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-096532-1.00115-1>
4. Zinchenko, Yu.A., Kurpe, A.G., Bagmet, O.A. (2008), “Prospects of the technology used to make skelp at the Azovstal metallurgical combine”, *Metallurgist*, Vol. 52, №. 7-8, pp. 461-463. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11015-008-9065-4>
5. LI, Hai-jun., LI, Zhen-lei., YUAN, Guo., WANG, Zhao-dong., WANG, Guo-dong. (2013), “Development of New Generation Cooling Control System After Rolling in Hot Rolled Strip Based on UFC”, *Journal of Iron and Steel Research International*, № 20(7), pp. 29-34.
6. LIU, En-yang., ZHANG, Dian-hua., SUN, Jie., PENG, Liang-gui., GAO, Bai-hong., SU, Li-tao. (2012), “Algorithm Design and Application of Laminar Cooling Feedback Control in Hot Strip Mill”, *Journal of Iron and Steel Research International*, № 19(4), pp. 39-42. DOI: [https://doi.org/10.1016/S1006-706X\(12\)60085-5](https://doi.org/10.1016/S1006-706X(12)60085-5)
7. Kukhar, Volodymyr., Prysiashnyi, Andrii., Balalayeva, Elena., Anishchenko, Oleksandr. (2017), “Designing of induction heaters for the edges of pre-rolled wide ultrafine sheets and strips correlated with the chilling end-effect”, *Modern Electrical and Energy System MEES'2017*. IEEE. Kremenichuk, Ukraine: Kremenichuk Mykhailo Ostrohradskyi National University, pp. 404-407. DOI: <https://doi.org/10.1109/MEES.2017.8248945>



8. Malcolm, Gray. (1974), “Technology of microalloyed steel for large diameter pipe”, *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, Vol. 2, pp. 95-122. DOI: [https://doi.org/10.1016/0308-0161\(74\)90019-2](https://doi.org/10.1016/0308-0161(74)90019-2)

9. Курпе, А.Г., Негрий, С.Д. (2014), “Оптимизация параметров прокатки полос в черновой группе ЛПЦ-1700”, *Университетская наука – 2014: тез. докл. Междунар. науч.-техн. конф., ПГТУ, Мариуполь, т. 1*, сс. 158-159.

10. Курпе, А.Г., Негрий, С.Д., Изотов, Б.В., Васильченко, С.Е. (2015), “Расширение транзитного сортамента горячекатаных рулонов в ЛПЦ-1700”, *Университетская наука – 2015: тез. докл. Междунар. науч.-техн. конф., ПГТУ, Мариуполь*, сс. 126-127.

11. Курпе, А.Г., Негрий, С.Д., Чабан, В.В., Изотов, Б.В., Лаштун, А.И., Коткова, Е.Ю., Кшевицкая, Т.С., Литовчук, В.В., Шаламов, Ю.Н. (2015), “Освоение технологии нагрева слябов толщиной 250 мм в нагревательных колодцах ЛПЦ-1700”, *Университетская наука – 2015: тез. докл. Междунар. науч.-техн. конф., ПГТУ, Мариуполь*, сс. 175-176.

12. Шаламов, Ю.Н., Курпе, А.Г., Изотов, Б.В., Лаштун, А.И., Литовчук, В.В., Васильченко, С.Е., Негрий, С.Д., Медведев, В.В (2017), “Освоение и развитие технологии нагрева непрерывнолитых слябов толщиной 250 мм в теплотехнических агрегатах ЛПЦ-1700 ЧАО «ММК им. Ильича»”, *Университетская наука – 2017: тез. докл. Междунар. науч.-техн. конф., ПГТУ, Мариуполь, т. 1*, сс. 213-214.

13. Шаламов, Ю.Н., Курпе, А.Г., Изотов, Б.В., Лаштун, А.И., Коткова, Е.Ю., Негрий, С.Д. (2017), “Разработка модели нормирования расхода топлива, функционирующей в рамках системы энергетического менеджмента ISO 50001:2011, на примере методических печей ЛПЦ-1700 ЧАО «ММК им. Ильича»”, *Университетская наука – 2017: тез. докл. Междунар. науч.-техн. конф., ПГТУ, Мариуполь, т. 1*, сс. 214-215.

14. Курпе, О.Г., Кухар, В.В., Глєбова, Ю.М., Березка, В.В. (2018), “Розрахунок втрат температури розкату на безперервних листових станах гарячої прокатки при

використанні установки COILBOX”, *Университетская наука – 2018: тез. докл. Междунар. науч.-техн. конф., ГВУЗ «ЛГТУ», Мариуполь, т. 1*, сс. 114-115.

15. Зінченко, Ю.А., Пісмарьов, К.Є., Курпе, О.Г., Бердник, В.П., Ізотов, Б.В., Лаштун, А.І., Кшевицька, Т.С., Негрій, С.Д., Чабан, В.В. (2016), “Кришка рекуперативного нагрівального колодязя”, *пат. 109260 Україна: МПК C21D 9/70, № и 2015 12829; заявл. 25.12.2015; опубл. 25.08.2016*, Бюл. № 16. (патент на корисну модель).

16. Зінченко, Ю.А., Пісмарьов, К.Є., Курпе, О.Г., Мурашкін, О.В., Васильченко, С.Є., Горбачов, І.А., Чаленко, О.Г., Бердник, В.П., Ізотов, Б.В., Лаштун, А.І., Негрій, С.Д., Кочура, О.О. (2016), “Спосіб редукування безперервнолитих заготовок”, *пат. 109976 Україна: МПК B21B 1/02, № и 2016 00859; заявл. 08.02.2016; опубл. 26.09.2016*, Бюл. № 18. (патент на корисну модель).

17. Зінченко, Ю.А., Пісмарьов, К.Є., Курпе, О.Г., Негрій, С.Д., Медведєв, В.В., Ізотов, Б.В., Лаштун, А.І., Коткова, О.Ю. (2017), “Методична штовхальна піч”, *пат. 113959 Україна: МПК F27B 9/00, F27B 9/10, F27B 9/20, F27B 9/22, F27B 9/28, № и 2016 08057; заявл. 20.07.2016; опубл. 27.02.2017*, Бюл. № 04. (патент на корисну модель).

18. Yunbo, Xu., Yongmei, Yu., Xianghua, Liu., Guodong, Wang. (2008), “Modeling of microstructure evolution and mechanical properties during hot-strip rolling of Nb steels”, *Journal of University of Science and Technology*, Beijing, Vol. 15, pp. 396-401. DOI: [https://doi.org/10.1016/S1005-8850\(08\)60075-4](https://doi.org/10.1016/S1005-8850(08)60075-4)

19. Korczak, P., Dyja, H. (2001), “Investigation of microstructure prediction during experimental thermo-mechanical plate rolling”, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 109, pp. 112-119. PII: S 0924-0136(00)00784-6

20. Xiangwei, Kong., Liangyun, Lan. (2014), “Optimization of mechanical properties of low carbon bainitic steel using TMCP and accelerated cooling”, *Procedia Engineering*. Nagoya Congress Center, Nagoya, Japan, Vol. 81, pp. 114-119. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2014.09.136>

21. Sir Harshad Bhadeshia. (2017), “Thermomechanical Treatment of Steels”, *Microstructure and Properties* (Fourth edition), pp. 271-301. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100270-4.00010-X>
22. Carretero Olalla, V., Bliznuk, V., Sanchez, N., Thibaux, P., Kestens, L.A.I., Petrov, R.H. (2014), “Analysis of the strengthening mechanisms in pipeline steels as a function of the hot rolling parameters” *Materials Science & Engineering: A*, Vol. 604, pp. 46–56. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.msea.2014.02.066>
23. Zhao, J., Hu, W., Wang, X., Kang, J., Cao, Y., Yuan, G., Di, H., Misra, R.D.K. (2016), “A Novel thermo-mechanical controlled processing for large-thickness microalloyed 560 MPa (X80) pipeline strip under ultra-fast cooling”, *Materials Science & Engineering: A*, Vol. 673, pp. 373-377. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.msea.2016.07.089>
24. Zhao, J., Hu, W., Wang, X., Kang, J., Yuan, G., Di H., Misra, R.D.K. (2016), “Effect of microstructure on the crack propagation behavior of microalloyed 560 MPa (X80) strip during ultra-fast cooling”, *Materials Science & Engineering: A*, Vol. 666, pp. 214-224. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.msea.2016.04.073>
25. TAN, Wen., LIU, Zhen-yu., WU, Di., WANG, Guo-dong. (2009), “Artificial Neural Network Modeling of Microstructure During C-Mn and HSLA Plate Rolling”, *Journal of Iron and Steel Research International*, 16(2), pp. 80-83. DOI: [https://doi.org/10.1016/S1006-706X\(09\)60032-7](https://doi.org/10.1016/S1006-706X(09)60032-7)
26. DONG, Rui-feng., SUN, Li-gang., LIU, Zhe., WANG, Xue-lian., LIU, Qing-you. (2008), “Microstructures and Properties of X60 Grade Pipeline Strip Steel in CSP Plant”, *Journal of Iron and Steel Research International*, pp. 71-75. DOI: [https://doi.org/10.1016/S1006-706X\(08\)60035-7](https://doi.org/10.1016/S1006-706X(08)60035-7)
27. Gervasyev, Alexey., Carretero Olalla, Victor., Sidor, Jurij., Sanchez Mouriño, Nuria., Kestens Leo, A.I., Petrov, Roumen H. (2016) “An approach to microstructure quantification in terms of impact properties of HSLA pipeline steels”, *Materials Science & Engineering: A*, Vol. 677, pp. 163-170. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.msea.2016.09.043>
28. Багмет, О.А. (2007), *Формирование оптимальных структур и свойств при проведении контролируемой прокатки трубных сталей, содержащих ниобий:*

*автореф. дис. на соискание учен. степени к-та т. наук: 05.16.01, ЦНИИЧермет им. И.П. Бардина, Москва, 23 с.*

29. Лівшиц, Д.А., Зінченко, Ю.А., Шахпазов, Є.Х., Матросов, Ю.І., Ганошенко, І.В., Гоман, С.В., Шалімов, С.Я., Кумуржи, Є.В., Володарський, В.В., Лоскутов, О.Ю., Койфман, О.А., Курпе, О.Г. (2012), “Спосіб виробництва сталевих високоміцних електрозварних одношовних труб великого діаметра для магістральних трубопроводів”, *пат. 98214 Україна: МПК (2012.01), В21С 37/08 (2006.01) В21В 1/32 (2006.01) С22С 38/00 С21D 8/02 (2006.01) С21D 8/10 (2006.01) В23К 9/025 (2006.01), № а 2010 11473; заявл. 27.09.2010; опубл. 25.04.2012, Бюл. № 8. (патент на винахід).*

30. Лівшиц, Д.А., Зінченко, Ю.А., Шахпазов, Є.Х., Матросов, Ю.І., Ганошенко, І.В., Гоман, С.В., Шалімов, С.Я., Кумуржи, Є.В., Володарський, В.В., Лоскутов, О.Ю., Койфман, О.А., Курпе, О.Г. (2011), “Спосіб виробництва сталевих високоміцних електрозварних двошовних труб великого діаметра для магістральних трубопроводів”, *пат. 96097 Україна: МПК (2011.01), В21С 37/08 (2006.01) С22С 38/00 С21D 1/00 В21В 1/22 (2006.01) В23К 9/00, № а201011469; завл. 27.09.2010; опубл. 26.09.2011, Бюл. № 18. (патент на винахід).*

31. Sumit, Ghosh., Suhrit, Mula. (2015), “Thermomechanical processing of low carbon Nb–Ti stabilized microalloyed steel: microstructure and mechanical properties”, *Materials Science and Engineering, Vol. 646, pp. 218-233. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.msea.2015.08.072>*

32. Курпе, А.Г., Горлаков, А.Б. (2010), “Перспективные требования к сталям и листовому прокату для изготовления труб магистральных газонефтепроводов и их реализация в условиях ОАО «МК «Азовсталь»”, *Университетская наука – 2010: тез. докл. Междунар. науч.-техн. конф., ПГТУ, Мариуполь, т. 1, сс. 159-160.*

33. Курпе, О.Г., Кухар, В.В., Шибаніц, О.М. (2018), “Виробництво дослідної партії та оцінка якості рулонів з марки сталі S355MC на стані 1700 ПРАТ «ММК ІМЕНІ ІЛІЧА»”, *Машини і пластична деформація металу: тез. IV Междунар. науч.-техн. конф., Дніпровський державний технічний університет НТУ «Дніпровська політехніка», Кам'янське, Дніпро, сс. 22-23.*

34. Kurpe, O., Kukhar, V., Shebanitc, O. (2018), “Development of pilot batch and grade estimation of coils of steel grade S355MC at rolling mill "1700", PJSC "ILYICH IRON AND STEEL WORKS", *Physical & Chemical Geotechnologies – 2018: Materials of the International Scientific & Practical Conference (Program of report) = Фізико-хімічні геотехнології – 2018: Матеріали міжнар. наук.-практ. конф. (програма виступів)*, м. Дніпро, 10-11 жовтня 2018 р. / ред. кол.: Р.О. Дичковський, О.М. Шашенко, П.Б. Саїк, В.Г. Лозинський, НТУ «Дніпровська політехніка», Дніпро, сс. 107-109.

35. Курпе, О.Г., Кухар, В.В., Шебаніц, О.М. (2018), “Виробництво дослідної партії та оцінка якості рулонів з марки сталі S355MC на стані 1700 ПРАТ «ММК ІМЕНІ ІЛЛІЧА»”, *Збірник наукових праць Дніпровського державного технічного університету (технічні науки), Тематичний випуск Машина І Пластична Деформація Металу*, Кам’янське, сс. 36-44.

36. Курпе, О.Г., Кухар, В.В. (2018), “Освоєння виробництва гарячекатаних рулонів зі сталі марки S460MC на широкосмуговому стані 1700”, *Проблеми трибології = Problems of Tribology*, Хмельницький, № 3, сс. 61-69.

37. Javaheria, Vahid., Khodaieb, Nasseh., Kaijalainen, Antti., Portera, David. (2018), “Effect of niobium and phase transformation temperature on the microstructure and texture of a novel 0.40% C thermomechanically processed steel”, *Materials Characterization*, Vol. 142, pp. 295-308. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matchar.2018.05.056>

38. Bright, G.W., Kennedy, J.I., Robinson, F., Evans, M., Whittaker, M.T., Sullivan, J., Gao, Y. (2011), “Variability in the mechanical properties and processing conditions of a High Strength Low Alloy steel”, *Procedia Engineering*, Vol. 10, pp. 106-111. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2011.04.020>

39. TAN, Wen., HAN, Bin., WANG, Shui-ze., YANG, Yi., ZHANG, Chao., ZHANG, Yong-kun. (2012), “Effects of TMCP Parameters on Microstructure and Mechanical Properties of Hot Rolled Economical Dual Phase Steel in CSP”, *Journal of Iron and Steel Research International*, 19(6), pp. 37-41. DOI: [https://doi.org/10.1016/S1006-706X\(12\)60124-1](https://doi.org/10.1016/S1006-706X(12)60124-1)

40. Tang, S., Liu, Z.Y., Wang, G.D., Misra, R.D.K. (2013), “Microstructural evolution and mechanical properties of high strength microalloyed steels: Ultra Fast Cooling (UFC) versus Accelerated Cooling (ACC)”, *Materials Science & Engineering: A*, Vol. 580, pp. 257-265. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.msea.2013.05.016>

41. Kurpe, O., Kukhar, V., Klimov, E., Prysiashnyi, A. (2018), “Thermomechanical Controlled Rolling of Hot Coils of Steel Grade S355MC at the Wide-Strip Rolling Mill 1700”, *Materials Properties and Technologies of Processing, Solid State Phenomena*, Vol. 291, pp. 63-71. DOI: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/SSP.291.63>

42. Kurpe, O., Kukhar, V. (2018), “Mastering high-strength shipbuilding steel plate production using thermo-mechanical controlled process (TMCP) at the rolling mill 3600”, *Engineering sciences: Development prospects in countries of Europe at the beginning of the third Millennium: Collective monograph*, Stalowa Wola, Poland, Vol. 1, pp. 281-298. ISBN 978-9934-571-63-3

43. Зінченко, Ю.А., Пісмарьов, К.Е., Курпе, О.Г., Мурашкін, О.В., Васильченко, С.Є., Меркулова, Н.О., Чаленко, О.Г., Негрій, С.Д., Куліш, С.В. (2016), “Спосіб виробництва гарячекатаного прокату підвищеної міцності”, *пат. 110812 Україна: МПК В21В 1/46 (2006.01), № и 2016 03353; заявл. 31.03.2016; опубл. 25.10.2016*, Бюл. № 20. (патент на корисну модель).

44. Зінченко, Ю.А., Пісмарьов, К.Е., Курпе, О.Г., Мурашкін, О.В., Васильченко, С.Є., Меркулова, Н.О., Чаленко, О.Г., Негрій, С.Д., Куліш, С.В. (2017), “Спосіб виробництва гарячекатаного прокату підвищеної міцності”, *пат. 121374 Україна: МПК В21В 1/46 (2006.01), № и 2017 01785; заявл. 24.02.2017; опубл. 11.12.2017*, Бюл. № 23. (патент на корисну модель).

45. Максименко, О.П., Присяжний, А.Г., Кухарь, В.В., Кузьмин Е.В. (2017), “Теоретический анализ момента при прокатке с натяжением полосы”, *Обработка материалов давлением: сб. науч. тр. ДГМА, ДГМА, Краматорск, № 1 (44)*, сс. 199- 203.

46. Кухарь, В.В., Курпе, А.Г. (2018), “Уточнение методики расчета тепловых потерь металла на непрерывных станах горячей прокатки”, *Обработка материалов давлением: сб. науч. тр. ДГМА, ДГМА, Краматорск, № 1 (46)*, сс. 159-166.
47. Курпе, О.Г., Кухар, В.В., Змазнева, С.В. (2018), “Уточнення розрахунку теплових втрат металу на станах Стеккеля”, *Проблеми трибології = Problems of Tribology*, № 1, сс. 78-84.
48. Кухар, В.В., Курпе, О.Г. (2018), “Розробка технології виробництва листового прокату товщиною 4 мм на стані 3200 заводу Trametel SpA”, *Металургическая и горнорудная промышленность*, № 2, сс. 24-29.
49. Kukhar, Volodymyr., Artiukh, Viktor., Prysiazhnyi, Andrii., Pustovgar, Andrey. (2018), “Experimental Research and Method for Calculation of ‘Upsetting-with-Buckling’ Load at the Impression-Free (Dieless) Preforming of Workpiece”, *E3S Web of Conference (HRC 2017)*, Vol. 33, Art. № 02031. DOI: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20183302031>
50. Lenard, John G. (2014), *Primer on flat rolling, Second edition. Department of Mechanical and Mechatronics Engineering University of Waterloo*, Elsevier Ltd, Canada, Ontario, 404 p.
51. Коновалов, Ю.В. (2008), *Справочник прокатчика. Производство горячекатаных листов и полос: Справочное издание, В 2 т.*, «Теплотехник», Москва, Т. 1, 640 с.
52. Lenard, John G. (2007), “Mathematical and Physical Modelling of the Flat Rolling Process”, *Primer on Flat Rolling*, Elsevier Ltd, Chapter 3, pp. 36-98. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-008045319-4/50005-X>
53. Mantyla, P., Korhonen, R., Jonsson, N-G. (1992), “Improved Thickness and Shape Accuracy with Advanced Pass Scheduling in Plate Rolling”, *Journal of Materials Processing Technology*, Elsevier, Vol. 34, pp. 255-263. DOI: [https://doi.org/10.1016/0924-0136\(92\)90115-9](https://doi.org/10.1016/0924-0136(92)90115-9)
54. Yue, S. (2002), “The Mathematical Modelling of Hot Rolling of Steel”, Editor J.G. Lenard, *Metal Forming Science and Practice 9*, Published by Elsevier Science Ltd, Chapter 11, pp. 213-226. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-008044024-8/50011-4>

55. Galantuccia, L.M., Tricaricob, L. (1999), “Thermo-mechanical simulation of a rolling process with an FEM approach”, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 92-93, pp. 494-501. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0924-0136\(99\)00242-3](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(99)00242-3)

56. Hanoglu, U., Šarler, B. (2018), “Multi-pass hot-rolling simulation using a meshless method”, *Computers and Structures*, Vol. 194, pp. 1-14. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compstruc.2017.08.012>

57. Курпе, А.Г. (2006), *Моделирование технологического процесса прокатки толстых листов на стане 3600 ОАО «МК «Азовсталь»»: автореф. дис. на соискание учен. степени к-та т. наук: 05.16.05*, ГВУЗ «ПДТУ», Мариуполь, 23 с.

58. Старченко, Д.И. (1994), *Динамика продольной прокатки: Учебное пособие*, ИСИО, Киев, 400 с.

59. Капланов, В.И., Курпе, А.Г., Володарский, В.В., Сагиров, Р.И. (2007), “Анализ математической модели технологического процесса прокатки на стане 3600 ОАО «МК «Азовсталь»”, *Производство проката*, Наука и Технологии, Москва, № 8, сс. 12-14.

60. Курпе, О.Г, Кухар, В.В., Присяжний, А.Г. (2018), “Перевірка математичної моделі процесу прокатки на стані Стеккеля щодо умов заводу Feeriera Valsider SpA”, *Теоретичні та практичні проблеми в обробці металів тиском і якості фахової освіти*, Матеріали 9 міжнародної технічної конференції, «Київський політехнічний інститут», сс. 152-156.

61. Курпе, А.Г, Кухар, В.В., Березка, В.В. (2018), “Уточненная методика расчета изменения температуры раската при прокатке на стане Стеккеля”, *Сучасні технології в механіці: збірник наукових праць / Укл. Скиба М.Є., Олександренко В.П., ФОП Мельник А.А., Хмельницький*, с. 11-13.

62. Курпе, О.Г, Кухар, В.В. (2019), “Математична модель зміни температурного поля смуги перед прокаткою на стані Стеккеля”, *Перспективи розвитку машинобудування та транспорту: тези I Міжнар. наук.-техн. конф., ВНТУ, Вінниця*, сс. 88-89.



63. Курпе, О.Г., Кухар, В.В. (2019), “Оцінка впливу конвекційного теплообміну в розрахунках зміни температурного поля смуги при термомеханічній прокатці”, *Теоретичні та практичні проблеми в обробці матеріалів тиском і якості фахової освіти: тези X Міжнар. наук.-техн. конф. КПІ ім. Ігоря Сікорського, Херсонський національний технічний університет, Київ-Херсон*, сс. 65-66.

64. Курпе, О.Г., Кухар, В.В. (2019), “Математичне моделювання зміни температурного поля смуги на стані Стеккеля”, *Ресурсозбереження та енергоефективність процесів і обладнання обробки тиском у машинобудуванні та металургії: Матеріали XI Міжнар. наук.-техн. конф. Харків*, сс. 88-89.

65. Kurpe, O.H., Kukhar, V.V., Klimov, E.S., Chernenko, S.M. (2020), “Improvement of Process Parameters Calculation for Coil Rolling at the Steckel Mill”, *Materials Science and Metallurgical Technology II. Materials Science Forum*, Vol. 989, pp. 609-614. DOI: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.989.609>

66. Курпе, О.Г., Кухар, В.В., Присяжний, А.Г. (2018), “Перевірка математичної моделі технологічного процесу прокатки на стані Стеккеля заводу Ferriera Valsider SpA”, *Mechanics and Advanced Technologies*, № 3 (84), сс. 98-105.

67. Курпе, О.Г., Кухар, В.В. (2019), “Вдосконалення математичної моделі зміни температурного поля смуги перед термомеханічною прокаткою на стані Стеккеля”, *Вісник НТУ «ХПІ». Сер. Інноваційні технології та обладнання обробки матеріалів у машинобудуванні та металургії*, № 11 (1336), сс. 31-35.

68. Radionova, L.V., Chernyshev, A.D., Lisovskiy, R.A. (2017), “Interactive Educational System –Virtual Simulator "Sheet Rolling", *International Conference on Industrial Engineering, ICIE, South Ural State University, The Russian Federation*, pp. 512- 518. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.10.509>

69. Duk, Man Lee. (2004), “Applications to improve rolling force prediction ability in a plate mill. Automation in Mining”, *Mineral and Metal Processing*, Nancy, France, pp. 65-70. DOI: [https://doi.org/10.1016/S1474-6670\(17\)31001-7](https://doi.org/10.1016/S1474-6670(17)31001-7)

70. Yuen, W.Y.D., Dixon, A., Nguyen, D.N. (1996), “The modelling of the mechanics of deformation in fiat rolling”, *Journal of Materials Processing Technology*, №60, pp. 87- 94. DOI: [https://doi.org/10.1016/0924-0136\(96\)02312-6](https://doi.org/10.1016/0924-0136(96)02312-6)
71. ZHANG, Jin-ling., CUI, Zhen-shan. (2011), “Prediction of Velocity and Deformation Fields During Multipass Plate Hot Rolling by Novel Mixed Analytical-Numerical Method”, *Journal of Iron and Steel Research International*, № 18(7), pp. 20-27. DOI: [https://doi.org/10.1016/S1006-706X\(11\)60085-X](https://doi.org/10.1016/S1006-706X(11)60085-X)
72. Matruprasad, Rout., Surjya, K.Pal., Shiv, B.Singh. (2016), “Finite element simulation of a cross rolling process”, *Journal of Manufacturing Processes*, Vol. 24, pp. 283-292. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2016.09.012>
73. WANG, Min-ting., ZANG, Xin-liang., LI, Xue-tong., DU, Feng-shan. (2007), “Finite Element Simulation of Hot Strip Continuous Rolling Process Coupling Microstructural Evolution”, *Journal of Iron and Steel Research International*, Vol. 14(3), pp. 30-36. DOI: [https://doi.org/S1016-706X\(07\)60039-9](https://doi.org/S1016-706X(07)60039-9)
74. HU, Xian-lei., ZHAO, Zhong., WANG, Jun., WANG, Zhao-dong., LIU, Xiang-hua., WANG, Guo-dong. (2006), “Optimization of Holding Temperature and Holding Thickness for Controlled Rolling on Plate Mill”, *Journal of iron and steel research International*, № 13(3), pp. 21-25. DOI: [https://doi.org/10.1016/S1006-706X\(06\)60055-1](https://doi.org/10.1016/S1006-706X(06)60055-1)
75. QI, Xiang-dong., WANG, Tao., XIAO, Hong. (2012), “Optimization of Pass Schedule in Hot Strip Rolling”, *Journal of Iron and Steel Research International*, № 19(8), pp. 25-28. DOI: [https://doi.org/10.1016/S1006-706X\(12\)60135-6](https://doi.org/10.1016/S1006-706X(12)60135-6)
76. Collins, L.E. (2001), “Processing of Niobium-Containing Steels by Steckel Mill Rolling”, *Niobium: Science and Technology*, TMS-AIME and Niobium 2001 Limited, Bridgeville, PA, USA, pp. 527-542.
77. LI, Xue-tong., WANG, Min-ting., DU, Feng-shan. (2008), “Coupling Thermomechanical and Microstructural FE Analysis in Plate Rolling Process”, *Journal of Iron and Steel Research Internpliional*, 15(4), pp. 42-50. DIO: [https://doi.org/10.1016/S1006-706X\(08\)60142-9](https://doi.org/10.1016/S1006-706X(08)60142-9)

78. Schausberger, F., Steinboeck, A., Kugi, A. (2015), “Mathematical modeling of the contour evolution of heavy plates in hot rolling”, *Applied Mathematical Modelling*, Vol. 39, pp. 4534-4547. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apm.2015.01.017>

79. Эфрон, Л.И. (2004), “Термомеханическая прокатка как способ получения высокоэффективных высокопрочных сталей для труб большого диаметра северного назначения”, *Прогрессивные толстолистовые стали для газонефтепроводных труб большого диаметра и металлоконструкции ответственного назначения*: сб. докладов, Металлургиздат, Москва, сс. 53-56.

80. Zhuang, LI. (2009), “Effect of Thermomechanical Controlled Processing on Mechanical Properties of 490 MPa Grade Low Carbon Cold Heading Steel”, *Journal of iron and steel research International*, 16(3), pp. 43-48. DOI: [https://doi.org/10.1016/S1006-706X\(09\)60042-X](https://doi.org/10.1016/S1006-706X(09)60042-X)

81. Jingwei, Zhao., Zhengyi, Jiang. (2018), “Thermomechanical processing of advanced high strength steels”, *Progress in Materials Science*, pp. 174-242. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2018.01.006>

82. Хулка, К. (2004), “Взаимосвязь между микролегированием, обработкой и свойствами листовой трубной стали”, *Прогрессивные толстолистовые стали для газонефтепроводных труб большого диаметра и металлоконструкции ответственного назначения*: сб. докладов., Металлургиздат, Москва, сс. 43-47.

83. Курпе, А.Г., Изотов, Б.В., Лаштун, А.И., Коткова, Е.Ю., Негрий, С.Д. (2017), “Разработка и внедрение модели нормирования расхода топлива в методических печах стана 1700 в рамках функционирования системы энергетического менеджмента ISO 50001:2011”, *Металл и литье Украины*, № 1, сс. 35-42.

84. Курпе, А.Г., Васильченко, С.Е., Негрий, С.Д., Шебаниц, О.Н. (2017), “Освоение технологии термомеханической контролируемой прокатки на стане 1700”, *Металл и литье Украины*, № 1, сс. 54-56.

85. Xiangwei, Kong., Liangyun, Lan. (2014), “Optimization of mechanical properties of low carbon bainitic steel using TMCP and accelerated cooling”, *Procedia Engineering*, Vol. 81, pp. 114-119. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2014.09.136>

86. Muszka, K., Dzedzic, D., Madej, L., Majta, J., Hodgson, P.D., Palmiere, E.J. (2014), “The development of ultrafine-grained hot rolling products using advanced thermomechanical processing”, *Materials Science & Engineering: A*, Vol. 610, pp. 290- 296. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.msea.2014.05.051>
87. Mohammad, Masoumi., Cleiton, Carvalho. Silva., Hamilton, Ferreira. Gomes. de Abreu. (2016), “Effect of crystallographic orientations on the hydrogen-induced cracking resistance improvement of API 5L X70 pipeline steel under various thermomechanical processing”, *Corrosion Science*, Vol. 111, pp. 121-131. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2016.05.003>
88. Wei, Yu., Gaosheng, Li., Qingwu, Cai. (2015), “Effect of a novel gradient temperature rolling process on deformation, microstructure and mechanical properties of ultra-heavy plate”, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 217, pp. 317-326. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2014.11.011>
89. Xie, Bao-Sheng., Cai, Qing-Wu., Yun, Yang., Li, Gao-Sheng., Ning, Zhen. (2017), “Development of high strength ultra-heavy plate processed with gradient temperature rolling, intercritical quenching and tempering”, *Materials Science & Engineering: A*, Vol. 680, pp. 454-468. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.msea.2016.10.119>
90. Hua, Jun., Du, Lin-Xiu., Dong, Ying., Meng, Qing-Wang., Misra, R.D.K. (2019), “Effect of Ti variation on microstructure evolution and mechanical properties of low carbon medium Mn heavy plate steel”, *Materials Characterization*, Vol. 152, pp. 21-35. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matchar.2019.04.004>
91. Omale, J.I., Ohaeri, E.G., Szpunar, J.A., Arafin, M., Fateh, F. (2019), “Microstructure and texture evolution in warm rolled API 5L X70 pipeline steel for sour service application”, *Materials Characterization*, Vol. 147, pp. 453-463. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matchar.2018.12.003>
92. Li, X.-L., Lei, C.-S., Deng, X.-T., Wang, Z.-D., Yu, Y.-G., Wang, G.-D., Misra, R.D.K. (2016), “Precipitation strengthening in titanium microalloyed high-strength steel plates with new generation-thermomechanical controlled processing (NG-TMCP)”,

*Journal of Alloys and Compounds*, Vol. 689, pp. 542-553. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2016.08.010>

93. Masoumi, Mohammad., Herculano, Luis. Flavio. Gaspar., Hamilton, Ferreira. Gomes. de Abreu. (2015), “Study of Texture and Microstructure Evaluation of Steel API 5L X70 under Various Thermomechanical Cycles”, *Materials Science & Engineering*, Vol. 639, pp. 550-558. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.msea.2015.05.020>

94. Indrajit, Dey., Swarup, Kumar. Ghosh., Rajib, Saha. (2019), “Effects of cooling rate and strain rate on phase transformation, microstructure and mechanical behaviour of thermomechanically processed pearlitic steel”, *Journal of Materials Research and Technology*, Vol. 8, № 3, pp. 2685-2698. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2019.04.006>

95. Wang, Bingxing., Guo, Xitao., Xie, Qian., Wang, Zhaodong., Wang, Guodong. (2016), “Heat transfer characteristic research during jet impinging on top/bottom hot steel plate”, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 101, pp. 844-851. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2016.05.083>

96. Ohaeri, Enyinnaya., Szpunar, Jerzy., Fazeli, Fateh., Arafin, Muhammad. (2018), “Hydrogen induced cracking susceptibility of API 5L X70 pipeline steel in relation to microstructure and crystallographic texture developed after different thermomechanical treatments”, *Materials Characterization*, Vol. 145, pp. 142-156. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matchar.2018.08.034>

97. El-Shenawy, Eman., Reda, Reham. (2019), “Optimization of TMCP strategy for microstructure refinement and flow-productivity characteristics enhancement of low carbon steel”, *Journal of Materials Research and Technology*, Vol. 8, № 3, pp. 2819-2831. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2019.04.021>

98. Зінченко, Ю.А., Пісмарьов, К.Є., Курпе, О.Г., Годинський, О.А., Левтерова, І.А., Олійник, В.В. (2017), “Трубоелектрозварювальний стан”, *пат. 113589 Україна: МПК В21С 37/08, № и 2016 06688; заявл. 21.06.2016; опубл. 10.02.2017, Бюл. № 03. (патент на корисну модель).*

99. LAN, Liang-yun., QIU, Chun-lin., ZHAO, De-wen., GAO, Xiu-hua., DU, Lin-xiu. (2011), “Dynamic and Static Recrystallization Behavior of Low Carbon High Niobium

Microalloyed Steel”, *Journal of Iron and Steel Research International*, 18(1), pp. 55-60. DOI: [https://doi.org/10.1016/S1006-706X\(11\)60011-3](https://doi.org/10.1016/S1006-706X(11)60011-3)

100. Natarajan, V.V., Challa, V.S.A., Misra, R.D.K. (2016), “The Determining Impact of Coiling Temperature on the Microstructure and Mechanical Properties of a Titanium-Niobium Ultrahigh Strength Microalloyed Steel: Competing Effects of Precipitation and Bainite”, *Materials Science and Engineering*, Vol. 665, pp. 1-9. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.msea.2016.04.007>

101. Venkatsurya, P.K.C., Jia, Z., Misra, R.D.K., Mulholland, M.D., Manohar, M., Hartmann, Jr.J.E. (2012), “Understanding mechanical property anisotropy in high strength niobium-microalloyed linepipe steels”, *Materials Science and Engineering*, Vol. 556, pp. 194-210. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.msea.2012.06.078>

102. ZHANG, Ji-ming., SUN, Wei-hua., SUN, Hao. (2010), “Mechanical Properties and Microstructure of X120 Grade High Strength Pipeline Steel”, *Journal of Iron and Steel Research International*, 17(10), pp. 63-67. DOI: [https://doi.org/10.1016/S1006-706X\(10\)60185-9](https://doi.org/10.1016/S1006-706X(10)60185-9)

103. Wengui, Zhao., Meng, Chen., Shaohui, Chen., Jinbo, Qu. (2012), “Static strain aging behavior of an X100 pipeline steel”, *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 550, pp. 418-422. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.msea.2012.04.095>

104. Dr. Ing. Hillenbrand, Hans-Georg., Dr. Ing. Gräf, Michael., Dr. Ing. Kalwa, Christoph. (2001), “Development and production of high strength pipeline steels”, *Niobium 2001*, EUROPIPE GmbH, pp. 1-29.

105. Gräf, Michael., Schröder, Jens., Schwinn, Volker., Hulka, Klaus. (2002), “Production of Large Diameter Pipes Grade X 70 with High Toughness using Acicular Ferrite Microstructures”, *International Conference on Application and Evaluation of High Grade Linepipes in Hostile Environments*, Yokohama, Japan, pp. 1-14.

106. Omale, J.I., Ohaeri, E.G., Tiamiyu, A.A., Eskandari, M., Mostafijur, K.M., Szpunar, J.A. (2017), “Microstructure, texture evolution and mechanical properties of X70 pipeline steel after different thermomechanical treatments”, *Materials Science & Engineering: A*, Vol. 703, pp. 477-485. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.msea.2017.07.086>

107. Zhang, J.M., Huo, C.Y., Ma, Q.R., Feng, Y.R. (2018), “NbC-TiN co-precipitation behavior and mechanical properties of X90 pipeline steels by critical-temperature rolling process”, *International Journal of Pressure Vessels and Piping*. Vol. 165, pp. 29-33. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijpvp.2018.05.007>

108. Wu, J.Y., Wang, B., Wang, B.X., Misra, R.D.K., Wang, Z.D. (2018), “Toughness and ductility improvement of heavy EH47 plate with grain refinement through inter-pass cooling”, *Materials Science & Engineering: A*, Vol. 733, pp. 117-127. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.msea.2018.07.001>

109. Carretero Olalla, V., Bliznuk, V., Sanchez, N., Thibaux, P., Kestens, L.A.I., Petrov, R.H. (2014), “Analysis of the strengthening mechanisms in pipeline steels as a function of the hot rolling parameters”, *Materials Science & Engineering: A*, Vol. 604, pp. 46-56. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.msea.2014.02.066>

110. Schaupp, Thomas., Schroepfer, Dirk., Kromm, Arne., Kannengiesser, Thomas. (2017), “Welding residual stresses in 960 MPa grade QT and TMCP high-strength steels”, *Journal of Manufacturing Processes*, Vol. 27, pp. 226-232. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2017.05.006>

111. Tsay, L.W., Chern, T.S., Gau, C.Y., Yang, J.R. (1999), “Microstructures and fatigue crack growth of EH36 TMCP steel weldments”, *International Journal of Fatigue*, Vol. 21, pp. 857-864. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0142-1123\(99\)00021-3](https://doi.org/10.1016/S0142-1123(99)00021-3)

112. HUO, Xiang dong., LI, Lie jun., PENG, Zheng wu., CHEN, Song jun. (2016), “Effects of TMCP Schedule on Precipitation, Microstructure and Properties of Ti-microalloyed High Strength Steel”, *Journal of Iron and Steel Research International*, Vol. 23(6), pp. 593-601. DOI: [https://doi.org/10.1016/S1006-706X\(16\)30093-0](https://doi.org/10.1016/S1006-706X(16)30093-0)

113. Mohammad, Masoumi., Edwan, Anderson. Ariza. Echeverri., Cleiton, Carvalho. Silva., Willys, Machado. Aguiar., Hamilton, Ferreira. Gomes. de Abreud. (2019), “Improvement of formability and tensile mechanical properties of SAE 970X steel by controlled rolling process”, *Journal of Materials Research and Technology*, Vol. 8, № 1, pp. 1353-1365. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2018.06.024>

114. Zheng, Yi., Ning, Li., Shaoyuan, Li. (2013), “Hot-rolled strip laminar cooling process plant-wide temperature monitoring and control”, *Control Engineering Practice*, Vol. 21, pp. 23-30. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conengprac.2012.09.004>
115. Xie, H.B., Jiang, Z.Y., Liu, X.H., Wang, G.D., Tieu, A.K., Yang, M., Manabe, K. “Application of fuzzy control of laminar cooling for hot rolled strip”, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 187-188, pp. 715-719. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2006.11.166>
116. Imanari, Hiroyuki., Inami, Haruki. (2012), “Flexible Coiling Temperature Control System in Hot Strip Mills”, *IFAC Proceedings*, Vol. 45, № 23, pp. 187-192. DOI: <https://doi.org/10.3182/20120910-3-JP-4023.00013>
117. LI, Hai-jun., LI, Zhen-lei., YUAN, Guo., WANG, Zhao-dong., WANG, Guo-dong. (2013), “Development of New Generation Cooling Control System After Rolling in Hot Rolled Strip Based on UFC”, *Journal Of Iron And Steel Research International*, 20(7), pp. 29-34. DOI: [https://doi.org/10.1016/S1006-706X\(13\)60122-3](https://doi.org/10.1016/S1006-706X(13)60122-3)
118. Zhang, Y.T., Wang, C.Z., Li, D.Z., Li, Y.Y. (2007), “Prediction of carbon concentration and ferrite volume fraction of hot-rolled steel strip during laminar cooling”, *Acta Metall. Sin. (Engl. Lett.)*, Vol. 20, №4, pp. 251-257. DOI: [https://doi.org/10.1016/S1006-7191\(07\)60035-0](https://doi.org/10.1016/S1006-7191(07)60035-0)
119. Motomura, T., Ueda, K., Imazeki, T., Fukui, Y., Yahiro, K. (2005), “Coiler control in endless hot strip rolling”, *IFAC Proceedings*, Vol. 38, № 1, pp. 57-62. DOI: <https://doi.org/10.3182/20050703-6-CZ-1902.01688>
120. Васильев, А.А., Николаев, В.А. (2013), “Новая технология горячей прокатки широкополосной стали”, *Вестник Череповецкого государственного университета*, Череповец, Вып. 4, т. 2, сс. 5-10.
121. Peng, W., Liu, Z., Yang, X., Cao, J., Zhang, D. (2014), “Optimization of Temperature and Force Adaptation Algorithm in Hot Strip Mill”, *Journal of iron and steel research International*, № 21(3), pp. 300-305.
122. Speicher, K., Steinboeck, A., Wild, D., Kiefer, T., Kugi, A. (2013), “Estimation of plate temperatures in hotrolling based on an extended Kalman filter”, *Mineral and Metal*



*Processing*. 16th IFAC Symposium on Automation in Mining, August 25–28, 2013 y., San Diego, California, USA, pp. 409-414.

123. Sui, F., Chen, L., Liu, X., Wang, L., Li, Sin.W. (2009), “Temperature field analysis and its application in hot continuous rolling of Inconel 718 superalloy, *Acta Metall*”, *Science Direct (Engl. Lett.)*, Vol. 22, № 2, pp. 81-90.

124. Коноводов, Д.В. Мокиевец, А.В., Кузьмина, О.М. (2014), “Исследование влияния скоростных режимов смотки и размотки подката в "coilbox" на температурный перепад по длине полосы”, *Plastic deformation of metals*. сб. научн. Трудов: в 2 т, Акцент ПП, Днепропетровск, Т. 1, сс. 39-43.

125. Коноводов, Д.В., Каракаш, Е.А., Мокиевец, А.В., Панченко, В.С. (2013), “Исследование изменения температуры полосы в промежуточном перемоточном устройстве на широкополосных станах горячей прокатки”, *Обработка материалов давлением*, ISSN 2076–2151(36), № 3, сс. 160-164.

126. Kim, J., Lee, J., Hwang, S. M. (2009), “An analytical model for the prediction of strip temperatures in hot strip rolling”, *International journal of heat mass transfer*, Vol. 52, p. 1864-1874.

127. Kiuchi, (I)M., Yanagimoto, J., Wakamatsu, E. (2000), “Overall Thermal Analysis of Hot Plate/Sheet Rolling”, *Institute of Industrial Science*, The University of Tokyo, Received on January 3, 2000 y., Tokyo, Japan, pp. 209-212.

128. Moon, C.H., Lee, Y. (2012), “An approximate method for computing the temperature distribution over material thickness during hot flat rolling”, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 55, pp. 310-315.

129. Коновалов, Ю.В., Остапенко, А.Л., Пономарев, В.И. (1986), *Расчет параметров листовой прокатки: Справочник*, Металлургия, Москва, 430 с.

130. Pal, S.K., Linkens, D.A. (2002), “Temperature distribution in steel during hot rolling: pseudo-bond graph view”, *Simulation Modelling Practice and Theory*, Vol. 10, pp. 69-85.

131. Phaniraj, M.P., Behera, B.B., Lahiri, A.K. (2005), “Thermo-mechanical modeling of two phase rolling and microstructure evolution in the hot strip mill Part I.

Prediction of rolling loads and finish rolling temperature”, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 170, pp. 323-335.

132. Weisz-Patrault, Daniel. (2017), “Coupled heat conduction and multiphase change problem accounting for thermal contact resistance”, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, pp. 595-606. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2016.08.091

133. Weisz-Patrault, Daniel., Ehrlacher, Alain., Legrand, Nicolas. (2014), “Temperature and heat flux fast estimation during rolling process”, *International Journal of Thermal Sciences*, pp. 1-20. DOI: 10.1016/j.ijthermalsci.2013.07.010

134. Weisz-Patrault, Daniel. (2012), “Inverse three-dimensional method for fast evaluation of temperature and heat flux fields during rolling process”, *Symposium on Modelling of Rolling Processes*, France, pp. 20-22.

135. Кухарь, В.В., Присяжный, А.Г., Балалаева, Е.Ю., Тузенко, О.А., Курпе, А.Г., Анищенко, А.С., Кармазина, И.В. (2018), *Управление тепловым состоянием тонколистового проката для повышения равномерности распределения механических свойств*, ПГТУ, Мариуполь, 144 с. ISBN 978-966-604-243-2.

136. Пател, Д. (2004), “Ниобий – ключевой элемент при термомеханической прокатке. Производство феррониобия компанией СВММ”, *Прогрессивные толстолистовые стали для газонефтепроводных труб большого диаметра и металлоконструкции ответственного назначения: сб. докладов.*, Metallurgizdat, Москва, сс. 76-82.

137. Witek, Szczepan., Milenin, Andrij. (2018), “Numerical analysis of temperature and residual stresses in hot-rolled steel strip during cooling in coils”, *Archives of civil and mechanical engineering*, Vol. 18, pp. 659-668. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.acme.2017.11.002>

138. Hoon-Hwe, Cho., Yi-Gil, Cho., Young-Roc, Im., Jae, Kon.Lee., Jai-Hyun, Kwak., Heung, Nam.Han. (2010), “A finite element analysis for asymmetric contraction after coiling of hot-rolled steel”, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 210, pp. 907-913. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2010.02.003>

139. Saboonchi, Ahmad., Hassanpour, Saeid. (2008), “Simulation-based prediction of hot-rolled coil forced cooling”, *Applied Thermal Engineering*, Vol. 28, pp. 1630-1637. DOI: <https://doi:10.1016/j.applthermaleng.2007.10.029>
140. Jiefeng, Cheng., Zhengdong, Liu., Hun, Dong., Yong, Gun. (2006), “Analysis of the factors affecting thermal evolution of hot rolled steel during coil cooling”, *Journal of University of Science and Technology Beijing, Mineral, Metallurgy, Material*, Vol. 13, № 2, pp. 139-143. DOI: [https://doi.org/10.1016/S1005-8850\(06\)60031-5](https://doi.org/10.1016/S1005-8850(06)60031-5)
141. Anirban, Chowdhury., Ramasamy, Iyyappan., Dipanwita, Majumdar., Achintya, Singha. (2014), “Structural and spectroscopic characterisations of the surface oxide scales and inclusions present on edge-burst hot-rolled steel coils”, *Materials Chemistry and Physics*, Vol. 148, pp. 276-283. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2014.07.044>
142. Wang, Xiaodong., Li, Fei., Yang, Quan., He, Anrui. (2013), “FEM analysis for residual stress prediction in hot rolled steel strip during the run-out table cooling”, *Applied Mathematical Modelling*, Vol. 37, pp. 586-609. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apm.2012.02.042>
143. Di, WU., Zhuang, Ii., Hui-sheng, LU. (2008), “Effect of Controlled Cooling After Hot Rolling on Mechanical Properties of Hot Rolled TRIP Steel”, *Journal Of Iron and Steel Research Internationai*, 15(2), pp. 65-70. DOI: [https://doi.org/10.1016/S1006-706X\(08\)60034-5](https://doi.org/10.1016/S1006-706X(08)60034-5)
144. LIU, Ji-yuan., ZHANG, Zi-cheng., ZHU, Fu-xian., LI, Yan-mei., Manabe, Ken-ichi. (2012), “Effect of Cooling Method on Microstructure and Mechanical Properties of Hot-Rolled C-Si-Mn TRIP Steel”, *Journal Of Iron and Steel Research International*, 19(1), pp. 41-46. DOI: [https://doi.org/10.1016/S1006-706X\(12\)60045-4](https://doi.org/10.1016/S1006-706X(12)60045-4)
145. Sumit, Ghosh., Ajay, Kumar. Singh., Suhrit, Mula., Prasenjit, Chanda., Vinay, V.Mahashabde., Roy, T.K. (2017), “Mechanical properties, formability and corrosion resistance of thermomechanically controlled processed Ti-Nb stabilized IF steel”, *Materials Science & Engineering: A*, Vol. 684, pp. 22-36. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.msea.2016.12.034>

146. Полухин, П.И., Федосов, Н.М., Королев, А.А., Матвеев, Ю.М. (1982), *Прокатное производство*, Металлургия, Москва, 696 с.

147. Полухин, П.И., Горелик, С.С., Воронцов, В.К. (1982), *Физические основы пластической деформации: Учебное пособие для вузов*, Металлургия, Москва, 584 с.

148. Кнеппе, Г., Роде, В. (1993), “Экономическое производство полос из коррозионной стали на станах Стеккеля”, *пер. с нем. Черные металлы, Металлургия, Москва*, сс. 33-43.

149. Bohlin, A., Nygren, H., Jepsen, O. et al. (2002), “New technologies on Avesta Polarit`s Steckel rolling mill”, *MPT International*, № 6, pp. 56-62. / *Прокатное производство, ОАО Черметинформация. Новости черной металлургии за рубежом*. (2003) “Новые технологии на прокатном стане Стеккеля”, № 3, сс. 53-55.

150. Collins, L.E., Hamad, F., Kostic, M., Lawrence, T. (2013), “Production of High Strength Line Pipe Steel by Steckel Mill Rolling and Spiral Forming”, *Frontier Pipe Research Unit, IPSCO*. P. O. Box 1670, 100 Armour Rd, Regina, SK S4P 3C7, Canada, 17 p.

151. Flávia, Vieira. Bragaa., Diana, Pérez. Escobarb., Thompson, Junior. Ávila. Reisb., Nilton, José. Lucinda. de Oliveirab., Margareth, Spangler. Andradeb. (2016), “Recrystallization of niobium stabilized ferritic stainless steel during hot rolling simulation by torsion tests”, *Journal of Materials Research and Technology*, № 5(1), pp. 92-99.

152. Gray, M. (2001), “Niobium bearing steels in pipeline projects”, *Niobium science and technology: Proc. Int. Symposium on Niobium*, Dec. 2–5. 2001 y. Orlando, Florida, pp. 23-45.

153. Otavio, L., Berger, D., Djumlja, G., Reiter, F., Marples, A., Berger, K. (2005), “Continuous Steckel mill improvements at ACESITA SA Brazil”, *La Revue de Métallurgie*, pp. 583-588. DOI: <https://doi.org/10.1051/metal:2005175>

154. Stalheim, D.G. (2009), “Optimisation considerations for new or revamped plate / Steckel mills”, *Ironmaking and Steelmaking*, Institute of Materials, Minerals and Mining Published by Maney on behalf of the Institute, Vol. 36, № 4, pp. 259-264. DOI: <http://dx.doi.org/10.1179/174328109X439252>

155. Курпе, А.Г. (2010), “Освоение производства рулонного проката для труб на стане Стеккеля”, *Университетская наука – 2010: тез. докл. Междунар. науч.-техн. конф., ПГТУ, Мариуполь, т. 1*, сс. 158-159.

156. Курпе, А.Г. (2010), “Проектирование технологии производства рулонного проката для труб на стане Стеккеля”, *Труды восьмого конгресса прокатчиков. МОО «Объединение прокатчиков», ОАО «Магнитогорский металлургический комбинат», ГОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.Н. Носова», Магнитогорск, т. 2*, сс. 123-130.

157. Knutsen, Robert.D., Parker, Sa-Aadat. (2008), “Analysis of Microstructure Evolution during Steckel Mill Rolling of AISI304 Stainless Steel”, *ISIJ International*, Vol. 48, № 2, pp. 200-207. DOI: <https://doi.org/10.2355/isijinternational.48.200>

158. Hinton, John.S., Beynon, John.H. (2008), “A Laboratory Steckel Mill Simulation”, *Steel research international*, Vol. 79, № 4, pp. 278-286. DOI: <https://doi.org/10.1002/srin.200806352>

159. Капланов, В.И, Курпе, А.Г, Змазнева, Е.В. (2011), “Особенности проектирования технологии прокатки рулонов на стане Стеккеля”, *Университетская наука – 2011: тез. докл. Междунар. науч.-техн. конф. Металлургический факультет, ПГТУ, Мариуполь*, сс. 144-145.

160. Курпе, А.Г, Змазнева, Е.В. (2012), “Анализ режимов деформации на стане Стеккеля”, *Университетская наука – 2012: тез. докл. Междунар. науч.-техн. конф., ПГТУ, Мариуполь, т. 1*, сс. 236-237.

161. Kukhar, Volodymyr., Kurpe, Oleksandr., Klimov, Eduard., Balalayeva, Elena., Dragobetskii, Vladimir. (2018), “Improvement of the Method for Calculating the Metal Temperature Loss on a Coilbox Unit at The Rolling on Hot Strip Mills”, *International Journal of Engineering & Technology*, 7(4.3), pp. 35-39. DOI: <http://dx.doi.org/10.14419/ijet.v7i4.3.19548>

162. Курпе, О.Г., Кухар, В.В. (2018), “Освоєння виробництва прокату товщиною 1,2 мм на стані 1700 ПрАТ «ММК ІМЕНІ ІЛЛІЧА»”, *Вісник Хмельницького національного університету, Технічні науки, №5 (265)*, сс. 171-175.

163. Rule Note NR 216 DT R09 E. (2017), *Rules on Materials and Welding for the Classification of Marine Units*, [January 2017], Bureau Veritas, 260 p.

164. EN 10149-1. (2013), “*Hot rolled flat products made of high yield strength steels for cold forming. Part 1: General technical delivery conditions*”, [September 2013], CEN, 18 p.

165. API SPECIFICATION 5L. (2012), *Specification for Line Pipe. Forty-five edition*, [December 2012], American Petroleum Institute (API), 142 p.

166. ASTM A841/A841M. (2017), *Standard Specification for Steel Plates for Pressure Vessels, Produced by Thermo-Mechanical Control Process (TMCP)*, ASTM International, United States, 7 p.

167. EN 10025-4. (2004), *Hot rolled products of structural steels. Part 4: Technical delivery conditions for thermomechanical rolled weldable fine grain structural steels*, [November 2004], CEN, 25 p.

168. EN 10149-2. (2013), *Hot rolled flat products made of high yield strength steels for cold forming. Part 2: Delivery conditions for thermomechanically rolled steels*, [September 2013], CEN, 11 p.

169. EN 10025-2. (2004), *Hot rolled products of structural steels. Part 2: Technical delivery conditions for non-alloy structural steels*, [November 2004], CEN, 33 p.

170. EN 10025-1. (2004), *Hot rolled products of structural steels. Part 1: General technical delivery conditions*, [November 2004], CEN, 32 p.

171. Грачев, С.В. (1976), *Термическая обработка и сопротивление сплавов повторному нагружению*, Металлургия, Москва, 152 с.

172. Данилов, Ю.С. (1964), “Влияние величины зерна на эффект Баушингера”, *МиТОМ*, № 9, сс. 39-41.

173. ГОСТ 13663. (1986), *Трубы стальные профильные. Технические требования*, Министерство черной металлургии СССР, 5 с.

174. ГОСТ 10705. (1980), *Трубы стальные электросварные. Технические условия*, Министерство черной металлургии СССР, 12 с.

175. ГОСТ 3262. (1997), *Трубы стальные водогазопроводные. Технические условия*, Министерство черной металлургии СССР, 11 с.

176. ASTM A53/A53M. (2012), *Standard Specification for Pipe, Steel, Black and Hot-Dipped, Zinc-Coated, Welded and Seamless*, [March 2012], ASTM International, United States, 39 p.

177. ASTM A500/A500M. (2013), *Standard Specification for Cold-Formed Welded and Seamless Carbon Steel Structural Tubing in Rounds and Shapes*, [November 2013], ASTM International, United States, 6 p.

178. “Толстолистовые станы – совмещающая мощь и точность. Primetals Technologies”, available at: <https://www.primetals.com/ru/portfolio/gorjachaja-prokatka-lista/tolstolistovye-stany/>

179. Ian, Robinson. (2017), “Recent Applications of the Mulpic Plate Cooling Technology”, ISSUE 02, *Metals Magazine. Technology. Rolling and Processing*, № 2, "Paper number 111, p. 62.

180. Laurent, Dorel. (2017), “Hot-Flat-Product Surface Inspection – Latest Developments”, ISSUE 02, *Metals Magazine. Technology. Rolling and Processing*, № 2, Paper number 117, p. 67.

181. Andreas, Jungbauer., Bernd, Linze. (2018), “Through Thick And Thin With Arvedi Esp”, ISSUE 02, *Metals Magazine. Technology. Linked Casting and Rolling*, № 2, p. 66-73.

182. “Полосовые станы горячей прокатки – высокая производительность для новых и существующих станов. Primetals Technologies”, available at: <https://www.primetals.com/ru/portfolio/gorjachaja-prokatka-lista/polosovye-stany-gorjachei-prokatki/>

183. Schmoller, Franz. Xaver. (2017), “The Most Unique Hot-Strip Mill In The World”, ISSUE 02, *Metals Magazine. Technology. Rolling and Processing*, № 2, Paper number 38, p. 63.

184. Jiro, Hasai. (2017), “Mill Stabilizing Device For Reduction Of Mill Vibration In Hot Rolling”, ISSUE 02, *Metals Magazine. Technology. Rolling and Processing*, № 2, Paper number 108, p. 64.

185. Chuanfang, Zhang., Kaixiang, Peng., Jie, Dong. (2019), “A P-t-SNE and MMEMPM based quality-related process monitoring method for a variety of hot rolling processes”, *Control Engineering Practice*, Vol. 89, pp. 1-11. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conengprac.2019.05.006>

186. Takashi, Shikimori., Seigo, Muto., Osamu, Yamaguchi. (2016), “Development of automatic rolling scheduling system for synchronized operation of casting and hot rolling”, *IFAC-PapersOnLine*, Vol. 49, № 20, pp. 250-255. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2016.10.129>

187. Khramshina, V.R., Radionov, A.A., Kornilov, G.P., Odintsov, K.E. (2016), “Improvement of Electric and Mechanical System for Automated Strip Tension Control at Continuous Wide-Strip Hot-Rolling Mill”, *Procedia Engineering*, Vol. 150, pp. 11-17. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.07.208>

188. Karandaev, A.S., Kornilov, G.P., Khramshin, V.R., Khramshin, T.R. (2015), “Improving electric power quality within the power supply system of wide-strip hot-rolling mill stand”, *Procedia Engineering*, Vol. 129, pp. 2-8. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.12.002>

189. Shokhin, V.V., Permyakova, O.V. (2015), “The study of continuous rolling mill inter-stand tension inferential control systems”, *Procedia Engineering*, Vol. 129, pp. 231- 238. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.12.038>

190. Joon-Sik, Son., Duk-Man, Lee., Ill-Soo, Kimc., Seung-Gap, Choi. (2005), “A study on on-line learning neural network for prediction for rolling force in hot-rolling mill”, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 164-165, pp. 1612-1617. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2005.01.009>

191. Mirko, Tunk., Dr. Matthias, Kurz., Helmut, Hlobil., Viktor, Schlecht. (2018), “A Common Vision For Excellence”, ISSUE 02, *Metals Magazine. Technology. Hot Rolling*, № 2, pp. 74-79.



192. Dr. Bernd, Linzer. (2017), “Broadening the Steel Markets by Direct Application of High-Quality ESP Strip”, ISSUE 02, *Metals Magazine. Technology. Rolling and Processing*, № 2, Paper number 33, p. 61.

193. Jungbauer, Andreas. (2017), “Arvedi ESP: The Technological Contribution for Performance Optimization”, ISSUE 02, *Metals Magazine. Technology. Rolling and Processing*, № 2, Paper number 34, p. 61.

194. Fuquan, Sun., Binglin, Zheng., Dingwei, Wang. (1998), “The study and development of production synchronized scheduling system of minimizing the cost flow on steelmaking-hot rolling”, *IFAC Low Cost Automation*. Shenyang, P.R. China, Vol. 31. pp. 169-172. DOI: [https://doi.org/10.1016/S1474-6670\(17\)36380-2](https://doi.org/10.1016/S1474-6670(17)36380-2)

195. Ryoji, Tamuraa., Megumi, Nagaia., Yoshiyuki, Nakagawaa., Takashi, Tanizakib., Hiroshi, Nakajimac. (1998), “Synchronized Scheduling Method in Manufacturing Steel Sheets”, *International Transactions in Operational Research*, Vol. 5, pp. 189-199. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0969-6016\(98\)00016-1](https://doi.org/10.1016/S0969-6016(98)00016-1)

196. ZHAO, De-zong., LIab, Chun-wen., REN, Jun. (2009), “Speed Synchronization of Multiple Induction Motors with Total Sliding Mode Control”, *Systems Engineering - Theory & Practice*, Vol. 29, pp. 110-117. DOI: [https://doi.org/10.1016/S1874-8651\(10\)60077-4](https://doi.org/10.1016/S1874-8651(10)60077-4)

197. “Станы Стеккеля – специализированные решения от опытных инженеров. Primetals Technologies”, available at: <https://www.primetals.com/ru/portfolio/gorjachaja-prokatka-lista/stany-stekkelja/>

198. Biondi, Matteo., Dr. Saliba, Sleman., Dr. Harjunkoski, Iiro. (2011), “Production Optimization and Scheduling in a Steel Plant: Hot Rolling Mill”, *IFAC Proceedings*, Vol. 44, № 1, pp. 11750-11754. DOI: <https://doi.org/10.3182/20110828-6-IT-1002.01157>

199. Riches, Paul. (2017), “Rolling Into the Future by Digitalization”, ISSUE 02, *Metals Magazine. Technology. Rolling and Processing*, № 2, Paper number 78, p. 60.

200. Хайстеркамп, Ф., Хулка, К., Матросов, Ю. И. и др. (1999), *Нюбийсодержащие низколегированные стали*, СП Интермет Инжиниринг, Москва, 94 с.

201. Ганошенко И.В. (2006), *Формирование в условиях стана 3600 «МК «Азовсталь» структуры и свойств микролегированной стали для электросварных труб категории прочности K65* : дис. на соискание уч. степени к-та техн. наук : 05.16.01, ФГУП «ЦНИИЧермет им. И.П. Бардина», Москва, 173 с.

202. Cuddy, L.J. (1986), *Accelerated Cooling of Steel*, TMS of ASME, Warrendale (PA), pp. 235-243.

203. Мастрюков, Б.С. (1978), *Теория, конструкции и расчеты металлургических печей*, Металлургия, Москва, т. 2, 272 с.

204. Частухин, А.В. (2017), *Закономерности процессов рекристаллизации аустенита и совершенствование технологии контролируемой прокатки микролегированных трубных сталей повышенной хладостойкости* : дис. на соискание уч. степени к-та т. наук : 05.16.01, ФГУП ЦНИИЧермет им. И.П. Бардина. Москва, 171 с.

205. Галлагер, Р. (1984), *Метод конечных элементов. Основы*. Пер. с англ., Мир, Москва, 428 с.

206. Деклу, Ж. (1976), *Метод конечных элементов*, Мир, Москва, 94 с.

207. Потапкин, В.Ф. (2005), *Метод полей линий скольжения в теории прокатки широких полос*, ДГМА, Краматорск, 316 с.

208. Василевський, О.В. (2016), *Вдосконалення процесів протяжки круглих валів у комбінованих бойках на гідравлічних пресах* : дис. к-та. т. наук : 05.03.05, Державний вищий навчальний заклад «Приазовський держ. техн. ун-т». Маріуполь, 276 с.

209. Де Бор, К. (1985), *Практическое руководство по сплайнам*, Радио и связь, Москва, 235 с.

210. Петросян, В.Г., Петросян, Т.В. (1996), «Методы перебора в решении физических задач», *Информатика и образование*, № 3, сс. 73-83.

211. Денисова, Э.В., Кучер, А.В. (2010), *Основы вычислительной математики*, ИТМО, СПб, 164 с.

212. Полухин, П.И., Гун, Г.Я., Галкин, А.М. (1976), *Сопротивление пластической деформации металлов и сплавов : справочник*, Metallurgia, Москва, 486 с.
213. Lippman, H. (1962), *Bande-Blanche-Roche*, Vol.3, pp. 374–383.
214. Чернова, Н.И. (2007), *Математическая статистика: Учеб. Пособие*, Новосиб. гос. ун-т., Новосибирск, 148 с.
215. Шорохова, И.С., Кисляк, Н.В., Мариев, О.С. (2015), *Статистические методы анализа: [учеб. пособие]*. М-во образования и науки Рос. Федерации, Урал. федер. ун-т., Изд-во Урал. ун-та, Екатеринбург, 300 с.
216. Вуколов, Э.А. (2008), *Основы статистического анализа. Практикум по статистическим методам и исследования операций с использованием пакетов STATISTIKA и EXCEL.: учебное пособие*, 2-е изд., испр. и доп., ФОРУМ, Москва, 464 с. (Высшее образование)
217. Тайц, Н.Ю., Розенгарт, Ю.И. (1964), *Методические нагревательные печи*, Metallurgizdat, Москва, 408 с.
218. *Расчет нагревательных и термических печей: Справочник*. (1983), под ред. В.М. Тымчака, В.Л. Гусовского, Metallurgia, Москва, 480 с.
219. Казанцев, Е.И. (1975), *Промышленные печи*, Metallurgia, Москва, 367 с.
220. Спектор, Я.И., Куницкая, И.Н., Тумко А.Н. [и др.]. (2009), “Термокинетические диаграммы и механизмы рекристаллизации при многопроходной горячей деформации специальных сталей”, *Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні*, № 1, сс. 11-17.
221. Курпе, О.Г., Кухар, В.В. (2020), “Дослідження процесів рекристалізації в умовах термомеханічного процесу прокатки сталі марки Х65”, *Вісник КрНУ імені Михайла Остроградського. Матеріалознавство*, Вип. 2(121), сс. 122-128. DOI: 10.30929/1995-0519.2020.2.122-128
222. Boretto, F., Borbasa, R., Yue, S. Jonas, T.J. (1988), *Thermomechanical Processing of Steels and Other Materials*, Isis, Tokyo, 49 p.

223. Капланов, В.И., Володарский, В.В., Курпе, А.Г., Носоченко, А.О., Сагиров, Р.И., Ганошенко, И.В., Матросов, Ю.И. (2007), “Исследование прочностных свойств стали категории прочности Х70 и Х80”, *Производство проката*, Наука и Технологии, Москва, №2, сс. 7-10.

224. Капланов, В.И., Курпе, А.Г. (2009), “Усовершенствованная зависимость для определения пластических свойств стали категории прочности Х70”, *Университетская наука – 2009: тез. докл. междунар. науч.-техн. конф., ПГТУ, Мариуполь*, сс. 156-157.

225. Нохрин, А.В. (2014), *Экспериментальные и теоретические исследования эволюции структуры субмикроструктурных металлов, полученных методом интенсивного пластического деформирования : дис. на соискание уч. степени д-ра ф.-м. наук : 01.04.07*, ФГАОУВО «Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского, Нижний Новгород, 320 с.

226. Черкасова, Т.В. (2016), *Дислокационная структура поликристаллических сплавов Си-Al, Си-Mn и соотношения физики пластической деформации : дис. на соискание уч. степени к-та ф.-м. наук : 01.04.07*, ФГБОУВО «Томский государственный архитектурно-строительный университет», Томск, 184 с.

227. Кухар, В.В., Курпе, О.Г. (2020), “Фізичне моделювання силових процесів чорнової гарячої прокатки”, *Вчені записки Таврійського національного університету імені В. І. Вернадського. Технічні науки*, № 3, т. 31 (70), сс. 185-190. DOI: <https://doi.org/10.32838/TNU-2663-5941/2020.3-1/29>

228. Кухар, В.В., Курпе, О.Г. (2020), “Визначення реологічної подоби свинцю та сталей для плоскої гарячої прокатки”, *Збірник наукових праць національного гірничого університету. Матеріалознавство та галузеве машинобудування*, №61, сс. 153-162. DOI: <https://doi.org/10.33271/crpnmu/61.153>

229. Федоринов, В.А., Сатонин, А.В., Грибков, Э.П. (2010), *Математическое моделирование напряжений, деформаций и основных показателей качества при прокатке относительно широких листов и полос*, моногр., ДГМА, Краматорск, 244 с.

230. Kurpe, O., Kukhar, V. (2020), “Investigation of the hot rolling process at the Steckel mill by means of modeling by the finite-element method”, *Scientific Journal of the Ternopil National Technical University*, № 2 (98), pp. 68-79. DOI: [https://doi.org/10.33108/visnyk\\_tntu2020.02](https://doi.org/10.33108/visnyk_tntu2020.02)

231. Курпе, О.Г., Кухар, В.В. (2020), “Визначення умов проникнення деформації по товщині прокату на стані Стеккеля”, *Обработка материалов давлением: сб. науч. тр. ДГМА, ДГМА, Краматорск, № 1 (50)*, сс. 249-258.

232. Курпе, О.Г., Кухар, В.В. (2018), “Розширення сортаменту листового прокату в умовах металургійного заводу в Італії”, *Вчені записки Таврійського національного університету імені В. І. Вернадського. Технічні науки*, № 3, т. 29 (68), сс. 121-126.

233. Kurpe, O.H., Kukhar, V.V. (2018), “Development and Optimization of Flat Products Manufacturing at Rolling Mill 3200”, *Materials Science and Metallurgical Technology. Materials Science Forum*, Vol. 946, pp. 794-799. DOI: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.946.794>

234. Зінчено, Ю.А., Пісмарьов, К.Є., Курпе, О.Г., Змазнева, Є.В. (2017), “Спосіб визначення параметрів прокатки рулонів на стані Стеккеля”, *пат. 117875 Україна: МПК В21В 1/26 (2006.01), № и 2017 01099; заявл. 06.02.2017; опубл. 10.07.2017*, Бюл. № 13. (патент на корисну модель).

235. Лівшиц, Д.А., Третьяков, О.Б., Шахпазов, Є.Х., Матросов, Ю.І., Гоман, С.В., Кумуржи, Є.В., Володарський, В.В., Багмет, О.О., Курпе, О.Г., Койфман, О.А., Ганошенко, І.В. (2010), “Спосіб виробництва прокату методом багатостадійної контрольованої прокатки”, *пат. 54343 Україна: МПК В21В 1/22, С21D 1/00, С22С 38/00, № и 2010 03966; заявл. 06.04.2010; опубл. 10.11.2010*, Бюл. № 21. (патент на корисну модель).

236. Курпе, О.Г. (2018), “Проектування технології виробництва рулонного прокату для труб на стані Стеккеля заводу «FERRIERA VALSIDER» (ІТАЛІЯ)”, *Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки*, № 6, т. 2, сс. 53- 59.

237. Kukhar, V.V., Kurpe, O.H., Klimov, E.S., Prysiazhnyi, A.H., Anishchenko, O.S. (2020), “Research and Improvement of Rolling Parameters at the Steckel Mill. Intellectual capital is the foundation of innovative development innovative engineering and technology, informatics”, *Monographic series «European Science» Book 3. Part 3*, ScientificWorld-NetAkhatAV, Karlsruhe 2020, ISSN 2709-2313, pp. 60-78. DOI: 10.21893/2709-2313.2020-03-03-052

238. Jiang, Z.Y., Tang, J., Sun, W., Tieu, A.K., Wei, D. (2010), “Analysis of tribological feature of the oxide scale in hot strip rolling”, *Tribology International*, Vol. 43, pp. 1339-1345. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2009.12.070>

239. Jae-min, Lee., Wooram, Noh., Deuk-Jung, Kim., Myoung-Gyu, Lee. (2016), “Spallation analysis of oxide scale on low carbon steel”, *Materials Science & Engineering A*, Vol. 676, pp. 385-394. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.msea.2016.09.012>

240. Kurpe, O., Kukhar, V. (2018), “Developing of Manufacturing Technology for Hot Rolling Coils (Steel Grade S355MC) at the Wide-Strip Rolling Mill 1700”, *Scientific development and Achievements*, Science publishing London, Vol. 5, pp. 260-270. ISBN 978-1-9993071-0-3.

241. Курпе, А.Г., Негрий, С.Д., Васильченко, С.Е. (2016), “Термомеханическая прокатка рулонов на стане 1700”, *Университетская наука – 2016: тез. докл. Междунар. науч.-техн. конф., ПГТУ, Мариуполь*, сс. 109-110.

242. Курпе, О.Г., Кухар, В.В., Захаров, М.П., Пертік, Д.І. (2019), “Розробка та відпрацювання технології термомеханічної контрольованої прокатки рулонної сталі за європейськими Стандартами”, *Університетська наука – 2019: тези доп. Міжнар. науково-техн. конф., ПДТУ, Мариуполь, т.1*, сс. 39-41.

243. Курпе, О.Г., Кухар, В.В., Мирвода, К.Ю., Пертік, Д.І., Захаров, М.П. (2019), “Досягнення показників якості рулонного металопрокату зі сталей за Європейськими Стандартами, що вироблені в умовах НШПС 1700”, *Університетська наука – 2019: тези доп. Міжнар. науково-техн. конф., ПДТУ, Мариуполь, т.1*, с. 41.

244. Курпе, А.Г., Шебаниц, О.Н. Васильченко, С.Е. (2017), “Освоение технологии производства рулонов для труб по API-5L на стане ЛПЦ-1700”, *Университетская наука – 2017: тез. докл. Междунар. науч.-техн. конф., ПГТУ, Мариуполь, т. 1*, сс. 195-196.

245. Курпе, О.Г., Кухар, В.В., Шебаниц, О.М. (2018), “Освоєння виробництва гарячекатаних рулонів із марки сталі В для подальшого виробництва труб згідно з вимогами API-L на стані 1700 ПРАТ «ММК ІМЕНІ ІЛЛІЧА»”, *Вчені записки Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського Серія: Технічні науки*, Т. 29 (68), № 6, Част. 2, сс. 56-63.

246. Kurpe, O., Kukhar, V., Klimov, E., Chernenko, S., Balalayeva, E. (2019), “Implementation of Pipe Steel Grade X52M Manufacturing according to API-5L Requirements Applied to Hot Rolling Mills "1700", *The Innovation Exchange: 2<sup>nd</sup> International Conference on Design, Simulation, Manufacturing. Book of Abstracts. Lutsk, June 11-14, 2019 y. Lutsk, Ukraine*, p. 101.

247. Курпе, О.Г., Кухар, В.В., Шебаниц, О.М. (2018), “Освоєння виробництва гарячекатаних рулонів зі сталі марки X52M для подальшого виробництва труб згідно з вимогами API-5L, на стані 1700 ПрАТ «ММК ІМЕНІ ІЛЛІЧА»”, *Вісник КрНУ імені Михайла Остроградського. Сучасні технології в машинобудуванні, транспорті та гірництві*, Вип. 5(112), сс. 65-74.

248. Kurpe, O., Kukhar, V., Klimov, E., Chernenko, S., Balalayeva, E. (2020), “Implementation of Pipe Steel Grade X52M Manufacturing according to API-5L Requirements Applied to Hot Rolling Mills "1700", *2nd International Conference on Design, Simulation, Manufacturing: The Innovation Exchange. Lutsk, Ukraine: Springer Nature Switzerland AG*, pp. 418-429. DOI: [https://doi.org/10.1007/978-3-030-22365-6\\_42](https://doi.org/10.1007/978-3-030-22365-6_42)

249. Лівшиц, Д.А., Третьяков, О.Б., Ковура, О.Б., Зінченко, Ю.А., Кумуржи, Є.В., Чубань, А.М., Койфман, О.А., Курпе, О.Г., Змазнева, Є.В. (2010), “Спосіб нагрівання і підготовки заготовок перед прокаткою у станах гарячої прокатки”, *пат. 92950 Україна: МПК C21D 9/00, F27B 9/00, F27B 9/30, F27D 3/00, № а 2009 00161; заявл. 09.01.2009; опубл. 27.12.2010, Бюл. № 24. (патент на винахід).*

250. Лівшиц, Д.А., Третьяков, О.Б., Шахпазов, Є.Х., Матросов, Ю.І., Гоман, С.В., Ганошенко, І.В. Кумуржи, Є.В., Володарський, В.В., Курпе, О.Г., Койфман, О.А., Чубань, А.М. (2010), “Спосіб виробництва прокату методом нормалізуючої прокатки”, *пат. 56651 Україна: МПК C21D 8/00, B21B 1/22, C22C 38/00, № и 2010 07248; заявл. 11.06.2010; опубл. 25.01.2011*, Бюл. № 2. (патент на корисну модель).

251. Лівшиц, Д.А., Третьяков, О.Б., Шахпазов, Є.Х., Матросов, Ю.І., Гоман, С.В., Ганошенко, І.В. Кумуржи, Є.В., Володарський, В.В., Курпе, О.Г., Койфман, О.А., Очеретін, В.М. (2010), “Спосіб виробництва прокату методом багатостадійної термодифузної обробки”, *пат. 54506 Україна: МПК C21D 3/00, C21D 1/00 / и 2010 06311; заявл. 25.05.2010; опубл. 10.11.2010*, Бюл. № 21. (патент на корисну модель).

252. Лівшиц, Д.А., Третьяков, О.Б., Шахпазов, Є.Х., Матросов, Ю.І., Гоман, С.В., Ганошенко, І.В. Кумуржи, Є.В., Володарський, В.В., Курпе, О.Г., Койфман, О.А., Очеретін, В.М. (2010), “Спосіб виробництва прокату методом багатостадійної термодифузної обробки”, *пат. 54507 Україна: МПК C21D 3/00, C21D 1/00, № и 2010 06313; заявл. 25.05.2010; опубл. 10.11.2010*, Бюл. № 21. (патент на корисну модель).

253. Зинченко, Ю.А., Курпе, А.Г., Багмет, О.А. (2009), “Перспективы развития технологии производства штрипса в ОАО «МК «Азовсталь»”, *Современные тенденции разработки и производства сталей и труб для магистральных газонефтепроводов*: Сб. докладов., Металлургиздат, Москва, сс. 76-77.

254. Курпе, А.Г. (2012), “Опробование технологии термомеханической прокатки листов из судостали на стане 3600”, *Университетская наука – 2012: тез. докл. Междунар. науч.-техн. конф., ПГТУ, Мариуполь, т. 1*, сс. 236-237.

255. Курпе, О.Г. (2018), “Термомеханічна прокатка товстих листів зі сталі марки ЕНЗ6 на стані 3600 ПрАТ «МК «АЗОВСТАЛЬ»”, *Обработка материалов давлением*: сб. науч. труд., ДГМА, Краматорск, № 2 (47), сс. 146-155.



256. Лівшиц, Д.А., Ковура, О.Б., Зінченко, Ю.А., Ганошенко, І.В., Койфман, О.А., Володарський, В.В., Курпе, О.Г., Капланов, В.І. (2008), “Спосіб визначення параметрів прокатки товстих листів”, *пат. 41713 Україна: МПК В21В 1/26 / № и 2008 11407; заявл. 22.09.2008; опубл. 10.06.2009*, Бюл. № 11. (патент на корисну модель).

257. Kurpe, O.H., Kukhar, V.V. (2019), “Pilot production development of plate, steel grade EN36 applying thermo-mechanical controlled process at the rolling mill 3600”, *Проблеми трибології = Problems of Tribology*, Хмельницький, Vol. 92, № 2, сс. 33-41.

258. ДСТУ ISO 9000:2015 (ISO 9001:2015, IDT). (2016), *Системи управління якістю. Основні положення та словник термінів*, [Чинний від 2016-07-01], ДП «УкрНДНЦ», Київ, 45 с.

259. ДСТУ ISO 9001:2015 (ISO 9001:2015, IDT). (2016), *Системи управління якістю. Вимоги*, [Чинний від 2016-07-01], ДП «УкрНДНЦ», Київ, 22 с.

260. Синго, С. (2010), *Изучение производственной системы Тойоты с точки зрения организации производства / пер. с англ.*, Институт комплексных стратегических исследований, Москва, 312 с.

261. Оно, Т. (2013), *Производственная система Тойоты. Уходя от массового производства / пер. с англ.*, Институт комплексных стратегических исследований, Москва, 208 с.

262. “Превентивное управление качеством. ДМКД”, available at: <http://www.dmkd.dp.ua/4316>

263. “Система управління якістю. Металургійний комбінат «АЗОВСТАЛЬ»”, available at: <https://azovstal.metinvestholding.com/ua/activity/quality/control>

264. “Якість. Маріупольський МК ІМ. ІЛІЧА”, available at: <https://ilyichsteel.metinvestholding.com/ua/activity/quality>

265. “Запоріжсталь сьогодні. Запоріжсталь”, available at: <https://www.zaporizhstal.com/pidpriyemstvo/>

266. ДСТУ ISO 8258-2001 (ISO 8258:1991, IDT). (2003), *Статистичний контроль. Контрольні карти Шухарта*, [Чинний від 2003-07-01], Держспоживстандарт України, Київ, 32 с.

267. Курпе, О.Г. Кухар, В.В., Присяжний, А.Г. (2020), “Удосконалення та апробація методології керування якістю листового металопрокату”, *Обработка материалов давлением: сб. науч. тр. / ДГМА, ДГМА, Краматорск, № 1 (50)*, сс. 228- 235.

268. “Как в Метинвесте разрабатывают новые продукты. METINVEST”, available at: <https://metinvestholding.com/ru/media/news/how-metinvest-develops-new-products>

269. “METINVEST”, available at: <https://metinvestholding.com/>

270. Курпе, О.Г., Кухар, В.В. (2018), “Варіант модернізації стану 1700 ПрАТ «ММК ІМЕНІ ІЛІЧА»”, *Вісник НТУ «ХПІ». Сер. Інноваційні технології та обладнання обробки матеріалів у машинобудуванні та металургії*, № 23 (1299), сс. 33-38.

271. Кухар, В.В., Курпе, О.Г., Захаров, М.П., Калатало, А.В. (2020), “Недоліки та перспективи розвитку технології та устаткування широкосмугових станів гарячої прокатки”, *Університетська наука – 2020: тези доп. міжнар. науково–техн. конф. ПДТУ, Мариуполь, т.1*, сс. 56–57.

272. Курпе, О.Г., Кухар, В.В. (2018), “Синхронізація роботи клітей чорнової групи стану 1700 ПРАТ «ММК ІМ. ІЛІЧА»”, *Вісник приазовського державного технічного університету. Сер. Технічні науки*, Вип. 37, сс. 29-34.

273. Kurpe, Oleksandr., Kukhar, Volodymyr., Puzyr, Ruslan., Burko, Vadym., Balalayeva, Elena., Klimov, Eduard. (2020), “Electric Motors Power Modes at Synchronization of Roughing Rolling Stands of Hot Strip Mill”, *25th IEEE International Conference on Problems of Automated Electric Drive. Theory and Practice*. Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University, Ukraine, pp. 510-513. DOI: 10.1109/PAEP49887.2020.9240818

## Додаток А

## Список публікацій за темою дисертації

Наукові праці, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації:

*Монографії:*

1. Кухарь, В.В., Присяжный, А.Г., Балалаева, Е.Ю., Тузенко, О.А., Курпе, А.Г., Анищенко, А.С., Кармазина, И.В. (2018), *Управление тепловым состоянием тонколистового проката для повышения равномерности распределения механических свойств*, ПГТУ, Мариуполь, 144 с. ISBN 978-966-604-243-2.

2. Kurpe, O., Kukhar, V. (2018), “Mastering high-strength shipbuilding steel plate production using thermo-mechanical controlled process (TMCP) at the rolling mill 3600”, *Engineering sciences: Development prospects in countries of Europe at the beginning of the third Millennium: Collective monograph*, Stalowa Wola, Poland, Vol. 1, pp. 281-298. ISBN 978-9934-571-63-3.

3. Kurpe, O., Kukhar, V. (2018), “Developing of Manufacturing Technology for Hot Rolling Coils (Steel Grade S355MC) at the Wide-Strip Rolling Mill 1700”, *Scientific development and Achievements*, Science publishing London, Vol. 5, pp. 260-270. ISBN 978-1-9993071-0-3.

4. Kukhar, V.V., Kurpe, O.H., Klimov, E.S., Prysiashnyi, A.H., Anishchenko, O.S. (2020), “Research and Improvement of Rolling Parameters at the Steckel Mill”, *Intellectual capital is the foundation of innovative development innovative engineering and technology, informatics: Monographic series «European Science» Book 3. Part 3*, ScientificWorld-NetAkhatAV, Karlsruhe, pp. 60-78. ISSN 2709-2313. DOI: 10.21893/2709-2313.2020-03-03-052.

*Публікації у фахових виданнях України:*

5. Кухарь, В.В., Курпе, А.Г. (2018), “Уточнение методики расчета тепловых потерь металла на непрерывных станах горячей прокатки”, *Обработка материалов давлением: сб. науч. тр. ДГМА, ДГМА, Краматорск, № 1 (46)*, сс. 159-166.

6. Курпе, О.Г., Кухар, В.В., Змазнєва, Є.В. (2018), “Уточнення розрахунку теплових втрат металу на станах Стеккеля”, *Проблеми трибології = Problems of Tribology*, № 1, pp. 78-84.
7. Курпе, О.Г., Кухар, В.В. (2018), “Освоєння виробництва прокату товщиною 1,2 мм на стані 1700 ПрАТ «ММК ІМЕНІ ІЛЛІЧА»”, *Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки*, №5 (265), сс. 171-175.
8. Курпе, О.Г., Кухар, В.В., Присяжний, А.Г. (2018), “Перевірка математичної моделі технологічного процесу прокатки на стані Стеккеля заводу Ferriera Valsider SpA”, *Mechanics and Advanced Technologies*, № 3 (84), сс. 98-105.
9. Курпе, О.Г., Кухар, В.В. (2019), “Вдосконалення математичної моделі зміни температурного поля смуги перед термомеханічною прокаткою на стані Стеккеля”, *Вісник НТУ «ХПІ». Сер. Інноваційні технології та обладнання обробки матеріалів у машинобудуванні та металургії*, № 11 (1336), сс. 31-35.
10. Курпе, А.Г., Изотов, Б.В., Лаштун, А.И., Коткова, Е.Ю., Негрий, С.Д. (2017), “Разработка и внедрение модели нормирования расхода топлива в методических печах стана 1700 в рамках функционирования системы энергетического менеджмента ISO 50001:2011”, *Металл и литье Украины*, № 1, сс. 35-42.
11. Курпе, А.Г., Васильченко, С.Е., Негрий, С.Д., Шибаниц, О.Н. (2017), “Освоение технологии термомеханической контролируемой прокатки на стане 1700”, *Металл и литье Украины*, № 1, сс. 54-56.
12. Курпе, О.Г., Кухар, В.В. (2018), “Варіант модернізації стану 1700 ПрАТ «ММК ІМЕНІ ІЛЛІЧА»”, *Вісник НТУ «ХПІ». Сер. Інноваційні технології та обладнання обробки матеріалів у машинобудуванні та металургії*, № 23 (1299), сс. 33-38.
13. Курпе, О.Г., Кухар, В.В. (2018), “Синхронізація роботи клітей чорнової групи стану 1700 ПРАТ «ММК ІМ. ІЛЛІЧА»”, *Вісник приазовського державного технічного університету. Сер. Технічні науки*, Вип. 37, сс. 29-34.

14. Курпе, О.Г., Кухар, В.В. (2018), “Розширення сортаменту листового прокату в умовах металургійного заводу в Італії”, *Вчені записки Таврійського національного університету імені В. І. Вернадського. Технічні науки*, № 3, т. 29 (68), сс. 121-126.

15. Курпе, О.Г. (2018), “Проектування технології виробництва рулонного прокату для труб на стані Стеккеля заводу «FERRIERA VALSIDER» (ІТАЛІЯ)”, *Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки*, № 6, т. 2, сс. 53- 59.

16. Курпе, О.Г., Кухар, В.В., Шибаніц, О.М. (2018), “Виробництво дослідної партії та оцінка якості рулонів з марки сталі S355MC на стані 1700 ПРАТ «ММК ІМЕНІ ІЛЛІЧА»”, *Збірник наукових праць Дніпровського державного технічного університету (технічні науки). Тематичний випуск Машина І Пластична Деформація Металу*, Кам’янське, сс. 36-44.

17. Курпе, О.Г., Кухар, В.В. (2018), “Освоєння виробництва гарячекатаних рулонів зі сталі марки S460MC на широкосмуговому стані 1700”, *Проблеми трибології = Problems of Tribology*, Хмельницький, № 3, сс. 61-69.

18. Курпе, О.Г., Кухар, В.В., Шибаніц, О.М. (2018), “Освоєння виробництва гарячекатаних рулонів із марки сталі В для подальшого виробництва труб згідно з вимогами API-L на стані 1700 ПРАТ «ММК ІМЕНІ ІЛЛІЧА»”. *Вчені записки Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського Серія: Технічні науки*, № 6, Т. 29 (68), Част. 2, сс. 56-63.

19. Курпе, О.Г., Кухар, В.В., Шибаніц, О.М. (2018), “Освоєння виробництва гарячекатаних рулонів зі сталі марки X52M для подальшого виробництва труб згідно з вимогами API-5L, на стані 1700 ПРАТ «ММК ІМЕНІ ІЛЛІЧА»”, *Вісник КрНУ імені Михайла Остроградського. Сучасні технології в машинобудуванні, транспорті та гірництві*, Вип. 5(112), сс. 65-74.

20. Курпе, О.Г. (2018), “Термомеханічна прокатка товстих листів зі сталі марки ЕН36 на стані 3600 ПрАТ «МК «АЗОВСТАЛЬ»”, *Обработка материалов давлением: сб. науч. труд, ДГМА, Краматорск, № 2 (47), сс. 146-155.*

21. Kurpe, O.H., Kukhar, V.V. (2019), “Pilot production development of plate, steel grade EN36 applying thermo-mechanical controlled process at the rolling mill 3600”, *Проблеми трибології = Problems of Tribology, Хмельницький, Vol. 92, № 2, сс. 33-41.*

22. Кухар, В.В., Курпе, О.Г. (2020), “Фізичне моделювання силових процесів чорнової гарячої прокатки”, *Вчені записки Таврійського національного університету імені В. І. Вернадського. Технічні науки, № 3, т. 31 (70), сс. 185-190. DOI: <https://doi.org/10.32838/TNU-2663-5941/2020.3-1/29>.*

23. Курпе, О.Г., Кухар, В.В. (2020), “Дослідження процесів рекристалізації в умовах термомеханічного процесу прокатки сталі марки Х65”, *Вісник КрНУ імені Михайла Остроградського. Матеріалознавство, Вип. 2(121), сс. 122-128. DOI: [10.30929/1995-0519.2020.2.122-128](https://doi.org/10.30929/1995-0519.2020.2.122-128).*

24. Кухар, В.В., Курпе, О.Г. (2020), “Визначення реологічної подоби свинцю та сталей для плоскої гарячої прокатки”, *Збірник наукових праць національного гірничого університету. Матеріалознавство та галузеве машинобудування, №61, сс. 153-162. DOI: <https://doi.org/10.33271/crpnmu/61.153>.*

25. Kurpe, O., Kukhar, V. (2020), “Investigation of the hot rolling process at the Steckel mill by means of modeling by the finite-element method”, *Scientific Journal of the Ternopil National Technical University, № 2 (98), pp. 68-79. DOI: [https://doi.org/10.33108/visnyk\\_tntu2020.02](https://doi.org/10.33108/visnyk_tntu2020.02).*

26. Курпе, О.Г., Кухар, В.В., Присяжний, А.Г. (2020), “Удосконалення та апробація методології керування якістю листового металопрокату”, *Обработка материалов давлением: сб. науч. тр. / ДГМА, ДГМА, Краматорск, № 1 (50), сс. 228- 235.*

27. Курпе, О.Г., Кухар, В.В. (2020), “Визначення умов проникнення деформації по товщині прокату на стані Стеккеля”, *Обработка материалов давлением: сб. науч. тр. / ДГМА, ДГМА, Краматорск, № 1 (50)*, сс. 249-258.

*Публікації у виданнях, що входять до міжнародних наукометричних баз даних:*

28. Zinchenko, Yu.A., Kurpe, A.G., Bagmet, O.A. (2008), “Prospects of the technology used to make skelp at the Azovstal metallurgical combine”, *Metallurgist*, Vol. 52, №. 7-8, pp. 461-463. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11015-008-9065-4>. (Scopus)

29. Kukhar, Volodymyr., Kurpe, Oleksandr., Klimov, Eduard., Balalayeva, Elena., Dragobetskii, Vladimir. (2018), “Improvement of the Method for Calculating the Metal Temperature Loss on a Coilbox Unit at The Rolling on Hot Strip Mills”, *International Journal of Engineering & Technology*, 7(4.3), pp. 35-39. DOI: <http://dx.doi.org/10.14419/ijet.v7i4.3.19548>. (Scopus)

30. Kurpe, O., Kukhar, V., Klimov, E., Prysiashnyi, A. (2018), “Thermomechanical Controlled Rolling of Hot Coils of Steel Grade S355MC at the Wide-Strip Rolling Mill 1700”, *Materials Properties and Technologies of Processing, Solid State Phenomena*, Vol. 291, pp. 63-71. DOI: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/SSP.291.63>. (Scopus)

31. Kurpe, O.H., Kukhar, V.V., Klimov, E.S., Chernenko, S.M. (2020), “Improvement of Process Parameters Calculation for Coil Rolling at the Steckel Mill”, *Materials Science and Metallurgical Technology II. Materials Science Forum*, Vol. 989, pp. 609-614. DOI: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.989.609>. (Scopus)

32. Kurpe, O.H., Kukhar, V.V. (2018), “Development and Optimization of Flat Products Manufacturing at Rolling Mill 3200”, *Materials Science and Metallurgical Technology. Materials Science Forum*, Vol. 946, pp. 794-799. DOI: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.946.794>. (Scopus)

33. Kurpe, O., Kukhar, V., Klimov, E., Chernenko, S., Balalayeva, E. (2020), “Implementation of Pipe Steel Grade X52M Manufacturing according to API-5L Requirements Applied to Hot Rolling Mills "1700", *2nd International Conference on Design, Simulation, Manufacturing: The Innovation Exchange, Lutsk, Ukraine, Springer Nature Switzerland AG*, pp. 418- 429. DOI: [https://doi.org/10.1007/978-3-030-22365-6\\_42](https://doi.org/10.1007/978-3-030-22365-6_42). (Scopus)

34. Kurpe, Oleksandr., Kukhar, Volodymyr., Puzyr, Ruslan., Burko, Vadym., Balalayeva, Elena., Klimov, Eduard. (2020), “Electric Motors Power Modes at Synchronization of Roughing Rolling Stands of Hot Strip Mill”, *25th IEEE International Conference on Problems of Automated Electric Drive. Theory and Practice. Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University, Ukraine*, pp. 510-513. DOI: 10.1109/PAEP49887.2020.9240818. (Scopus)

*Публікації у виданнях, що не входять до переліку фахових:*

35. Кухар, В.В., Курпе, О.Г. (2018), “Розробка технології виробництва листового прокату товщиною 4 мм на стані 3200 заводу Trametel SpA”, *Металургическая и горнорудная промышленность*, № 2, сс. 24-29.

36. Капланов, В.И., Володарский, В.В., Курпе, А.Г., Носоченко, А.О., Сагиров, Р.И., Ганошенко, И.В., Матросов, Ю.И. (2007), “Исследование прочностных свойств стали категории прочности X70 и X80”, *Производство проката. Москва: Наука и Технологии*, №2, сс. 7-10.

37. Капланов, В.И., Курпе, А.Г., Володарский, В.В., Сагиров, Р.И. (2007), “Анализ математической модели технологического процесса прокатки на стане 3600 ОАО «МК «Азовсталь»”, *Производство проката. Москва: Наука и Технологии*, № 8, сс. 12-14.



## Наукові праці апробаційного характеру:

38. Капланов, В.И., Курпе, А.Г. (2009), “Усовершенствованная зависимость для определения пластических свойств стали категории прочности Х70”, *Университетская наука – 2009: тез. докл. Междунар. науч.-техн. конф., ПГТУ, Мариуполь*, сс. 156-157.

39. Курпе, А.Г. (2010), “Освоение производства рулонного проката для труб на стане Стеккеля”, *Университетская наука – 2010: тез. докл. Междунар. науч.-техн. конф., ПГТУ, Мариуполь, т. 1*, сс. 158-159.

40. Курпе, А.Г. (2010), “Проектирование технологии производства рулонного проката для труб на стане Стеккеля”, *Труды восьмого конгресса прокатчиков. МОО «Объединение прокатчиков», ОАО «Магнитогорский металлургический комбинат», ГОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.Н. Носова». Магнитогорск, т. 2*, сс. 123-130.

41. Капланов, В.И., Курпе, А.Г., Змазнева, Е.В. (2011), “Особенности проектирования технологии прокатки рулонов на стане Стеккеля”, *Университетская наука – 2011: тез. докл. Междунар. науч.-техн. конф. Металлургический факультет, ПГТУ, Мариуполь*, сс. 144-145.

42. Курпе, А.Г., Змазнева, Е.В. (2018), “Анализ режимов деформации на стане Стеккеля”, *Университетская наука – 2012: тез. докл. Междунар. науч.-техн. конф., ПГТУ, Мариуполь, т. 1*, сс. 236-237.

43. Курпе, О.Г., Кухар, В.В., Присяжний, А.Г. (2018), “Перевірка математичної моделі процесу прокатки на стані Стеккеля щодо умов заводу Feeriera Valsider SpA”, *Теоретичні та практичні проблеми в обробці металів тиском і якості фахової освіти: «Київський політехнічний інститут»: матеріали 9 міжнародної технічної конференції*, сс. 152-156.

44. Курпе, А.Г., Кухар, В.В., Березка, В.В. (2018), “Уточненная методика расчета изменения температуры раската при прокатке на стане Стеккеля”. *Сучасні технології в механіці: збірник наукових праць*. Укл. Скиба М. Є., Олександренко В. П., ФОП Мельник А. А., Хмельницький, сс. 11-13.

45. Курпе, О.Г., Кухар, В.В. (2019), “Математична модель зміни температурного поля смуги перед прокаткою на стані Стеккеля”, *Перспективи розвитку машинобудування та транспорту: тези I Міжнар. наук.-техн. конф. Вінниця: ВНТУ*, сс. 88-89.

46. Курпе, О.Г., Кухар, В.В. (2019), “Оцінка впливу конвекційного теплообміну в розрахунках зміни температурного поля смуги при термомеханічній прокатці”, *Теоретичні та практичні проблеми в обробці матеріалів тиском і якості фахової освіти: тези X Міжнар. наук.-техн. конф. КПІ ім. Ігоря Сікорського, Херсонський національний технічний університет. Київ-Херсон*, сс. 65-66.

47. Курпе, О.Г., Кухар, В.В. (2019), “Математичне моделювання зміни температурного поля смуги на стані Стеккеля”, *Ресурсозбереження та енергоефективність процесів і обладнання обробки тиском у машинобудуванні та металургії: Матеріали XI Міжнар. наук.-техн. конф., Харків*, сс. 88-89.

48. Курпе, А.Г., Негрий, С.Д. (2014), “Оптимизация параметров прокатки полос в черновой группе ЛПЦ-1700”, *Университетская наука – 2014: тез. докл. Междунар. науч.-техн. конф., ПГТУ, Мариуполь, т. 1*, сс. 158-159.

49. Курпе, А.Г., Негрий, С.Д., Изотов, Б.В., Васильченко, С.Е. (2015), “Расширение транзитного сортамента горячекатаных рулонов в ЛПЦ-1700”, *Университетская наука – 2015: тез. докл. Междунар. науч.-техн. конф., ПГТУ, Мариуполь*, сс. 126-127.

50. Курпе, А.Г., Негрий, С.Д., Чабан, В.В., Изотов, Б.В., Лаштун, А.И., Коткова, Е.Ю., Кшевицкая, Т.С., Литовчук, В.В., Шаламов, Ю.Н. (2015), “Освоение технологии нагрева слябов толщиной 250 мм в нагревательных колодцах ЛПЦ-1700”, *Университетская наука – 2015: тез. докл. Междунар. науч.-техн. конф., ПГТУ, Мариуполь*, сс. 175-176.

51. Шаламов, Ю.Н., Курпе, А.Г., Изотов, Б.В., Лаштун, А.И., Литовчук, В.В., Васильченко, С.Е., Негрий, С.Д., Медведев, В.В. (2017), “Освоение и развитие технологии нагрева непрерывнолитых слябов толщиной 250 мм в теплотехнических агрегатах ЛПЦ-1700 ЧАО «ММК им. Ильича»”, *Университетская наука – 2017: тез. докл. Междунар. науч.-техн. конф., ПГТУ, Мариуполь, т. 1*, сс. 213-214.

52. Шаламов, Ю.Н., Курпе, А.Г., Изотов, Б.В., Лаштун, А.И., Коткова, Е.Ю., Негрий, С.Д. (2017), “Разработка модели нормирования расхода топлива, функционирующей в рамках системы энергетического менеджмента ISO 50001:2011, на примере методических печей ЛПЦ-1700 ЧАО «ММК им. Ильича»”, *Университетская наука – 2017: тез. докл. Междунар. науч.-техн. конф., ПГТУ, Мариуполь, т. 1*, сс. 214-215.

53. Курпе, О.Г., Кухар, В.В., Глебова, Ю.М., Березка, В.В. (2018), “Розрахунок втрат температури розкату на безперервних листових станах гарячої прокатки при використанні установки COILBOX”, *Университетская наука – 2018: тез. докл. Междунар. науч.-техн. конф., ГВУЗ «ПГТУ», Мариуполь, т. 1*, сс. 114-115.

54. Курпе, А.Г., Горлаков, А.Б. (2010), “Перспективные требования к сталям и листовому прокату для изготовления труб магистральных газонефтепроводов и их реализация в условиях ОАО «МК «Азовсталь»”, *Университетская наука – 2010: тез. докл. Междунар. науч.-техн. конф., ПГТУ, Мариуполь, т. 1*, сс. 159-160.

55. Курпе, А.Г., Негрий, С.Д., Васильченко, С.Е. (2016), “Термомеханическая прокатка рулонов на стане 1700”, *Университетская наука – 2016: тез. докл. Междунар. науч.-техн. конф., ПГТУ, Мариуполь*, сс. 109-110.

56. Курпе, А.Г., Шебаниц, О.Н. Васильченко, С.Е. (2017), “Освоение технологии производства рулонов для труб по API-5L на стане ЛПЦ-1700”, *Университетская наука – 2017: тез. докл. Междунар. науч.-техн. конф., ПГТУ, Мариуполь, т. 1*, сс. 195- 196.

57. Курпе, О.Г., Кухар, В.В., Шебаниц, О.М. (2018), “Виробництво дослідної партії та оцінка якості рулонів з марки сталі S355MC на стані 1700 ПРАТ «ММК ІМЕНІ ІЛІЧА»”, *Машина і пластична деформація металу: тез. IV Междунар. науч.-техн. конф. Кам'янське, Дніпро: Дніпровський державний технічний університет НТУ «Дніпровська політехніка»*, сс. 22-23.

58. Kurpe, O., Kukhar, V., Shebanits, O. (2018), “Development of pilot batch and grade estimation of coils of steel grade S355MC at rolling mill "1700", PJSC "ILYICH IRON AND STEEL WORKS", *Physical & Chemical Geotechnologies – 2018: Materials of the International Scientific & Practical Conference (Program of report) = Фізико-хімічні геотехнології – 2018: Матеріали міжнар. наук.-практ. конф. (програма виступів), м. Дніпро, 10-11 жовтня 2018 р. / ред. кол.: Р.О. Дичковський, О.М. Шашенко, П.Б. Саїк, В.Г. Лозинський. Дніпро: НТУ «Дніпровська політехніка»*, сс. 107-109.

59. Kurpe, O., Kukhar, V., Klimov, E., Chernenko, S., Balalayeva, E. (2019), “Implementation of Pipe Steel Grade X52M Manufacturing according to API-5L Requirements Applied to Hot Rolling Mills "1700", *The Innovation Exchange: 2<sup>nd</sup> International Conference on Design, Simulation, Manufacturing. Book of Abstracts (June 11-14, 2019 y.), Lutsk, Ukraine*, p. 101.

60. Курпе, А.Г. (2012), “Опробование технологии термомеханической прокатки листов из судостали на стане 3600”, *Университетская наука – 2012: тез. докл. Междунар. науч.-техн. конф., ПГТУ, Мариуполь, т. 1*, сс. 236-237.

61. Зинченко, Ю.А., Курпе, А.Г, Багмет, О.А. (2009), “Перспективы развития технологии производства штрипса в ОАО «МК «Азовсталь»”, *Современные тенденции разработки и производства сталей и труб для магистральных газонефтепроводов: Сб. докладов, Металлургиздат, Москва*, сс. 76-77.

62. Курпе, О.Г. , Кухар, В.В. , Захаров, М.П. , Пертік, Д.І. (2019), “Розробка та відпрацювання технології термомеханічної контрольованої прокатки рулонної сталі за європейськими Стандартами”, *Університетська наука – 2019: тези доп. Міжнар. науково-техн. конф., ПДТУ, Мариуполь, т.1*, сс. 39-41.

63. Курпе, О.Г., Кухар, В.В., Мирвода, К.Ю., Пертік, Д.І., Захаров, М.П. (2019), “Досягнення показників якості рулонного металопрокату зі сталей за Європейськими Стандартами, що вироблені в умовах НШПС 1700”, *Університетська наука – 2019: тези доп. Міжнар. науково–техн. конф., ПДТУ, Мариуполь, т.1*, с. 41.

64. Кухар, В.В., Курпе, О.Г., Захаров, М.П., Калатало, А.В. (2020), “Недоліки та перспективи розвитку технології та устаткування ширококутових станів гарячої прокатки”, *Університетська наука – 2020: тези доп. Міжнар. науково–техн. конф., ПДТУ, Мариуполь, т.1*, сс. 56–57.

Опубліковані праці, які додатково відображають наукові результати дисертації:

65. Лівшиц, Д.А., Зінченко, Ю.А., Шахпазов, Є.Х., Матросов, Ю.І., Ганошенко, І.В., Гоман, С.В., Шалімов, С.Я., Кумуржи, Є.В., Володарський, В.В., Лоскутов, О.Ю., Койфман, О.А., Курпе, О.Г. (2012), “Спосіб виробництва сталевих високоміцних електрозварних одношовних труб великого діаметра для магистральних трубопроводів”, *пат. 98214 Україна: МПК (2012.01), В21С 37/08 (2006.01) В21В 1/32 (2006.01) С22С 38/00 С21D 8/02 (2006.01) С21D 8/10 (2006.01) В23К 9/025 (2006.01), № а 2010 11473; заявл. 27.09.2010; опубл. 25.04.2012, Бюл. № 8. (патент на винахід).*

66. Лівшиц, Д.А., Зінченко, Ю.А., Шахпазов, Є.Х., Матросов, Ю.І., Ганошенко, І.В., Гоман, С.В., Шалімов, С.Я., Кумуржи, Є.В., Володарський, В.В., Лоскутов, О.Ю., Койфман, О.А., Курпе, О.Г. (2011), “Спосіб виробництва сталевих високоміцних електрозварних двошовних труб великого діаметра для магістральних трубопроводів”, *пат. 96097 Україна: МПК (2011.01), B21C 37/08 (2006.01) C22C 38/00 C21D 1/00 B21B 1/22 (2006.01) B23K 9/00, № a201011469; завл. 27.09.2010; опубл. 26.09.2011, Бюл. № 18. (патент на винахід).*

67. Лівшиц, Д.А., Третьяков, О.Б., Ковура, О.Б., Зінченко, Ю.А., Кумуржи, Є.В., Чубань, А.М., Койфман, О.А., Курпе, О.Г., Змазнева, Є.В. (2010), “Спосіб нагрівання і підготовки заготовок перед прокаткою у станах гарячої прокатки”, *пат. 92950 Україна: МПК C21D 9/00, F27B 9/00, F27B 9/30, F27D 3/00, № a 2009 00161; заявл. 09.01.2009; опубл. 27.12.2010, Бюл. № 24. (патент на винахід).*

68. Зінченко, Ю.А., Пісмарьов, К.Є., Курпе, О.Г., Мурашкін, О.В., Васильченко, С.Є., Меркулова, Н.О., Чаленко, О.Г., Негрій, С.Д., Куліш, С.В. (2016), “Спосіб виробництва гарячекатаного прокату підвищеної міцності”, *пат. 110812 Україна: МПК B21B 1/46 (2006.01), № u 2016 03353; заявл. 31.03.2016; опубл. 25.10.2016, Бюл. № 20. (патент на корисну модель).*

69. Зінченко, Ю.А., Пісмарьов, К.Є., Курпе, О.Г., Мурашкін, О.В., Васильченко, С.Є., Меркулова, Н.О., Чаленко, О.Г., Негрій, С.Д., Куліш, С.В. (2017), “Спосіб виробництва гарячекатаного прокату підвищеної міцності”, *пат. 121374 Україна: МПК B21B 1/46 (2006.01), № u 2017 01785; заявл. 24.02.2017; опубл. 11.12.2017, Бюл. № 23. (патент на корисну модель).*

70. Зінченко, Ю.А., Пісмарьов, К.Є., Курпе, О.Г., Змазнева, Є.В. (2017), “Спосіб визначення параметрів прокатки рулонів на стані Стеккеля”, *пат. 117875 Україна: МПК B21B 1/26 (2006.01), № u 2017 01099; заявл. 06.02.2017; опубл. 10.07.2017, Бюл. № 13. (патент на корисну модель).*

71. Зінченко, Ю.А., Пісмарьов, К.Є., Курпе, О.Г., Бердник, В.П., Ізотов, Б.В., Лаштун, А.І., Кшевицька, Т.С., Негрій, С.Д., Чабан, В.В. (2016), “Кришка рекуперативного нагрівального колодязя”, *пат. 109260 Україна: МПК С21D 9/70, № и 2015 12829; заявл. 25.12.2015; опубл. 25.08.2016*, Бюл. № 16. (патент на корисну модель).

72. Зінченко, Ю.А., Пісмарьов, К.Є., Курпе, О.Г., Мурашкін, О.В., Васильченко, С.Є., Горбачов, І.А., Чаленко, О.Г., Бердник, В.П., Ізотов, Б.В., Лаштун, А.І., Негрій, С.Д., Кочура, О.О. (2016), “Спосіб редукування безперервнолитих заготовок”, *пат. 109976 Україна: МПК В21В 1/02, № и 2016 00859; заявл. 08.02.2016; опубл. 26.09.2016*, Бюл. № 18. (патент на корисну модель).

73. Зінченко, Ю.А., Пісмарьов, К.Є., Курпе, О.Г., Негрій, С.Д., Медведєв, В.В., Ізотов, Б.В., Лаштун, А.І., Коткова, О.Ю. (2016), “Методична штовхальна піч”, *пат. 113959 Україна: МПК F27В 9/00, F27В 9/10, F27В 9/20, F27В 9/22, F27В 9/28, № и 2016 08057; заявл. 20.07.2016; опубл. 27.02.2017*, Бюл. № 04. (патент на корисну модель).

74. Зінченко, Ю.А., Пісмарьов, К.Є., Курпе, О.Г., Годинський, О.А., Левтерова, І.А., Олійник, В.В. (2017), “Трубоелектрозварювальний стан”, *пат. 113589 Україна: МПК В21С 37/08, № и 2016 06688; заявл. 21.06.2016; опубл. 10.02.2017*, Бюл. № 03. (патент на корисну модель).

75. Лівшиц, Д.А., Ковура, О.Б., Зінченко, Ю.А., Ганошенко, І.В., Койфман, О.А., Володарський, В.В., Курпе, О.Г., Капланов, В.І. (2009), “Спосіб визначення параметрів прокатки товстих листів”, *пат. 41713 Україна: МПК В21В 1/26, № и 2008 11407; заявл. 22.09.2008; опубл. 10.06.2009*, Бюл. № 11. (патент на корисну модель).

76. Лівшиц, Д.А., Третьяков, О.Б., Шахпазов, Є.Х., Матросов, Ю.І., Гоман, С.В., Кумуржи, Є.В., Володарський, В.В., Багмет, О.О., Курпе, О.Г., Койфман, О.А., Ганошенко, І.В. (2010), “Спосіб виробництва прокату методом багатостадійної контрольованої прокатки”, *пат. 54343 Україна: МПК В21В 1/22, С21D 1/00, С22С 38/00, № и 2010 03966; заявл. 06.04.2010; опубл. 10.11.2010*, Бюл. № 21. (патент на корисну модель).

77. Лівшиц, Д.А., Третьяков, О.Б., Шахпазов, Є.Х., Матросов, Ю.І., Гоман, С.В., Ганошенко, І.В. Кумуржи, Є.В., Володарський, В.В., Курпе, О.Г., Койфман, О.А., Очеретін, В.М. (2010), “Спосіб виробництва прокату методом багатостадійної термодифузної обробки”, *пат. 54506 Україна: МПК С21D 3/00, С21D 1/00, № и 2010 06311; заявл. 25.05.2010; опубл. 10.11.2010*, Бюл. № 21. (патент на корисну модель).

78. Лівшиц, Д.А., Третьяков, О.Б., Шахпазов, Є.Х., Матросов, Ю.І., Гоман, С.В., Ганошенко, І.В. Кумуржи, Є.В., Володарський, В.В., Курпе, О.Г., Койфман, О.А., Очеретін, В.М. (2010), “Спосіб виробництва прокату методом багатостадійної термодифузної обробки”, *пат. 54507 Україна: МПК С21D 3/00, С21D 1/00, № и 2010 06313; заявл. 25.05.2010; опубл. 10.11.2010*, Бюл. № 21. (патент на корисну модель).

79. Лівшиц, Д.А., Третьяков, О.Б., Шахпазов, Є.Х., Матросов, Ю.І., Гоман, С.В., Ганошенко, І.В. Кумуржи, Є.В., Володарський, В.В., Курпе, О.Г., Койфман, О.А., Чубань, А.М. (2011), “Спосіб виробництва прокату методом нормалізуючої прокатки”, *пат. 56651 Україна: МПК С21D 8/00, В21В 1/22, С22С 38/00, № и 2010 07248; заявл. 11.06.2010; опубл. 25.01.2011*, Бюл. № 2. (патент на корисну модель).



## Додаток Б

**Апробація результатів дисертації**

Основні положення роботи, наукові та практичні результати доповідалися та обговорювалися на наукових конференціях та семінарах серед яких:

- Міжнародна конференція (МК) ФГУП «ЦНИИЧермет імені І. П. Бардина» «Сучасні тенденції розробки та виробництва сталей і труб для магістральних газів та нафтопроводів» (Москва, 2008 р.), очна форма участі, з доповіддю;

- Міжнародна науково-технічна конференція (МНТК) «Университетская наука – 2009–2012, 2014–2020» (Маріуполь, 2009–2012 рр., 2014–2020 рр.), очна форма участі, з доповіддю;

- VIII Конгрес прокатників (Магнітогорськ, 2010 р.), очна форма участі, з доповіддю;

- 9 Міжнародна технічна конференція «Теоретичні та практичні проблеми в обробці металів тиском і якості фахової освіти» (Київ, 2018 р.), заочна форма участі;

- IV МНТК «Машини і пластична деформація металу» (Кам'янське, Дніпро, 2018 р.), заочна форма участі;

- Міжнародна науково-практична конференція «Фізико-хімічні геотехнології» (Дніпро, 2018 р.), заочна форма участі;

- Наукова конференція «Сучасні технології в механіці» (Хмельницький, 2018 р.), заочна форма участі;

- I МНТК «Перспективи розвитку машинобудування та транспорту» (Вінниця, 2019 р.), заочна форма участі;

- X МНТК «Теоретичні та практичні проблеми в обробці матеріалів тиском і якості фахової освіти» (Київ-Херсон, 2019 р.), заочна форма участі;

- XI МНТК «Ресурсозбереження та енергоефективність процесів і обладнання обробки тиском у машинобудуванні та металургії» (Харків, 2019 р.), заочна форма участі;

- 2<sup>nd</sup> International Conference on Design, Simulation, Manufacturing «The Innovation Exchange» (Lutsk, Ukraine, 2019 p.), очна форма участі, з доповіддю;
- XXIII МНТК «Достижения и проблемы развития технологии и машин обработки давлением» (Краматорськ, 2020 p.), дисертацію докладено в повному обсязі;
- Науковий семінар кафедри ОМТ ДВНЗ «ПДТУ» (Маріуполь, 2020 p), дисертацію докладено в повному обсязі;
- Засідання Придніпровського наукового семінару при кафедрі ОМТ НМетАУ (2020), дисертацію докладено в повному обсязі.



Продовж. табл. В.1

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	
	S235J0	≤16	≤0,17	-	≤1,40	≤0,030	≤0,030	-	-	-	-	-	-	-	≤0,55	≤0,012	-	
		>16≤40	≤0,17															
		>40	≤0,17															
EN 10025-2	S235J2	≤16	≤0,17	-	≤1,40	≤0,025	≤0,025	-	-	-	-	-	-	-	≤0,55	-	-	
		>16≤40	≤0,17															
		>40	≤0,17															
	S275JR	≤16	≤0,21	-	≤1,50	≤0,035	≤0,035	-	-	-	-	-	-	-	-	≤0,55	≤0,012	-
		>16≤40	≤0,21															
		>40	≤0,21															
	S275J0	≤16	≤0,18	-	≤1,50	≤0,030	≤0,030	-	-	-	-	-	-	-	-	≤0,55	≤0,012	-
		>16≤40	≤0,18															
		>40	≤0,18															
	S275J2	≤16	≤0,18	-	≤1,50	≤0,025	≤0,025	-	-	-	-	-	-	-	-	≤0,55	-	-
		>16≤40	≤0,18															
		>40	≤0,18															
	S355JR	≤16	≤0,24	≤0,55	≤1,60	≤0,035	≤0,035	-	-	-	-	-	-	-	-	≤0,55	≤0,012	-
		>16≤40	≤0,24															
		>40	≤0,24															
	S355J0	≤16	≤0,20	≤0,55	≤1,60	≤0,030	≤0,030	-	-	-	-	-	-	-	-	≤0,55	≤0,012	-
		>16≤40	≤0,20															
		>40	≤0,22															
	S355J2	≤16	≤0,20	≤0,55	≤1,60	≤0,025	≤0,025	-	-	-	-	-	-	-	-	≤0,55	-	-
		>16≤40	≤0,20															
		>40	≤0,22															
	S355K2	≤16	≤0,20	≤0,55	≤1,60	≤0,025	≤0,025	-	-	-	-	-	-	-	-	≤0,55	-	-
		>16≤40	≤0,20															
		>40	≤0,22															

<sup>a</sup> Al загальний; <sup>b</sup> Сума Nb, V, Ti повинна не перевищувати 0,22%; <sup>c</sup> В таблиці вказано основні хімічні елементи відповідно до стандартів. Вміст додаткових хімічних елементів вказано у відповідних стандартах; «-» вміст хімічного елементу не регламентується

**Порівняння вимог до вуглецевого еквіваленту конструкційних марок сталі, що виробляються по різних технологіях**

Нормативний документ	Марка сталі / параметр	Максимальний вуглецевий еквівалент, СЕ, %				
1	2	3				
EN 10025-4	товщина прокату, мм	≤16	>16≤40	>40≤63	>63≤120	-
	S275M	0,34	0,34	0,35	0,38	
	S275ML					
	S355M	0,39	0,39	0,40	0,45	
	S355ML					
	S420M	0,43	0,45	0,46	0,47	
	S420ML					
	S460M	0,45	0,46	0,47	0,48	
S460ML						
EN 10149-2 <sup>a</sup>	товщина прокату, мм	всі товщини відповідно до марки сталі				
	S315MC	0,38				
	S355MC	0,41				
	S420MC	0,43				
	S460MC	0,43				
	S500MC	0,44				
	S550MC	0,46				
	S600MC	0,58				
	S650MC	0,59				
	S700MC	0,61				
	S900MC	0,81				
	S960MC	0,81				



Продовж. табл. В.3

1	2	3									4				
EN 10025-4	S420M	420	400	390	380	370	365	-	-	-	520-680	500-660	480-640	470-630	480-620
	S420ML														
	S460M	460	440	430	410	400	385	-	-	-	540-720	530-710	510-690	500-680	490-660
	S460ML														
EN 10149-2	товщина прокату, мм	всі товщини відповідно до марки сталі									всі товщини відповідно до марки сталі				
	S315MC	315									390-510				
	S355MC	355									430-550				
	S420MC	420									480-620				
	S460MC	460									520-670				
	S500MC	500									550-700				
	S550MC	550									600-760				
	S600MC	600									650-820				
	S650MC	650									700-880				
	S700MC	700									750-950				
	S900MC	900									930-1200				
	S960MC	960									980-1250				
EN 10025-2	товщина прокату, мм	≤16	>16 ≤40	>40 ≤63	>63 ≤80	>80 ≤100	>100 ≤150	>150 ≤200	>200 ≤250	>250 ≤400	<3	≥3 ≤100	>100 ≤150	>150 ≤250	>250 ≤400
	S235JR	235	225	215	215	215	195	185	175	-	360-510	360-510	350-500	340-490	-
	S235J0	235	225	215	215	215	195	185	175	-	360-510	360-510	350-500	340-490	-
	S235J2	235	225	215	215	215	195	185	175	165	360-510	360-510	350-500	340-490	330-480
	S275JR	275	265	255	245	235	225	215	205	-	430-580	410-560	400-540	380-540	-
	S275J0	275	265	255	245	235	225	215	205	-	430-580	410-560	400-540	380-540	-

Продовж. табл. В.3

1	2	3									4				
	S275J2	275	265	255	245	235	225	215	205	195	430-580	410-560	400-540	380-540	380-540
	S355JR	355	345	335	325	315	295	285	275	-	510-680	470-630	450-600	450-600	-
	S355J0	355	345	335	325	315	295	285	275	-	510-680	470-630	450-600	450-600	-
	S355J2	355	345	335	325	315	295	285	275	265	510-680	470-630	450-600	450-600	450-600
	S355K2	355	345	335	325	315	295	285	275	265	510-680	470-630	450-600	450-600	450-600

Таблиця В.4

**Порівняння розрахованого показника  $\sigma_T/\sigma_B$  для конструкційних марок сталі, що виробляються по різних технологіях**

Нормативний документ	Марка сталі / параметр	Максимальне співвідношення $\sigma_T/\sigma_B^a$								
		3								
1	2	3								
EN 10025-4	товщина прокату, мм	≤16	>16 ≤40	>40 ≤63	>63 ≤80	>80 ≤100	>100 ≤120	-	-	-
	S275M	0,74	0,72	0,71	0,70	0,70	0,69	-	-	-
	S275ML									
	S355M	0,76	0,73	0,74	0,74	0,74	0,74	-	-	-
	S355ML									
	S420M	0,81	0,77	0,78	0,79	0,79	0,76	-	-	-
	S420ML									
	S460M	0,85	0,81	0,81	0,80	0,80	0,79	-	-	-
S460ML										



Продовж. табл. В.4

1	2	3								
EN 10149-2	товщина прокату, мм	всі товщини відповідно до марки сталі								
	S315MC	0,81								
	S355MC	0,83								
	S420MC	0,88								
	S460MC	0,88								
	S500MC	0,91								
	S550MC	0,92								
	S600MC	0,92								
	S650MC	0,93								
	S700MC	0,93								
	S900MC	0,97								
	S960MC	0,98								
	EN 10025-2	товщина прокату, мм	≤16	>16 ≤40	>40 ≤63	>63 ≤80	>80 ≤100	>100 ≤150	>150 ≤200	>200 ≤250
S235JR		0,65	0,63	0,60	0,60	0,60	0,57	0,54	0,51	-
S235J0		0,65	0,63	0,60	0,60	0,60	0,57	0,54	0,51	-
S235J2		0,65	0,63	0,60	0,60	0,60	0,57	0,54	0,51	0,50
S275JR		0,64	0,65	0,62	0,60	0,57	0,59	0,57	0,54	-
S275J0		0,64	0,65	0,62	0,60	0,57	0,59	0,57	0,54	-
S275J2		0,64	0,65	0,62	0,60	0,57	0,59	0,57	0,54	0,51
S355JR		0,70	0,73	0,71	0,69	0,67	0,66	0,63	0,61	-
S355J0		0,70	0,73	0,71	0,69	0,67	0,66	0,63	0,61	-
S355J2		0,70	0,73	0,71	0,69	0,67	0,66	0,63	0,61	0,59
S355K2		0,70	0,73	0,71	0,69	0,67	0,66	0,63	0,61	0,59

<sup>a</sup>  $\sigma_T/\sigma_B$  розраховане для мінімального рівня границі плинності та тимчасового опору відповідно до стандартів

**Порівняння вимог до відносного видовження конструкційних марок сталі, що виробляються по різних технологіях**

Нормативний документ	Марка сталі / параметр	Мінімальне відносне видовження, $\delta$ , %	
		Для випробувальних зразків довжиною $L = 80$ мм	Для випробувальних зразків довжиною $L = 5,65\sqrt{S_0^a}$ , мм
1	2	3	4
EN 10025-4	товщина прокату, мм	всі товщини	всі товщини
	S275M	для товщини < 3 мм узгоджується під час замовлення	24
	S275ML		
	S355M		22
	S355ML		
	S420M		19
	S420ML		
	S460M		17
S460ML			
EN 10149-2	товщина прокату, мм	< 3 мм	$\geq 3$ мм
	S315MC	20	24
	S355MC	19	23
	S420MC	16	19
	S460MC	14	17
	S500MC	12	14
	S550MC	12	14
	S600MC	11	13
	S650MC	10	12
	S700MC	10	12
	S900MC	7	8
	S960MC	6	7

Продовж. табл. В.5

1	2	3					4					
		$\leq 1$	$>1$ $\leq 1,5$	$>1,5$ $\leq 2$	$>2$ $\leq 2,5$	$>2,5$ $< 3$	$\geq 3$ $\leq 40$	$>40$ $\leq 63$	$>63$ $\leq 100$	$>100$ $\leq 150$	$>150$ $\leq 250$	$>250$ $\leq 400$
EN 10025-2	товщина прокату, мм											
	S235JR	15	16	17	18	19	24	23	22	22	21	-
	S235J0											-
	S235J2											21
	S275JR	13	14	15	16	17	21	20	19	19	18	-
	S275J0											-
	S275J2											18
	S355JR	12	13	14	15	16	20	19	18	18	17	-
	S355J0											-
	S355J2											17
S355K2	17											

<sup>a</sup>S<sub>0</sub> – площа перерізу зразка що випробовується

Таблиця В.6

**Порівняння вимог до енергії удару, випробування на поздовжніх зразках, конструкційних марок сталі, що виробляються по різних технологіях**

Нормативний документ	Марка сталі / параметр	Товщина, мм	Мінімальне значення енергії удару, KV, Дж, при температурах випробувань, °C						
			+20	0	-10	-20	-30	-40	-50
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
EN 10025-4	S275M	всі товщини	55	47	43	40	-	-	-
	S275ML		63	55	51	47	40	31	27
	S355M		55	47	43	40	-	-	-
	S355ML		63	55	51	47	40	31	27
	S420M		55	47	43	40	-	-	-
	S420ML		63	55	51	47	40	31	27

Продовж. табл. В.6

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
EN 10025-4	S460M	всі товщини	55	47	43	40	-	-	-
	S460ML		63	55	51	47	40	31	27
EN 10149-2 <sup>a</sup>	S315MC	всі товщини				40		27	
	S355MC					40		27	
	S420MC					40		27	
	S460MC					40		27	
	S500MC					40		27	
	S550MC					40		27	
	S600MC					40		27	
	S650MC					40		27	
	S700MC					40		27	
	S900MC					40		27	
	S960MC					40		27	
EN 10025-2	S235JR	всі товщини	27						
	S235J0			27					
	S235J2					27			
	S275JR		27						
	S275J0			27					
	S275J2					27			
	S355JR		27						
	S355J0			27					
	S355J2						27		
	S355K2		≤150				40		
	S355K2		>150 ≤250				33		

<sup>a</sup> при узгодженні випробувань із замовником

**Порівняння хімічного складу сталей для труб різноманітного призначення**

Нормативний документ	Рівень якості	Марка сталі	Товщина, мм	Вміст хімічних елементів, %															CE, % <sup>i</sup>	CE <sub>Pcm</sub> , % <sup>i</sup>
				C	Si	Mn	P	S	V	Nb	Ti	Al	Cr	Ni	Mo	Cu	N	B		
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21
API-5L	PSL 1	A25	≤ 25,0	≤0,21	-	≤0,60	≤0,030	≤0,030	-	-	-	-	≤0,50	≤0,50	≤0,15	≤0,50	-	≤0,001	-	-
		A25P		≤0,21	-	≤0,60	0,045-0,080	≤0,030	-	-	-	-	≤0,50	≤0,50	≤0,15	≤0,50	-	≤0,001	-	-
		A		≤0,22	-	≤0,90	≤0,030	≤0,030	-	-	-	-	≤0,50	≤0,50	≤0,15	≤0,50	-	≤0,001	-	-
		B		≤0,26	-	≤1,20	≤0,030	≤0,030	Nb+V≤0,06; Nb+V+Ti≤0,15		-	≤0,50	≤0,50	≤0,15	≤0,50	-	≤0,001	-	-	
		X42		≤0,26	-	≤1,30	≤0,030	≤0,030	Nb+V+Ti≤0,15		-	≤0,50	≤0,50	≤0,15	≤0,50	-	≤0,001	-	-	
		X46		≤0,26	-	≤1,40	≤0,030	≤0,030	Nb+V+Ti≤0,15		-	≤0,50	≤0,50	≤0,15	≤0,50	-	≤0,001	-	-	
		X52		≤0,26	-	≤1,40	≤0,030	≤0,030	Nb+V+Ti≤0,15		-	≤0,50	≤0,50	≤0,15	≤0,50	-	≤0,001	-	-	
		X56		≤0,26	-	≤1,40	≤0,030	≤0,030	Nb+V+Ti≤0,15		-	≤0,50	≤0,50	≤0,15	≤0,50	-	≤0,001	-	-	
		X60		≤0,26	-	≤1,40	≤0,030	≤0,030	Nb+V+Ti≤0,15		-	≤0,50	≤0,50	≤0,15	≤0,50	-	≤0,001	-	-	
		X65		≤0,26	-	≤1,45	≤0,030	≤0,030	Nb+V+Ti≤0,15		-	≤0,50	≤0,50	≤0,15	≤0,50	-	≤0,001	-	-	
	X70	≤0,26	-	≤1,65	≤0,030	≤0,030	Nb+V+Ti≤0,15		-	≤0,50	≤0,50	≤0,15	≤0,50	-	≤0,001	-	-			
	PSL 2	BR	≤0,24	≤0,40	≤1,20	≤0,025	≤0,015	Nb+V≤0,06		≤0,04	-	≤0,30	≤0,30	≤0,15	≤0,50	-	≤0,001	≤0,43	≤0,25	
		X42R	≤0,24	≤0,40	≤1,20	≤0,025	≤0,015	≤0,06	≤0,05	≤0,04	-	≤0,30	≤0,30	≤0,15	≤0,50	-	≤0,001	≤0,43	≤0,25	
		BN	≤0,24	≤0,40	≤1,20	≤0,025	≤0,015	Nb+V≤0,06		≤0,04	-	≤0,30	≤0,30	≤0,15	≤0,50	-	≤0,001	≤0,43	≤0,25	
		X42N	≤0,24	≤0,40	≤1,20	≤0,025	≤0,015	≤0,06	≤0,05	≤0,04	-	≤0,30	≤0,30	≤0,15	≤0,50	-	≤0,001	≤0,43	≤0,25	
		X46N	≤0,24	≤0,40	≤1,40	≤0,025	≤0,015	≤0,07	≤0,05 <sup>a</sup>	≤0,04	-	≤0,30	≤0,30	≤0,15	≤0,50	-	≤0,001	≤0,43	≤0,25	
		X52N	≤0,24	≤0,45	≤1,40	≤0,025	≤0,015	≤0,10	≤0,05 <sup>a</sup>	≤0,04	-	≤0,30	≤0,30	≤0,15	≤0,50	-	≤0,001	≤0,43	≤0,25	
		X56N	≤0,24	≤0,45	≤1,40	≤0,025	≤0,015	≤0,10	≤0,05 <sup>a</sup>	≤0,04	-	≤0,30	≤0,30	≤0,15	≤0,50	-	≤0,001	≤0,43	≤0,25	
		X60N	≤0,24	≤0,45	≤1,40	≤0,025	≤0,015	≤0,10	≤0,05 <sup>a</sup>	≤0,04	-	≤0,50	≤0,50	≤0,50	≤0,50	-	≤0,001	по узгодженню		
BQ		≤0,18	≤0,45	≤1,40	≤0,025	≤0,015	≤0,05	≤0,05	≤0,04	-	≤0,30	≤0,30	≤0,15	≤0,50	-	≤0,001	≤0,43	≤0,25		
X42Q		≤0,18	≤0,45	≤1,40	≤0,025	≤0,015	≤0,05	≤0,05	≤0,04	-	≤0,30	≤0,30	≤0,15	≤0,50	-	≤0,001	≤0,43	≤0,25		
X46Q	≤0,18	≤0,45	≤1,40	≤0,025	≤0,015	≤0,05	≤0,05	≤0,04	-	≤0,30	≤0,30	≤0,15	≤0,50	-	≤0,001	≤0,43	≤0,25			

Продовж. табл. В.7

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21
API-5L	PSL 2	X52Q	≤ 25,0	≤0,18	≤0,45	≤1,50	≤0,025	≤0,015	≤0,05	≤0,05	≤0,04	-	≤0,30	≤0,30	≤0,15	≤0,50	-	≤0,001	≤0,43	≤0,25
		X56Q		≤0,18	≤0,45	≤1,50	≤0,025	≤0,015	≤0,07	≤0,05 <sup>a</sup>	≤0,04	-	≤0,30	≤0,30	≤0,15	≤0,50	-	≤0,001	≤0,43	≤0,25
		X60Q		≤0,18	≤0,45	≤1,70	≤0,025	≤0,015	Nb+V+Ti≤0,15		-	≤0,50	≤0,50	≤0,50	≤0,50	-	≤0,001	≤0,43	≤0,25	
		X65Q		≤0,18	≤0,45	≤1,70	≤0,025	≤0,015	Nb+V+Ti≤0,15		-	≤0,50	≤0,50	≤0,50	≤0,50	-	≤0,001	≤0,43	≤0,25	
		X70Q		≤0,18	≤0,45	≤1,80	≤0,025	≤0,015	Nb+V+Ti≤0,15		-	≤0,50	≤0,50	≤0,50	≤0,50	-	≤0,001	≤0,43	≤0,25	
		X80Q		≤0,18	≤0,45	≤1,90	≤0,025	≤0,015	Nb+V+Ti≤0,15		-	≤0,50	≤1,00	≤0,50	≤0,50	-	≤0,004	по узгодженню		
		BM		≤0,22	≤0,45	≤1,20	≤0,025	≤0,015	≤0,05	≤0,05	≤0,04	-	≤0,30	≤0,30	≤0,15	≤0,50	-	≤0,001	≤0,43	≤0,25
		X42M		≤0,22	≤0,45	≤1,30	≤0,025	≤0,015	≤0,05	≤0,05	≤0,04	-	≤0,30	≤0,30	≤0,15	≤0,50	-	≤0,001	≤0,43	≤0,25
		X46M		≤0,22	≤0,45	≤1,30	≤0,025	≤0,015	≤0,05	≤0,05	≤0,04	-	≤0,30	≤0,30	≤0,15	≤0,50	-	≤0,001	≤0,43	≤0,25
		X52M		≤0,22	≤0,45	≤1,40	≤0,025	≤0,015	Nb+V+Ti≤0,15		-	≤0,30	≤0,30	≤0,15	≤0,50	-	≤0,001	≤0,43	≤0,25	
		X56M		≤0,22	≤0,45	≤1,40	≤0,025	≤0,015	Nb+V+Ti≤0,15		-	≤0,30	≤0,30	≤0,15	≤0,50	-	≤0,001	≤0,43	≤0,25	
		X60M		≤0,12	≤0,45	≤1,60	≤0,025	≤0,015	Nb+V+Ti≤0,15		-	≤0,50	≤0,50	≤0,50	≤0,50	-	≤0,001	≤0,43	≤0,25	
		X65M		≤0,12	≤0,45	≤1,60	≤0,025	≤0,015	Nb+V+Ti≤0,15		-	≤0,50	≤0,50	≤0,50	≤0,50	-	≤0,001	≤0,43	≤0,25	
		X70M		≤0,12	≤0,45	≤1,70	≤0,025	≤0,015	Nb+V+Ti≤0,15		-	≤0,50	≤0,50	≤0,50	≤0,50	-	≤0,001	≤0,43	≤0,25	
		X80M		≤0,12	≤0,45	≤1,85	≤0,025	≤0,015	Nb+V+Ti≤0,15		-	≤0,50	≤1,00	≤0,50	≤0,50	-	≤0,001	≤0,43	≤0,25	
		X90M		≤0,10	≤0,55	≤2,10	≤0,020	≤0,010	Nb+V+Ti≤0,15		-	≤0,50	≤1,00	≤0,50	≤0,50	-	≤0,001	-	≤0,25	
X100M	≤0,10	≤0,55	≤2,10	≤0,020	≤0,010	Nb+V+Ti≤0,15		-	≤0,50	≤1,00	≤0,50	≤0,50	-	≤0,004	-	≤0,25				
X120M	≤0,10	≤0,55	≤2,10	≤0,020	≤0,010	Nb+V+Ti≤0,15		-	≤0,50	≤1,00	≤0,50	≤0,50	-	≤0,004	-	≤0,25				
ГОСТ 10705 <sup>b</sup>	B	08	≤ 10,0	0,05- 0,12	0,17- 0,37	0,35- 0,65	≤0,035	≤0,040	-	-	-	-	≤0,10	≤0,30	-	≤0,30	≤0,008	-	≤0,29 <sup>d</sup>	≤0,19 <sup>d</sup>
	B	Ст2сп		0,09- 0,15	0,15- 0,30	0,25- 0,50	≤0,035	≤0,040	-	-	-	-	≤0,10	≤0,30	-	≤0,30	≤0,008	-	≤0,29 <sup>d</sup>	≤0,21 <sup>d</sup>
	B	Ст3сп		0,14- 0,22	0,15- 0,30	0,40- 0,65	≤0,035	≤0,040	-	-	-	-	≤0,10	≤0,30	-	≤0,30	≤0,008	-	≤0,39 <sup>d</sup>	-
	B	Ст4сп		0,18- 0,27	0,15- 0,30	0,40- 0,70	≤0,040	≤0,050	-	-	-	-	≤0,30	≤0,30	-	≤0,30	≤0,010	-	≤0,49 <sup>d</sup>	-

Продовж. табл. В.7

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21
ASTM	-	A <sup>c</sup>	≥1,73	≤0,25	-	≤0,95	≤0,050	≤0,045	≤0,08	-	-	-	≤0,40	≤0,40	≤0,15	≤0,40	-	-	≤0,43 <sup>d</sup>	-
A53/ A53M	-	B <sup>c</sup>	≤59,54	≤0,30	-	≤1,20	≤0,050	≤0,045	≤0,08	-	-	-	≤0,40	≤0,40	≤0,15	≤0,40	-	-	≤0,48 <sup>d</sup>	-

«-» вміст хімічного елементу не регламентовано

<sup>a</sup> Nb+V+Ti≤0,15%<sup>b</sup> для порівняння наведені окремі марки з типовими механічними властивостями<sup>c</sup> Cu+Ni+Cr+Mo+V≤1,00%<sup>d</sup> Для стандартів ГОСТ 10705 та ASTM A53/A53M значення CE та CEPcm не регламентоване. В таблиці наведені розраховані дані згідно з п. 9.2.4 та п. 9.2.5 API-5L, що використовуються з метою порівняння<sup>i</sup> вуглецевий еквівалент CE розраховується при вмісті вуглецю >0,12%, CEPcm розраховується при вмісті вуглецю ≤0,12%, згідно з наступними залежностями:  $CE = C + \frac{Mn}{6} + \frac{(Cr+Mo+V)}{5} + \frac{(Ni+Cu)}{15}$ , та  $CEPcm = C + \frac{Si}{30} + \frac{Mn}{20} + \frac{Cu}{20} + \frac{Ni}{60} + \frac{Cr}{20} + \frac{Mo}{15} + \frac{V}{10} + 5B$  відповідно до п. 9.2.4 та п. 9.2.5 API-5L

Таблиця В.8

## Порівняння механічних властивостей сталей для труб різноманітного призначення

Нормативний документ	Рівень якості	Марка сталі	Границя плинності, $\sigma_T$ , МПа	Тимчасовий опір, $\sigma_B$ , МПа	Максимальне співвідношення $\sigma_T/\sigma_B$	Мінімальне відносне видовження, $\delta$ , % <sup>a</sup>	Мінімальне значення енергії удару, KV, Дж, при температурі випробувань, 0 °C <sup>b</sup>	Випробування на удар падаючим вантажем, DWT, при температурі 0 °C, мінімальна площа зламу, %
1	2	3	4	5	6	7	8	9
API-5L	PSL 1	A25	≥175	≥310	-	29	-	-
		A25P	≥175	≥310	-	29	-	-
		A	≥210	≥335	-	27	-	-
		B	≥245	≥415	-	23	-	-
		X42	≥290	≥415	-	23	-	-

Продовж. табл. В.8

1	2	3	4	5	6	7	8	9
API-5L	PSL 1	X46	≥320	≥435	-	22	-	-
		X52	≥360	≥460	-	21	-	-
		X56	≥390	≥490	-	19	-	-
		X60	≥415	≥520	-	18	-	-
		X65	≥450	≥535	-	18	-	-
		X70	≥485	≥570	-	17	-	-
API-5L	PSL 2	BR	245-450	415-655	0,93	23	27	85
		BN						
		BQ						
		BM						
		X42R	290-495	415-655	0,93	23	27	85
		X42N						
		X42Q						
		X42M						
		X46N	320-525	435-655	0,93	22	27	85
		X46Q						
		X46M						
		X52N	360-530	460-760	0,93	21	27	85
		X52Q						
		X52M						
		X56N	390-545	460-760	0,93	21	27	85
		X56Q						
		X56M						
		X60N	415-565	520-760	0,93	18	27	85
		X60Q						
		X60M						
X65Q	450-600	535-760	0,93	18	27	85		
X65M								
X70Q	485-635	570-760	0,93	17	40	85		



Продовж. табл. В.8

1	2	3	4	5	6	7	8	9
API-5L	PSL 2	X70M						
		X80Q	555-705	625-825	0,93	16	40	85
		X80M						
		X90M	625-775	695-915	0,95	14	40	85
		X100M	690-840	760-990	0,97	13	40	85
		X120M	830-1050	915-1145	0,99	11	40	85
ГОСТ 10705 <sup>c</sup>	В	08сп	≥196	≥314	0,62 <sup>i</sup>	16 <sup>d</sup>	-	-
	В	Ст2сп	≥206	≥333	0,62 <sup>i</sup>	15 <sup>d</sup>	-	-
	В	Ст3сп	≥216	≥353	0,61 <sup>i</sup>	15 <sup>d</sup>	-	-
	В	Ст4сп	≥225	≥402	0,56 <sup>i</sup>	13 <sup>d</sup>	-	-
ASTM A53/ A53M	-	А	≥205	≥330	0,62 <sup>i</sup>	28	-	-
	-	В	≥240	≥415	0,58 <sup>i</sup>	23	-	-

<sup>a</sup> відповідно до стандарту API-5L розраховується по формулі по індивідуальних параметрах прокату/труби. В таблиці наведені розраховані дані, що уніфіковані для умов випробувань круглих зразків перерізом 130 мм<sup>2</sup>

<sup>b</sup> дані, що наведені відповідають умовам для зовнішнього діаметру труби  $>508 \leq 762$  мм. Дані для інших діаметрів труб наведені в стандарті.

<sup>c</sup> властивості мають відношення до діаметру труб 159-530 мм (максимальний діаметр по цьому стандарту) та діапазону товщин «більш ніж 6 мм» дані по менших діапазонах наведені в стандарті. Властивості наведені для труб без термообробки

<sup>d</sup> відносне видовження наведено для діаметру труб в діапазоні 402-530 мм, дані по менших діапазонах наведені в стандарті

<sup>i</sup> Для стандартів ГОСТ 10705 та ASTM A53/A53M значення співвідношення  $\sigma_T/\sigma_B$  не регламентоване. В таблиці наведені розраховані дані, що використовуються з метою порівняння

Додаток Г  
**Технічні характеристики основного устаткування деяких товстолистових станів гарячої прокатки**

Додаток Г.1  
**Технічні характеристики основного устаткування стану 3000  
 «ММК ІМЕНІ ІЛЛІЧА»**

Таблиця Г.1.1

**Коротка технічна характеристика нагрівальних печей стану 3000**

Найменування параметрів	Технічні дані
Тип нагрівальних печей	методичні семизонні з крокуючими балками (ПКБ)
Кількість печей, шт	4
Довжина слябів, що нагріваються, мм	2300-2850
Продуктивність одній печі, т/год	
- Нагрів низьколегованих марок сталі	170
- Нагрів вуглецевих марок сталі	210
Температура нагрівання металу (середньомасова), °С	1140-1250
Максимально допустимий градієнт температур по товщині сляба, °С	30
Максимальна садка печі, т	680

Таблиця Г.1.2

**Коротка технічна характеристика прокатних клітей стану 3000**

Найменування параметрів	Технічні дані	
	чорнова кліть	чистова кліть
1	2	3
Тип клітей	кварто	кварто
Маса кліті, т	1700	1700
Розміри отвору станіни, мм	2830×9300	2830×9300
Робочий валок:		
- діаметр, мм	1000/940	1000/940
- довжина бочки / повна довжина, мм	3000/8100	3000/8100
- маса валка, т	30	30
- матеріал валка	чавун ЛПХНД	чавун ЛПХНД
Опорний валок:		
- діаметр, мм	2100/1950	2100/1950
- довжина бочки, мм	2980/8350	2980/8350
- маса валка, т	120	120
- матеріал валка	сталь марки 9ХФ та інші	сталь марки 9ХФ та інші
Підшипники робочих валків	Роликові кочення	Роликові кочення
Підшипники опорних валків	ПРТ-1600	ПРТ-1600

Продовж. табл. Г.1.2

1	2	3
Охолодження валків: - охолоджуюча рідина - витрата, м <sup>3</sup> /год	вода 580	вода 580
Головний привід: - тип - кількість, шт - номінальна потужність, кВт - швидкість обертання, об/хв - коефіцієнт перевантаження - струм номінальний, А - струм перевантаження, А - струм відключення, А	П2-23-170 2 2×8000 0-50-80 2,5 9250 23125 25437	2П2-22-120 2 (2×5600) 2×11200 0-80-125 2,5 9150 22875 25162
Максимальний тиск металу на валок, МН	68,7	68,7
Максимальний обертаючий момент, МН×м, що передається: - двигунам - шпинделям	5,532 5,70	4,63 5,70
Максимальна швидкість прокатки, м/с	4,2	6,5
Максимальний розчин валків, мм	350	150
Урівноваження валків: - тип - робочий тиск, МПа	гідравлічне 210-249	гідравлічне 210-249
Привід установки валків: - тип - потужність, кВт - число оборотів, об/хв - максимальна швидкість установки, м/с - або мм/с - кількість, шт.	Електро- механічний 295 840 0,042 42 2	Електро- механічний 150 415 0,020 20,7 2
Гідрозбив: - тиск, МПа - мінімальна відстань від сопла до поверхні розкату, мм	170 200	170 200
Станинні ролики: - тип - кількість, шт. - діаметр, мм - довжина, мм	ребристі 8 650 2860	ребристі 8 650 2860
Привід станинних роликів: - тип - потужність, кВт - швидкість, об/хв - максимальний обертаючий момент, кН×м - кількість, шт.	5НС16С1 50 205 6,96 8	5НС16С1 50 205 6,96 8

Продовж. табл. Г.1.2

1	2	3
Пристрій для перевалки валків: - тягнуче зусилля, кН - швидкість переміщення, мм/с - робочий тиск, МПа - максимальний робочий хід, мм	770 20-50-150 21,6 12500	770 20-50-150 21,6 12500
Натискний пристрій: - робочий хід гвинта, мм - крок, мм - передаточне число - кількість, шт	350 40 13,25 2	150 40 13,25 2
Маніпуляторні лінійки: - максимальне зближення, мм - максимальне розведення, мм - довжина монтажної голівки, мм	1000 4500 6720	1000 4500

Таблиця Г.1.3

**Коротка технічна характеристика установки прискороного охолодження  
стану 3000**

Найменування параметрів	Технічні дані
Тип	ламінарний
Довжина установки, мм	22500
Відстань від чистової кліті до установки, мм	63500
Відстань від установки до правильної машини, мм	47000
Відстань між роликами, мм	900
Ширина охолодження, мм	2900
Число секцій, шт.:	
- верх	10
- низ	10
Число холодильних труб на секцію, шт.:	
- верх	2
- низ	5
Число трубок, шт.:	
- у верхній холодильній трубі	117
- у нижній холодильній трубі	117

Таблиця Г.1.4

**Коротка технічна характеристика роликотправильних машин (РПМ) стану 3000**

Найменування параметрів	Технічні дані		
	РПМ 1	РПМ 2	РПМ 3
1	2	3	4
Температура металу при правці, °С	600-700	до 100	до 100
Розміри листового прокату: - товщина, мм - ширина, мм	6-32 1620-2850	14-32 1620-2850	6-15 1500-2700
Максимальний тимчасовий опір листів при температурі правки, МПа	275	883	883
Швидкість правки, м/с	0,3-1,5	0,15-0,65	0,15-0,65
Швидкість реверсу, м/с	0,3-1,5	0,15-0,65	0,15-0,65
Потужність головного приводу, кВт	2×405	2×405	2×405
Максимальний обертаючий момент на робочому ролику, кН×м	2×63,8	2×70,0	2×63,8
Кількість роликів, шт.:			
- верхніх робочих	5	5	5
- нижніх робочих	4	4	4
- напрямні	2	2	2
- опорні	45	45	45
Максимальне число обертів робочого ролика, об/хв	11	11	11
Крок робочих роликів, мм	280	350	220
Діаметр роликів, мм:			
- робочих	270	330	210
- опорних	270	335	215
Діапазон установки верхніх робочих роликів, мм	-30...+125		-30...+60
Швидкість переміщення траверси, мм/с	2,195		2,2
Потужність привода натискного пристрою, кВт	21		21

Таблиця Г.1.5

**Коротка технічна характеристика ножиць поперечної різки (ПН) стану 3000**

Найменування параметрів	Технічні дані				
	ПН-1	ПН-2	ПН-5	ПН-6	ПН-7
1	2	3	4	5	6
Розміри листів що розрізаються, мм:					
- товщина	6-32	6-32	6-32	6-32	6-32
- ширина	1620-2850	1620-2850	1500-2750	1500-2750	1500-2750
Найбільший тимчасовий опір листів що розрізаються, МПа	883	883	883	883	883
Температура металу при розрізанні, °С	100-800	≤100	≤100	≤100	≤100
Число розрізів за хвилину	12	25	25	25	25
Максимальний розчин ножів, мм	200	120	120	120	120

Продовж. табл. Г.1.5

1	2	3	4	5	6
Привід: - потужність, кВт:	3550, 1600 40-18	2x530	2x530	2x530	2x530
- число обертів за хвилину		800	800	800	800
Потужність приводу механізму встановлення зазору, кВт	4,5	4,5	4,5	4,5	4,5

Таблиця Г.1.6

**Коротка технічна характеристика здвоєних кромкообрізних ножиць ЗКОН-3 та  
ЗКОН-4 стану 3000**

Найменування параметрів	Технічні дані
1	2
Зусилля різання, МН	2,35
Швидкість різання, м/хв	24,2-35,8
Довжина обрізків, мм	до 1350
Ширина обрізків, мм	≤150
Максимальний тимчасовий опір листів що розрізаються, МПа	883
Головний привід: - тип двигуна - кількість двигунів/потужність, кВт - число обертів за хвилину	П2-450.132-714 4×400 800-1500
Привід переміщення станин (лівої та правої): - тип двигуна - потужність, кВт - число обертів за хвилину - швидкість переміщення, мм/с - швидкість точного встановлення, мм/с - точність встановлення, мм - шлях переміщення, мм	До 816 (2 шт) 37-74 260-520 50 25 0+2 1350
Шлях переміщення розкату за один різ, мм	1100-1300
Розміри листів що розрізаються, мм: - товщина - ширина - довжина	6-32 1620-2850 8000-27000

## Додаток Г.2

## Технічні характеристики основного устаткування стану 3600

## «МК «АЗОВСТАЛЬ»

Таблиця Г.2.1

## Коротка технічна характеристика нагрівальних печей стану 3600 ТИ 232-95

Найменування параметрів	Технічні дані
Тип нагрівальних печей	методичні п'ятизонні, штовхального типу
Кількість печей, шт	5
Кількість рядів в печі, шт	2
Площа активного поду, м <sup>2</sup>	211
Паливо	природний газ
Максимальні витрати палива, м <sup>3</sup> /год	6000
Довжина слябів, що нагріваються, мм	920-3420
Ширина слябів, що нагріваються, мм	1100-1920
Маса слябів, т	1,8-16
Продуктивність одної печі, т/год	38-129
Максимальна садка печі, т	579

Таблиця Г.2.2

## Коротка технічна характеристика прокатних клітей стану 3600

Найменування параметрів	Технічні дані		
	вертикальна кліть	чорнова кліть	чистова кліть
1	2	3	4
Тип клітей	дуо	кварто	кварто
Габарити кліті, мм	12520×7000×12250	12100×2200×5700	11100×2200×5700
Розміри отвору станіни, мм	-	2200×1190	2200×1190
Робочий валок:			
- діаметр, мм	900/800	1130/1050	1030/950
- довжина бочки, мм	1400	3600	3600
- маса, т	14,5	39	35
Охолодження валків:			
- охолоджуюча рідина	вода	вода	вода
- витрати, л/хв	4200	4300	4300
Максимальний тиск металу на валок, МН	11	46	46
Максимальна швидкість прокатки, м/с	3,5	4,4	6,0
Максимальний розчин валків, мм	від 1000 до 3600	1000	160
Максимальний обертаючий момент, МН×м	2x0,8036	2x4,20	2x2,95

Продовж. табл. Г.2.2

1	2	3	4
Головний привід: - тип - кількість, шт - потужність, кВт - швидкість, об/хв	ПВ21-100-7к 2 1800 0-60-120	2П24/115 3,5 2 6920 0-40-80	2П23/106 2 8800 0-70-140
Гідрозбив: - тиск, МПа - мінімальна відстань сопла від поверхні металу, мм	150 250	150 245	150 245
Урівноваження валків: - тип - робочій тиск, МПа - діаметр циліндру, мм - хід циліндру, мм - зусилля одного циліндру, МН - кількість, шт.	Гідравлічне 240 120 1350 0,16 2	Гідравлічне 240 260/150 1250 0,85 4	Гідравлічне 240 260/150 490 0,85 4
Привід встановлення валків: - тип - потужність, кВт - число обертів, об/хв - максимальна швидкість встановлення, мм/с - кількість, шт	ЧАР3650 Е/1 112 470 100 2	П-129-8к 300 0-750 54 2	П-129-8к 300 0-750 19,6 2
Підшипники робочих валків	Роликові циліндричні	Роликові циліндричні	Роликові циліндричні
Підшипники опорних валків	-	ПРТ (рідинного тертя)	ПРТ
Станинні ролики: - тип - кількість, шт. - діаметр, мм - довжина, мм	1-гладкий 1-ребристый 2 520 3600	- 6-ребристый 6 450 3400	2-гладкий 4-ребристый 6 450 3400
Привід станинних роликів: - кількість електродвигунів, шт. - потужність, кВт - швидкість, об/хв - максимальний обертаючий момент, кН×м	2 62/125 110/220 13,90	6 62/125 110/220 13,90	6 62/115 110/220 13,90
Пристрій для перевалки валків: - зусилля тяги, кН - швидкість переміщення, мм/с - робочій тиск, МПа - робочий хід, мм	- - - -	1400 23/114 240 350	1400 23/114 240 350
Привід пристрою для перевалки валків: - кількість - потужність, кВт - швидкість, об/мин	- - -	1 23 от 0 до 800	1 23 от 0 до 800
Натискний пристрій: - робочий хід гвинта, мм	1350	1060	410



Продовж. табл. Г.2.2

1	2	3	4
- крок, мм	28	32	24
- передаточне число	2,217	7,4	15,33
- кількість, шт	4	2	2

Таблиця Г.2.3

### Коротка технічна характеристика установки прискореного охолодження (УКО), стану 3600

Найменування параметрів	Технічні дані
Відстань від чистової кліті, мм	43200
Габаритні розміри установки:	
- загальна довжина, мм	35100
- в тому числі охолоджуюча частина, мм	25600
- загальна ширина, мм	4200
- в тому числі зони охолодження, мм	4100
Розміри розкатів, що оброблюються на установці УКО:	
- товщина, мм	6-50
- ширина, мм	1600-4050
- довжина, мм	до 40000
- маса, т	до 23,5
Мінімальна цільова температура розкату після охолодження, °С	500
Швидкість охолодження, °С/с	12-45
Система охолодження:	
- довжина ділянки системи охолодження, мм	25600
- ширина зони охолодження, мм	4100
- кількість бокових сопел	4 пари
- максимальні витрати води (всього), м <sup>3</sup> /час	160
- тиск перед соплом, бар	до 16
Кількість колекторів, шт:	
- верхніх	24
- нижніх	24
Максимальні витрати води під час охолодження з напірної ємності, м <sup>3</sup> /с	3,8
Розподілення витрат води (верх:низ)	1:1 – 1:3
Відстань між рівнем рольгангу та U-подібними трубками, мм	1200
Рольганг:	Ролики суцільні, корпус роликів з водяним охолодженням
- конструкція роликів	
- кількість роликів, шт	43
- діаметр роликів, мм	400
- довжина бочки роликів, мм	4200
- лінійна швидкість рольгангу, м/с	0-3,5
- в тому числі при охолодженні, не більше ніж, м/с	2,5
- прискорення, м/с	±0,8
- допустиме відхилення від заданої швидкості (при швидкості 0,5-2,5 м/с), %	± 1

Таблиця Г.2.4

**Коротка технічна характеристика ножиць поперечної різки (ПН) стану 3600**

Найменування параметрів	Технічні дані				
	ПН № 1	ПН № 2	ПН № 5,6	ПН № 7	ПН № 8
1	2	3	4	5	6
Зусилля різання, МН	19	19	19	19	19
Розміри листів що розрізаються: - ширина, мм - товщина, мм	2150-3450 5-50	2150-3450 5-50	2150-3450 5-50	2150-3450 5-50	2150-3450 5-50
Найбільший тимчасовий опір листів що розрізаються в холодному стані, МПа	1200	1200	1200	1200	1200
Температура при розрізанні, °С	600-1000	20-100	20-100	20-100	300-900
Число розрізів за хвилину	18	18	18	18	18
Розміри ножів, мм: - верхній R=47 - нижній (товщина×ширина×довжина)	100×200 ×3700 100×150 ×3700	100×200 ×3700 100×150 ×3700	100×200 ×3700 100×150 ×3700	100×200 ×4100 100×150 ×500 100×150 ×4200 100×150 ×585	100×200 ×3700 100×150 ×3700
Матеріал ножів: - гарячої різки - холодної різки	Сталь 19552+1 W Сталь 5XB2C	Сталь 5XB2C	Сталь 5XB2C	Сталь 5XB2C	Сталь 19552+1 Сталь 5XB2C
Потужність, кВт: - головного приводу - приводу механізму встановлення зазору	2×500 0,75	2×500 0,75	2×500 0,75	2×500 0,75	2×500 0,75

Таблиця Г.2.5

**Коротка технічна характеристика ножиць поздовжньої різки (ПН) стану 3600**

Найменування параметрів	Дискові ножиці (ДН) <sup>а</sup>	Здвоєні кромкообрізні ножиці (ЗКОН №3,4)
1	2	3
Тип ножиць	Дискові	Барабанні
Зусилля різання, МН	-	15,5
Швидкість різання, м/с: - при товщині 5-20мм - при товщині 25мм - при товщині 30мм	0,8 0,5 0,3	- - -

Продовж. табл. Г.2.5

1	2	3
Число розрізів за хвилину	-	16-24
Довжина обрізі, мм	1000	1000
Ширина обрізі, мм	до 150	до 150
Матеріал ножів	Сталь Раз-1(5XB2C)	Сталь Раз-1(5XB2C)
Максимальний тимчасовий опір листів що розрізаються в холодному стані, МПа	1200	1200
Головний привід:		
- потужність двигуна, кВт	250	500
- кількість двигунів	1	2
Привід переміщення станін (правої):		
- потужність електродвигуна, кВт	7,5	56
- число обертів, об/хв	1090	560
- швидкість переміщення, мм/с	18,5	48
- шлях переміщення, мм	1500	2800
Привід переміщення станін (лівої):		
- потужність електродвигуна, кВт	1,1	56
- число обертів, об/хв	710	560
- швидкість переміщення, мм/с	3	-
- шлях переміщення, мм	250	-
Загальна маса ножиць, кг	166755	484330

<sup>a</sup> наразі вказані ножиці не працюють

Таблиця Г.2.6

### Коротка технічна характеристика кромкокришільних ножиць стану 3600

Найменування параметрів	Технічні дані	
	Гільйотинні	Барабанні
Тип		
Кількість ножиць, шт	2	6
Максимальне розкриття ножів, мм	270	-
Швидкість різання, мм/с	290-800	-
Число розрізів за хвилину	-	32
Перекриття стрілоподібних ножів, мм	5	5
Перекриття нахилених ножів, мм	7	7
Кут нахилу ножів на барабані, град.	-	25
Розміри обрізі, мм:		
- довжина	до 1000	до 1000
- ширина	до 1000	до 500
- товщина	5-20-30	5-50
Розміри ножів, мм:		
- верхній	60×110×300	-
- нижній	60×110×300	-
Розміри барабану, мм:		
- ширина	-	650
- діаметр	-	1363
Матеріал ножів	Сталь 5XB2C	Сталь 5XB2C
Привід:		
- потужність, кВт	250	370
- число обертів за хвилину	400-1300	1000

Таблиця Г.2.7

## Метрологічне забезпечення технологічного процесу виробництва прокату на стані 3600

Найменування операцій контролю	Найменування параметру, що контролюється	Діапазон зміння значення параметру, що контролюється, технологічне поле допуску	Номінальне значення параметру, приймальні границі	Засоби виміральної техніки (ЗВТ)				Місце контролю	Сумарна похибка засобів та методів виміру	Відношення поля допуску похибки	Періодичність повірки (калібрування), місяців
				Найменування, тип	Похибка ЗВТ	Діапазон вимірювання ЗВТ	Нормативна документація на ЗВТ				
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Вхідний контроль якості та кількості заготовок (слябів)	Товщина заготовки, (сляба), мм.	(від 130 до 350) $\pm 5$	(від 130 до 350) $\pm 5$	Вимірвальна лінійка	$\pm 0,5$	0-500	ГОСТ 427	Склад слябів	$\pm 0,5$	10	12
	Ширина заготовки, мм.	(від 1100 до 1920) $\pm 5$	(від 1100 до 1920) $\pm 5$	Рулетка РЗ-2	$\pm 0,6$	0-2000	ДСТУ 4179	Склад слябів	$\pm 0,6$	8,3	12
	Довжина заготовки, мм.	(від 920 до 3450) $\pm 5$	(від 920 до 3450) $\pm 5$	Рулетка РЗ-5	$\pm 1,2$	0-5000	ДСТУ 4179	Склад слябів	$\pm 1,2$	4,1	12
	Маса сляба, кг.	(від 1800 до 16000) $\pm 30$	(від 1800 до 16000) $\pm 30$	Терези 20000 Шенбер АГ	$\pm 10$	0-20000	Інструкція з експлуатації	Склад слябів	$\pm 10$	3	12
Контроль параметрів прокатки	Температура розкату при прокатці, °С	від 830 до 1280	від 830 до 1280	ЕДМ 35 РАЙТЕК	$\pm 2,5$ $\pm 5$	від 800 до 1300	Інструкція з експлуатації	ПУ-9	$\pm 5,6$		12
		від 660 до 1250	від 660 до 1250	ЕДМ 35 РАЙТЕК А 650	$\pm 4$ $\pm 8$ $\pm 4$	від 500 до 1300	НСИТ	ПУ-10	$\pm 8,9$ $\pm 4$		12 12

Продовж. табл. Г.2.7

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Контроль параметрів прокатки	Зусилля при прокатці на валки чорнової кліті, МН	від 0 до 46	від 0 до 46	СКУП	±92	від 0 до 50	РЭ 7001-00-000	Дільниця стану	±92	25	12
	Зусилля при прокатці на валки чистової кліті, МН	від 0 до 46	від 0 до 46	СКУП	±92	від 0 до 50	РЭ 7001-00-000	Дільниця стану	±92	25	12
	Товщина розкату при прокатці, мм	(від 6 до 160) ±0,1	(от 6 до 160) ±0,05	Плашка	±0,05	8-160	НСИТ	Дільниця стану	±0,05	2	12
Охолодження розкатів за чистовою кліттю	Температура початку охолодження розкатів, °С	від 750 до 920 ± 20	від 750 до 920 ± 25	Пірометричний перетворювач RAYTEK MARATHON	±8,7	450 ÷ 1740	Паспорт	Пост 11а	±8,8	1,14	12
				Вторинний цифровий перетворювач GPCM Termalett	±1,6	500 ÷ 1300					
				Модуль введення аналогових сигналів SIMATIC	±0,05						

Продовж. табл. Г.2.7

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Охолодження розкатів заохолодження чистою кліттю	Температура закінчення розкатів, °C	від 430 до 800 ± 20	від 430 до 800 ± 25	Пірометричний перетворювач RAYTEK MARATHON	±8,7	450 ÷ 1740	Паспорт	Пост 11a	±8,8	1,14	12
				Вторинний цифровий перетворювач GPCM Termalert	±1,6	500 ÷ 1300					
				Модуль вводу аналогових сигналів SIMATIC	±0,05						
Витрати води під час охолодження, м <sup>3</sup> /год	Верхня секція	від 0 до 380 ±20	-	Електромагнітний витратомір ABB	±2,1	0 ÷ 420	Паспорт	Пост 11a	±2,1	9,5	12
				Модуль вводу аналогових сигналів SIMATIC	±0,21						
	Нижня секція	від 0 до 900 ±50		Електромагнітний витратомір ABB	±5,4	0 ÷ 1080					
				Модуль вводу аналогових сигналів SIMATIC	±0,54		Паспорт	Пост 11a	±5,4	9,3	12

Продовж. табл. Г.2.7

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Охолодження розкатів за чистою кліттю	Швидкість рольгангу, м/с	від 0,5 до 2,5	-	Інкрементальний енкодер HOG 10 DN 1024 имп./оборот Модуль лічильника SIMATIC	-	-	Інструкція з експлуатації	Пост 11а	-	-	-
Контроль геометричних розмірів прокату	Толщина листа, мм	(від 6 до 25) ± 0,9	(від 6 до 25) ± 0,9	Микрометр МК25	±0,0020	0-25	ГОСТ 6507	На відстані не менше 100 мм від торців і не менше 40 мм від кромки листа	±0,0020	450	12
		(від 25 до 50) -0,5 - +1,8	(від 25 до 50) -0,5 - +1,8	МК50	±0,0025	25-50		±0,0025	460	12	
		(від 50 до 70) -1 - +2	(від 50 до 70) -1 - +2	МК75	±0,0025	50-70		±0,0025	600	12	
		(від 71 до 100) -2 - +1	(від 71 до 100) -2 - +1	МК100	±0,0025	50-100		±0,0025	600	12	
		(від 100 до 160) -3	(від 100 до 160) -3	МК150 штангенциркуль	±0,003 ±0,01	100-150 0-300		±0,0030 ±0,01	500 150	12 12	
	Ширина листа, мм	(від 1150 до 3600)±5	(від 1150 до 3600)±3	Рулетка P20Y3П	±4,2	0-20000	ДСТУ 4179	довільне	±4,2	1,2	12
	Довжина листа, мм	(від 1150 до 24400)±5	(від 1150 до 24400)±3	Рулетка P30H2K	±4,65	0-30000	ДСТУ 4179	довільне	±4,2	1,1	12
	Неплоскість, стріла прогибу довжині 1 м, мм	(0-12)±1	(0-12)±1	Повірочна лінійка з індикатором	±0,05	0-115	НСИТ	По всій площі листа в різноманітних напрямках	±0,05	20	12

Продовж. табл. Г.2.7

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
	Глибина поверхні заготовки	дефектів листів,	до 5% від номінальної товщини понад мінусових допусків	до 5% від номінальної товщини понад мінусових допусків	Глибиномір індикаторний ГІ-100. Повірна лінійка індикатором	$\pm 0,004$  $\pm 0,05$	0-100  0-115	ГОСТ 7661  НСИТ	в місці максима льної глибини дефекту	$\pm 0,004$  $\pm 0,05$		12  12



## Додаток Г.3

**Технічні характеристики основного устаткування стану 3200  
заводу Trametel**

Таблиця Г.3.1

**Коротка технічна характеристика нагрівальної печі стану 3200**

Найменування параметрів	Технічні дані
1	2
Тип нагрівальної печі	штовахальна
Кількість печей, шт	1
Паливо	Природний газ
Потужність, т/год	100
Кількість зон для нагріву, шт	6
Кількість пальників, шт:	
- загалом	48
- в одній зоні	8
Термічна потужність, ккал/год	58 млн
Довжина печі, м	28,4
Максимальна температура видачі з печі, °С	1340
Цільова температура видачі з печі, °С	1250
Цільова температура видачі з печі, для прокату 5-6 мм, °С	1280

Таблиця Г.3.2

**Коротка технічна характеристика нагрівальної камерної печі стану 3200**

Найменування параметрів	Технічні дані
1	2
Тип нагрівальної печі	камерний тип
Кількість печей, шт	1
Паливо	Природний газ
Потужність, по всаду, т/год	126
Кількість зон для нагріву, шт	6
Термічна потужність, МДж/год	25320

Таблиця Г.3.3

**Коротка технічна характеристика прокатної кліті стану 3200**

Найменування параметрів	Технічні дані
1	2
Робочій тиск металу на валок, МН	35
Максимальний тиск металу на валок, МН	40
Жорсткість кліті, МН/мм	3,9

Продовж. табл. Г.3.3

1	2
Робочий тиск гідроциліндрів натискного пристрою, бар	300
Відстань між осями робочих валків (нові/зношені), мм	1215/730
Станинні ролики: - кількість, шт - діаметр, мм - довжина, мм - крок між роликами, мм	6 450 2980 615
Робочі валки: - діаметр, мм - довжина, мм - матеріал валків	730-810 3350 високолегована хромиста сталь з сердечником зі сферичного чавуну, поверхнева твердість 65-70 по Шору
Опорні валки: - діаметр, мм - довжина, мм - матеріал валків	1390-1500 3097 суцільнолиті зі сталі 3% CrMoV
Електродвигуни: - потужність, кВт - допустиме перевантаження, % - максимальний обертаючий момент, кН×м - швидкість, об/хв	2×3500 200 1865 50/120
Направляючі прокату в кліті (лінійки): - довжина, мм - розкриття максимум/мінімум, мм - відстань від осі кліті, мм	5177 3350/1200 2002

Таблиця Г.3.4

**Коротка технічна характеристика термічних печей стану 3200**

Найменування параметрів	Технічні дані	
	ТТ1	ТТ1
Термічна піч	ТТ1	ТТ1
- тип	роликова	роликова
- робоча температура, °С	650-950	650-950
- максимальна температура, °С	970	970
- тип палива	природний газ	природний газ
- номінальна продуктивність, т/год	9,75	17
- встановлена теплова потужність, ккал/год	5,72 млн	7,692 млн
- кількість пальників, шт	52	52
- температури по режимах, у тому числі:		
нормалізація	910-950	910-950
відпалювання	860-910	860-910
відпуск	660-700	660-700

## Додаток Г.4

## Технічні характеристики основного устаткування стану 1700

## «ММК ІМЕНІ ІЛЛІЧА»

Таблиця Г.4.1

## Коротка технічна характеристика нагрівальних печей №3-5 стану 1700

Найменування параметрів	Технічні дані
Тип нагрівальних печей	методичні чотирьохзонні, штовхального типу, видача слябів ударна
Кількість печей, шт	3
Довжина слябів, що нагріваються, мм	2800-6200
Продуктивність однієї печі, т/год	90
Температура нагрівання металу (середньомасова), °С	до 1350
Максимальна садка печі, т	360

Таблиця Г.4.2

## Коротка технічна характеристика нагрівальної печі №1 стану 1700

Найменування параметрів	Технічні дані
Тип нагрівальних печей	методична багатозонна з крокуючими балками (ПКБ), безударна видача слябів, з імпульсним опаленням
Кількість печей, шт	1
Довжина слябів, що нагріваються, мм	3800-10500
Продуктивність печі, т/год	190-350 <sup>a</sup>
Температура нагрівання металу (середньомасова), °С	1200-1260
Максимально допустимий градієнт температур по товщині сляба, °С	30
Максимальна садка печі, т	1065

<sup>a</sup> в залежності від розмірів слябів, на холодному посаді

Таблиця Г.4.3

## Коротка технічна характеристика шестеренних клітей стану 1700

Найменування параметрів	Технічні дані по клітях		
	№№ 01, 1, 2	№№ 3, 4, 4а	№№ 5-10
Міжцентрова відстань, мм	1000	900	650
Довжина бочки, мм	1600	1800	1560
Торцевий модуль, мм	50	26	30
Кількість зубів, шт	20	32	21

Таблиця Г.4.4

**Коротка технічна характеристика редуктору головних приводів стану 1700**

Найменування параметрів	Технічні дані по клітях				
	№№ 01, 1, 2	№№ 3, 4	№ 4а	№ 5	№ 6
Кількість щаблів, шт	2	2	2	1	1
Загальне передаточне число	23,917	15,9	9,55	4,5	3,125
Міжцентрова відстань, мм	4000	3000	2400	1800	1800

Таблиця Г.4.5

**Коротка технічна характеристика шпindelних з'єднань стану 1700**

Найменування параметрів	Технічні дані по клітях					
	Горизонтальні кліті				Вертикальні кліті	
	№№ 01, 1, 2	№№ 3, 4, 4а	№ 5-7	№ 8-10	№№ 2, 3	№ 4
Довжина по осях шарніру, мм	2200	3000	2200	1710	2100	2415
Діаметр головки, мм	850	800	600	590	800	400
Діаметр тіла, мм	440	420	320	380	300	120
Максимальний кут нахилу, град-хв	5	9	5	5	-	6-30

Таблиця Г.4.6

**Коротка технічна характеристика вертикальних клітей стану 1700**

Найменування параметрів	Технічні дані вертикальних клітей	
	№№ 2, 3	№№ 4, 4а
Діаметр валків, мм	800-900	600-700
Довжина бочки валка, мм	450	380
Розчин валків, мм:		
- мінімум	1000	800
- максимум	1700	1550
Потужність приводу, кВт	2×1000	300
Кількість оборотів двигуна, об/хв	630-900	750-1000
Загальне передаточне число	13,78	17,636
Швидкість прокатки, м/с	1,25-3,00	1,15-2,30
Швидкість встановлення валків, мм/с	8	8
Потужність приводу натискного механізму, кВт	2×160	32
Кількість оборотів двигуна натискного механізму, об/хв	490	686

Таблиця Г.4.7

### Коротка технічна характеристика робочих клітей стану 1700

Найменування параметрів	Тип клітей	Сила прокатки, МН	Робочі валки		Опорні валки		Максимальний розчин валків, мм	Швидкість прокатки, м/с	Головні електродвигуни		Відстань до попередньої кліті, мм
			діаметр, мм	номер підшипника	діаметр, мм	номер підшипника			потужність, кВт	число обертів за хвилину	
Чорновий окалиноломатель, кліть 01	дуо	8	900-810	777-620			250	0,84	4000	600	-
Чернова кліть №1	кварто	25	1020-900	777-620	1450-1370	777-750	200	1,27	4000	600	10150
Чернова кліть №2	кварто	25	1020-900	777-620	1450-1250	777-750	200	1,35	4000	600	18500
Чернова кліть №3	кварто	20	880-810	77196	1300-1170	777-750	150	1,74	4000	600	22980
Чернова кліть №4	кварто	20	880-810	77196	1300-1184	777-750	150	1,74	4000	600	35420
Чернова кліть №4а	кварто	20	880-810	77196	1300-1170	777-750	150	2,9	4000	600	53000
Чистова кліть №5	кварто	24	670-625	77880	1325-1200	1000-75	150	1,32-2,5	8000	175-330	87000
Чистова кліть №6	кварто	24	670-625	77880	1325-1200	1000-75	150	1,90-3,6	8000	175-330	5800
Чистова кліть №7	кварто	20	705-625	77880	1325-1200	1000-75	150	3,75-8,15	8000	110-240	5800
Чистова кліть №8	кварто	18	705-625	77880	1325-1200	1000-75	150	3,75-8,15	8000	110-240	5800
Чистова кліть №9	кварто	17	705-625	77880	1325-1200	1000-75	150	5,95-11,2	8000	175-330	5800
Чистова кліть №10	кварто	15	705-625	77880	1325-1200	1000-75	150	5,95-12,2	5000	175-330	5800
Довжина бочки валків клітей №№ 0,1, 1, 2, 3, 4, 4а, 5, 6, 7 – 1750 мм, клітей №№ 8, 9 10 – 2000 мм											

Таблиця Г.4.8

### Коротка технічна характеристика системи осьового зсуву валків стану 1700

Найменування параметрів	Технічні дані
Кліті, що обладнані системою зсуву валків	№№ 8, 9, 10
Робочий хід циліндрів системи осьового зсуву валків, мм	+/-150
Загальний хід циліндрів, мм	+/-450
Крок зсуву, мм	0-50
Швидкість зсуву валків, мм/с	5/20

**Коротка технічна характеристика систем гідравлічного регулювання стану  
1700**

Найменування параметрів	Технічні дані
Кліті, що обладнані системою гідравлічного регулювання	№№ 8, 9, 10
Максимальне зусилля противигину, МН	1,75
Допустимий хід циліндрів гідронатискного пристрою, мм	60
Максимальне зусилля на гідронатискні пристрої, МН	26,50
Режим роботи	автоматичний, ручний, напівавтоматичний

Таблиця Г.4.10

**Коротка технічна характеристика летючих ножиць стану 1700**

Найменування параметрів	Технічні дані
Тип ножиць	летючі, барабанні
Товщина штаб, що розрізаються, мм	20-40
Ширина штаб, що розрізаються, мм	≤1550
Температура штаб, що розрізаються, °С	≥950
Тимчасовий опір металу, що розрізається (в холодному стані), МПа	≤590
Ритм порізки, с	60-120
Довжина ножів, мм	1700
Перекриття ножів, мм	5-65
Швидкість розрізання, м/с	0,68-1,5
Нахил верхнього ножа	1:28,3
Розраховане зусилля різання, МН	2,8
Кут початку різання (на нижньому барабані), град	10

Таблиця Г.4.11

**Коротка технічна характеристика гідрозбивів високого тиску №№1-5,  
стану 1700**

Найменування параметрів	Технічні дані
1	2
Ширина штаби, мм	1000-1540
Кількість гідрозбивів, шт	5
Розташування колекторів	зверху та знизу
Тиск в системі, атм	80-140
Довжина колектору, мм	1700
Кількість сопел на одному колекторі, шт	13-17
Відстань між соплами (крок), мм	100-120
Кут нахилу сопел до вертикальної осі проти ходу прокатки, град	15
Кут нахилу великої осі сопла до осі прокатки, град	75
Розмір овального отвору, мм	3,2×5

Продовж. табл. Г.4.11

1	2
Відстань сопел від штаби, мм	240-300
Матеріал сопел	Сталь 40X13
Ширина струмінню на відстані 300 від поверхні штаби, мм	≥150

Таблиця Г.4.12

**Коротка технічна характеристика пристрою гідравлічного видалення окалини  
чистої групи стану 1700**

Найменування параметрів	Технічні дані
Ширина штаби, мм	1000-1540
Максимальна товщина штаби, мм	60
Швидкість руху штаби, м/с	1,02-1,53
Тиск в гідросистемі, МПа	10
Кількість колекторів зверху, шт	2 (№6 та №7) <sup>a</sup>
Кількість колекторів знизу, шт	2 (№6 та №7) <sup>a</sup>
Довжина колектору, мм	1700
Тиск в пневмосистемі, МПа	0,4-0,63
Кількість сопел на одному колекторі, шт	16-18
Тиск в системі, атм	80-140
Відстань між соплами (крок), мм	90-100
Кут нахилу сопел до вертикальної осі проти ходу прокатки, град	15
Відстань сопел від штаби, мм	200-250
Кут нахилу великої осі сопла до осі прокатки, град	75
Розмір овального отвору, мм	3,2×5
Ширина струмінню на відстані 300 від поверхні штаби, мм	≥150
<sup>a</sup> Сопла колекторів гідрозбиву №7 розташовані відносно сопел гідрозбиву №6 зі зміщенням рівним половині кроку (в шаховому порядку)	

Таблиця Г.4.13

**Коротка технічна характеристика пристрою для прискороного охолодження  
прокату стану 1700**

Найменування параметрів	Технічні дані
Кількість секцій, шт.	14
Тип секцій	ванні, (водяна завіса)
Кількість зливних ван в секції, шт	3
Витрати води на одну секцію, м <sup>3</sup> /год	≥100
Витрати води на всю установку при всіх увімкнених секціях, м <sup>3</sup> /год	≥2000
Тиск в системі, атм	-

Таблиця Г.4.14

**Коротка технічна характеристика моталок стану 1700**

Найменування параметрів	Технічні дані моталки	
	№№1, 2	№ 3
Максимальна вага рулонів, що змотуються, т	9	27
Діаметр барабану (номінальний), мм	700	720-750
Довжина барабану, мм	2350	
Діаметр тягнучих роликів (верхніх/нижніх), мм	900/500	
Довжина бочки тягнучих роликів, мм	1700	
Діаметр формуючих роликів, мм	310	350
Максимальний розчин формуючих роликів, мм	1400	
Електродвигун приводу барабану: - потужність, кВт - швидкість обертання, об/хв	180 710-1500	
Передаточне число редуктора барабану	4,38	
Електродвигун приводу тягнучих роликів: - потужність, кВт - швидкість обертання, об/хв	67 590	
Передаточне число редуктора тягнучих роликів	1,8	
Електродвигун приводу формуючих роликів: - потужність, кВт - швидкість обертання, об/хв	16 710-1000	
Діаметр повітряних циліндрів, мм: - урівноваження формуючих роликів - підйому тягнучого ролика - керування барабану - штовхача рулонів	500 100 320 400	

Таблиця Г.4.15

**Коротка технічна характеристика кантователів стану 1700**

Найменування параметрів	Технічні дані
Кількість, шт	3
Висота рулонів, мм	1000-1540
Максимальний зовнішній діаметр рулонів, мм	1400
Мінімальний внутрішній діаметр рулонів, мм	700
Діаметр роликів, мм	200
Час робочого ходу, с	15
Час холостого ходу, с	7
Потужність електродвигуна приводу, кВт	16

Таблиця Г.4.16

**Коротка технічна характеристика підйомна-поворотного столу стану 1700**

Найменування параметрів	Технічні дані
1	2
Маса рулону, т	≤12
Зовнішній діаметр рулону, мм	1100-1650



Продовж. табл. Г.4.16

1	2
Внутрішній діаметр рулону, мм	700-850
Робочий хід плунжеру, мм	270
Час повороту столу, с	5
Час повороту та опускання столу, с	9

Таблиця Г.4.17

**Коротка технічна характеристика системи охолодження валків стану 1700**

Найменування параметрів	Технічні дані по групах клітей	
	Чернова	Чистова
Тип системи	водо-повітряний	водо-повітряний
Кількість колекторів:		
- всього на кліть	4	6
- в тому числі на вході	2	4
на виході	2	2
Діаметр колектору, мм	108	108
Діаметр внутрішньої (повітряної) труби, мм	48	60
Кількість сопел на одному колекторі, шт	15	15-19
Тип сопел	спреєр	спреєр
Розмір сопел, мм	10×20	10×20
Розташування сопел по відношенню до осі колектора, град	35-70	35-75
Відстань між соплами, мм	60-150	35-150
Можлива робота у водяному режимі		

Таблиця Г.4.18

**Коротка технічна характеристика рольгангів стану 1700**

Найменування рольгангу	Швидкість транспортування, м/с
Пічний (завантажувальний)	1,6
Нижній пічний:	
- номінальна	1,6
- при роботі системи диференційованої подачі слябів, під печами 3-5	2,6
Чорнової групи між клітями:	
- № 01 та №1	1,6
- № 1 та № 2	1,6
- № 2 та № 3	2,5
- № 3 та № 4	2,5
- № 4 та № 4а	3,2
Проміжний	1,6-3,5
Відвідний	3-12

Таблиця Г.4.19

**Коротка технічна характеристика конвеєрів стану 1700**

Найменування параметрів	Технічні дані
Маса рулонів що транспортуються, т	4-15
Зовнішній діаметр рулону, мм	1100-1650
Внутрішній діаметр рулону, мм	700-850
Висота рулонів, мм	1000-1550
Цикл надходження рулонів до транспортеру, с	35-64
Температура рулонів, °С	≤800
Швидкість руху транспортеру, м/хв	6-9
Діаметр початкової окружності привідних зірочок, мм	2060

Таблиця Г.4.20

### Метрологічне забезпечення технологічного процесу виробництва прокату на стані 1700

Параметр, що контролюється	Спосіб виразу фізичної величини параметра, що контролюється (А) в одиницях Сі			Найменування засобів вимірювальної техніки (ЗВТ)(первинний, вторинний прилад)	Тип ЗВТ (первинний та вторинний прилад), нестандартні ЗВТ (НЗВТ)	Метрологічні характеристики засобів вимірювальної техніки			Найменування документу де відмічається параметр, що контролюється
	завдане значення (А завд.)	Граничне значення (А мін-А макс)	Технологічний допуск (δ завд.)			Діапазон вимірювання	Клас точності, похибка	Ціна поділу	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Товщина слябів	-	130-200мм	+/-5 мм	Кронциркуль Рулетка вимірювальна	Р 10 УЗК	0-300 мм 0-10000 мм	3	1 мм	Комп'ютерна система; журнал обліку слябів
Ширина слябів	-	980-1570 мм	-10 мм / +30 мм	Спеціальна лінійка	НЗВТ	950-1600 мм	-	1 мм	Комп'ютерна система; журнал обліку слябів
Довжина слябів	-	2800-6200	+50 мм -30 мм	Рулетка вимірювальна	Р 10 УЗК	0-10000 мм	3	1 мм	журнал обліку слябів
Температура в печі по зонах	-	800-1380 °С	-	Термоелектричний перетворювач Вторинний прилад	ТПП ПП (S) ДИСК-250	0-1600 °С	0,5	10 °С	агрегатний журнал
Температура металу в печах	-	1050-1380 °С	-	телескоп радіаційного пірометра Вторинний прилад	ТЭРА-50 ДИСК-250	700-1500 °С	±15 °С 0,5	10 °С	агрегатний журнал
Час	-	8 сек-48 год	-	годинники всіх типів	-	0-12 год	-	1 сек 1 хв	не фіксується

Продовж. табл. Г.4.20

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Температура розкату за кліттю 4а	-	100-1120 °С	-	Пірометр Marathon  Вторинний прилад	MR1SASF  A-650	600-1500 °С  800-1300 °С	±0,75% t максимальної 0,5	1 °С  2,5 °С	смуги самописцю пірометра
Положення натискних гвинтів клітей №№ 01, 1, 2, 3, 4 (розчин горизонтальних валків)	-	0-180 мм	±0,5 мм	система виміру штаби (електронний продуктиметр)	НЗВТ, ТЗ	0-180 мм	±0,2 мм	0,1 мм	агрегатний журнал
Ширин підкат за кліттю 4а	-	1000-1560 мм	±30 мм	шириномір  Вторинний прилад	НЗВТ, ТЗ  М-1730	600-1700 мм	±2 мм	1 мм	не фіксується
Розчин валків клітей 5-10	-	0-19 мм	-	цифрова електронна комп'ютерна система	-	0-160 мм	0,012 мм	0,01 мм	не фіксується
Температура перед чистовою групою	-	980-1150 °С	-	Пірометр  Вторинний прилад	MIRAGE- CON MR- 2010-13C-1- 2/1 A-650  М-1730	800-1200 °С  800-1300 °С  800-1500 °С	+/-5 t вимір.  0,5  1,0	  10 °С  10 °С	Цифрове табло, смуга самописцю

Продовж. табл. Г.4.20

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Струмові навантаження на двигуни головних приводів чистової групи	-	0-15 кА	-	амперметр	М-42300	0-20 кА	2,0	0,5 кА	не фіксується
Швидкість прокатки в клітках: №5 №6 №7, №8 №9	-	79-150 м/хв 114-216 м/хв 225-489 м/хв 357-672 м/хв	-	цифрова електронна комп'ютерна система	-	0-180 м/хв 0-250 м/хв 0-550 м/хв 0-800 м/хв	-	1 м/хв	не фіксується
швидкість прокатки в клітці №10	-	220-720 м/хв	-	цифрова електронна комп'ютерна система	-	0-800 м/хв	-	1 м/хв	змінний рапорт
Температура штаби за кліттю №10	-	800-920 °С	-	Пірометр Marathon  Вторинний прилад	MR1SASF  А-650  М-1730	600-1500 °С  800-1300 °С  600-1100 °С	±0,75% t максимальної 0,5  1,0	1 °С  10 °С	смуги самописцю пірометра, змінний рапорт

Продовж. табл. Г.4.20

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Температура штаби перед моталками	-	500-800 °C	-	Пірометр Marathon Вторинний прилад	MR1SASF A-650 M-1730	600-1500 °C 800-1300 °C 600-1100 °C	±(0,3% t вимір. ±1 °C) 0,5 1,0	1 °C 10 °C	смуги самописцю пірометра, змінний рапорт
Тиск в системі гідросбиву окалини	-	7,8-14 МПа	-	Перетворювач тиску Вторинний прилад	МП M-1730	0-1 МПа	1,0	0,02 МПа	агрегатний журнал
Товщина штаби	-	1,5-9,0 мм	±0,13 – +0040/-0,80 мм	Мікрометр листовий Товщиномір	МЛ-10 НЗВТ М 215-FAG	0-10 мм 1-12 мм	2 2 %	0,01 мм 0,01 мм	змінний рапорт
Ширина штаби	-	1000-1590 мм	+20/+30 мм	Спец. лінійка	НЗВТ	950-1600 мм	-	1 мм	змінний рапорт
Відстань від крайки штаби	-	25-40 мм	-	Рулетка вимірювальна	Р 2 УЗК	0-2000 мм	3	1 мм	не фіксується

## Додаток Г.5

## Технічні характеристики деякого основного устаткування стану 1680

## МК «Запоріжсталь»

Таблиця Г.5.1

## Коротка технічна характеристики устаткування чорнової групи стану 1680

Найменування параметру	Технічні дані по клітках				
	01	1	2	3	4
Номінальна потужність двигуна, кВт	2000	6300	4000	4000	4000
Кількість оборотів двигуна, об/хв	350-500	428	500	400-600	400-600
Передавальне число редуктора	23,99	19,26	19,5	10,15	7,36
Швидкість прокатки, м/с	0,98	1,02	1,05-1,13	0-1,183	0-2,53
Діаметр робочих валків, мм	900-810	940-880	850-780	593-580	593-580
Довжина бочки валків, мм	1680	2440	1680	1680	1680
Діаметр опорних валків, мм	-	1320-1245	1320-1245	1240-1170	1240-1170
Матеріал робочих валків	Сталь 50ХН	Сталь 90ХФ	Сталь 90ХФ	Чавун ЛПХНд63	Чавун ЛПХНд63
Матеріал опорних валків	-	Сталь 90ХФ	Сталь 90ХФ	Сталь 90ХФ	Сталь 90ХФ
Відстань до наступної клітки, мм	6250	21000	19100	28770	58770
Максимальна сила прокатки, МН	8	25	20	20	20
Максимальний обертаючий момент, кНм	1350	2350	1850	1000	850
Допустиме навантаження двигуна, кВт	2600	7500	6800	6500	6200
Коефіцієнт перевантаження	2,5	1,5	1,5	1,5	1,5

Таблиця Г.5.2

## Коротка технічна характеристики устаткування чистової групи стану 1680

Найменування параметру	Технічні дані по клітках						
	окапиноломатель	5	6	7	8	9	10
Номінальна потужність двигуна, кВт	3,65	4000 / 5000	4000 / 5000	4000 / 5000	4000 / 5000	4000 / 5000	4000 / 5000
Кількість оборотів двигуна, об/хв	250-750	270-550	270-550	270-550	270-550	270-550	270-550
Передавальне число редуктора	19,55	7,24	4,67	2,75	2	1,56	1,41
Швидкість прокатки, м/с	0,396-1,23	1,16-2,2	1,89-3,42	3,3-5,78	4,16-7,93	5,35-10,14	5,9-11,25
Діаметр робочих валків	900-810	620-580	620-580	620-580	620-580	620-580	620-580
Довжина бочки валків, мм	1680	1680	1680	1680	1680	1680	1680
Діаметр опорних валків	-	1170-1240	1240-1170	1240-1170	1240-1170	1240-1170	1240-1170

Продовж. табл. Г.5.2

Матеріал робочих валків	Сталь 50ХН	Чавун ЛПХН-63	Чавун ЛПХН-63	Чавун ЛПХН-63	Чавун ЛПХН-63	Чавун ЛПХН-63	Чавун ЛПХН-63
Матеріал опорних валків	-	Сталь 90ХФ	Сталь 90ХФ	Сталь 90ХФ	Сталь 90ХФ	Сталь 90ХФ	Сталь 90ХФ
Відстань до наступної кліті, мм	6190	5840	5840	5840	5840	5840	5840



## Додаток Г.6

**Технічні характеристики деякого основного устаткування стану Стеккеля  
заводу Ferriera Valsider, Італія**

Таблиця Г.6.1

**Коротка технічна характеристика методичної печі фірми «Бендотті» стану  
Стеккеля**

Найменування параметрів	Технічні дані
Кількість печей, шт	1
Довжина печі: - по кладці, мм - активного поду, мм	23600 21000
Ширина печі: - по кладці, мм - в світлі, мм	12220 10800
Висота верхніх зон, мм - нижніх зон, мм - робочого вікна, мм	1800 2200 450
Продуктивність печі, т/ч	120-135
Кількість зон, шт	6
Температура в зонах: - мінімальна, °С - максимальна, °С	800 1330
Температура металу на виході з печі, °С	1230
Паливо	Природний газ
Теплота згорання палива, ккал/м <sup>3</sup>	8200
Максимальні витрати палива, м <sup>3</sup> /год	6000
Теплова потужність печі, ккал/год	49200000
Кількість пальників, шт.	73
Зводові пальники: - кількість, шт - потужність, ккал/год тип BRG 100 тип BRG 150	63 360000 615000
Бокові пальники: - кількість, шт - потужність, ккал/год тип В300-А3	10 2457000
Вентилятор: - кількість, шт - продуктивність, м <sup>3</sup> /год - тиск, Па - потужність двигуна, кВт	1 60000 1200 250

Таблиця Г.6.2

**Коротка технічна характеристика прохідної роликової печі стану Стеккеля**

Найменування параметрів	Технічні дані
Кількість печей, шт	1
Ширина робочого вікна, мм	1850
Висота робочого вікна, мм	270
Висота робочого простору, мм	1650
Ширина робочого простору, мм	2000
Продуктивність печі, т/год	120
Теплова потужність печі, ккал/год	21320000
Паливо	Природний газ
Максимальні витрати природного газу, нм <sup>3</sup> /год	2600
Кількість зон регулювання, шт	7
Довжина зон регулювання, мм	64000
Кількість димовідвідних каналів, шт	3
Кількість пальників, шт (тип BRH2)	28
Максимальна температура в зонах, °С	1300
Температура металу на виході з печі, °С	1230-1250

Таблиця Г.6.3

**Коротка технічна характеристика печей камерного типу з барабанними моталками, стану Стеккеля**

Найменування параметрів	Технічні дані
Кількість печей, шт	2
Ширина робочого вікна, мм	1850
Висота робочого вікна, мм	250
Теплова потужність печі, ккал/год	2050000
Паливо	Природний газ
Температура в печі, °С	1100
Температура металу на виході з печі, °С	1070
Тип переносного пристрою для виміру температури	пірометр FRS
Кількість димовідвідних каналів	1
Швидкість намотування штаби, м/с	0-7
Швидкість заправки штаби, м/с	0-7
Натяг штаби при намотуванні	Poll control
Товщина штаби, що намотується, мм	2-20
Ширина штаби, що намотується, мм	1550
Зовнішній діаметр рулону, що намотується, мм	≤2250
Максимальна маса рулону, т	30
Діаметр барабану, мм	1372
Матеріал барабану, мм	(Cr-Ni-Mo-V)
Максимальна товщина, що змотується, мм	
- проектні дані	25
- фактичні дані	20
Температура змотування штаби (фактичні дані), °С	950÷1000

Таблиця Г.6.4

**Коротка технічна характеристика кліті 3170, стану Стеккеля**

Найменування параметрів	Технічні дані
Тип кліті	«дуо»
Матеріал робочих валків	Високохромиста сталь
Діаметр робочих валків, мм (max/min)	1110/1000
Діаметр шейки, мм	630
Довжина бочки, мм	3170
Натискний пристрій	Гідравлічний
Електродвигун, шт	2
- потужність, кВт	2×2237,1
- швидкість обертання, об/хв	0-40-80
Кількість оборотів валу при захваті, об/хв	35
Номинальний обертаючий момент, кН×м	2х545
Коефіцієнт перевантаження	1,5
Максимальний обертаючий момент, кН×м	2х817,5
Гідрозбив:	
- з передньої сторони стану верх/низ тиск, атм	250
- з задньої сторони стану верх/низ тиск, атм	160
- верхній, атм	20
Максимальна сила прокатки, МН	25
Запобіжна межа по силі прокатки, МН	22
Жорсткість кліті, МН/мм	1,3 (1,8)

Таблиця Г.6.5

**Коротка технічна характеристика кліті 1780, стану Стеккеля**

Найменування параметрів	Технічні дані
1	2
Тип кліті	Горизонтальна «кварто»
Матеріал валків:	
- опорні	литі сталеві
- робочі	чавунні (бандаж CrNi)
Діаметр валків (max/min), мм:	
- опорні	1280/1153
- робочі	660/590
Діаметр шейки, мм:	
- опорні (max/min)	739,8/630,7
- робочі	406
Довжина бочки, мм:	
- опорні	1650
- робочі	1780
Натискний пристрій	гідроциліндри
Електродвигун, шт	2
- потужність, кВт	2×4474,2
- швидкість обертання, об/хв	0-125-300
Кількість обертів валу при захваті, об/хв	61

Продовж. табл. Г.6.5

1	2
Номінальний обертаючий момент, кН×м	2х348
Коефіцієнт перевантаження	2,0
Максимальний обертаючий момент, кН×м	2х696
Гідрозбив (с передньої сторони стану верх/низ) тиск, атм	250
Максимальна сила прокатки, МН	24
Жорсткість кліті, МН/мм	2,6 (4,6)
Підшипники опорний/робочий	Масляний (ПРТ)/роликовий

Таблиця Г.6.6

**Коротка технічна характеристика установки ламінарного охолодження прокату, стану Стеккеля**

Найменування параметрів	Технічні дані
Довжина установки, м	41
Охолоджувальна рідина	вода
Температура охолоджувальної води, °С	+25
Система охолодження розкатів: - верх - низ	Душировання з U-подібними трубками сопла
верх	
Кількість охолоджувальних секцій, шт	6
Тиск води, бар	0,6-0,8
Орієнтовна кінцева товщина металу, мм / середня швидкість охолодження, °С/с	3,0 / 40,0 10,0 / 15,0 20,0 / 9,0

Таблиця Г.6.7

**Коротка технічна характеристика моталки для кінцевого змотування, стану Стеккеля**

Найменування параметрів	Технічні дані
Діаметр барабану, мм	750
Кількість роликів, що змотують, шт	3
Максимальна товщина змотування, мм: - фактичні дані - проектні дані	20 25
Температура змотування (фактичні дані), °С	650÷950

## Додаток Д

## Опис методології створення математичної моделі в системі Abaqus CAE

В якості інструменту (валка) було обрано аналітично тверде тіло, а в якості заготовки (штаби) – тіло, що деформується, рис. Д.1.

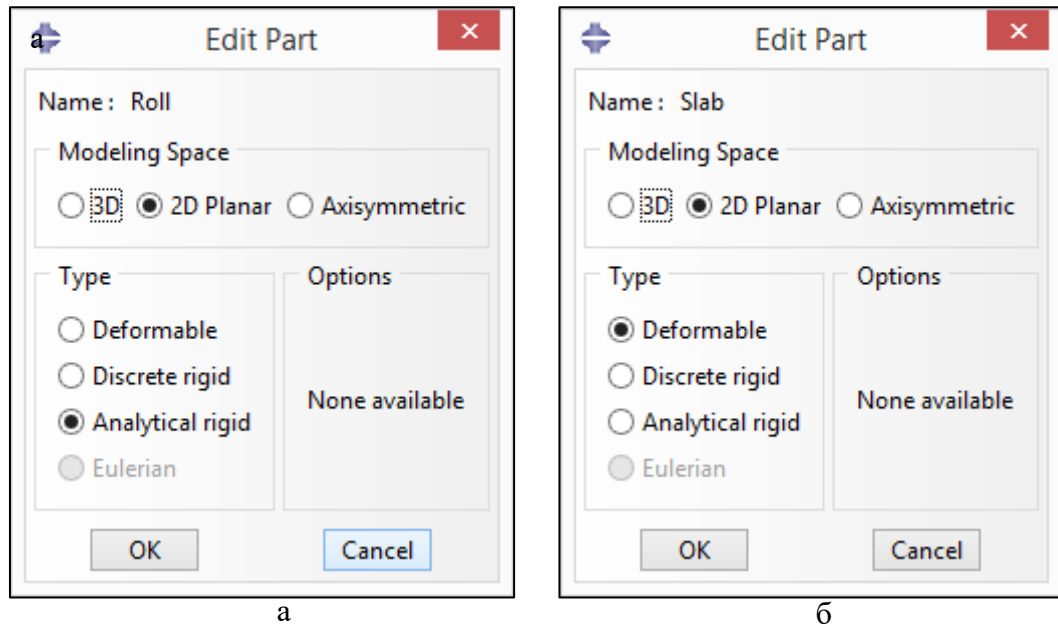


Рис. Д.1. Створення елементів моделі: валка (а), штаби (б)

Створення ескізу валка полягало в побудові чотирьох дуг із заданим радіусом та єдиним центром, рис. Д.2.

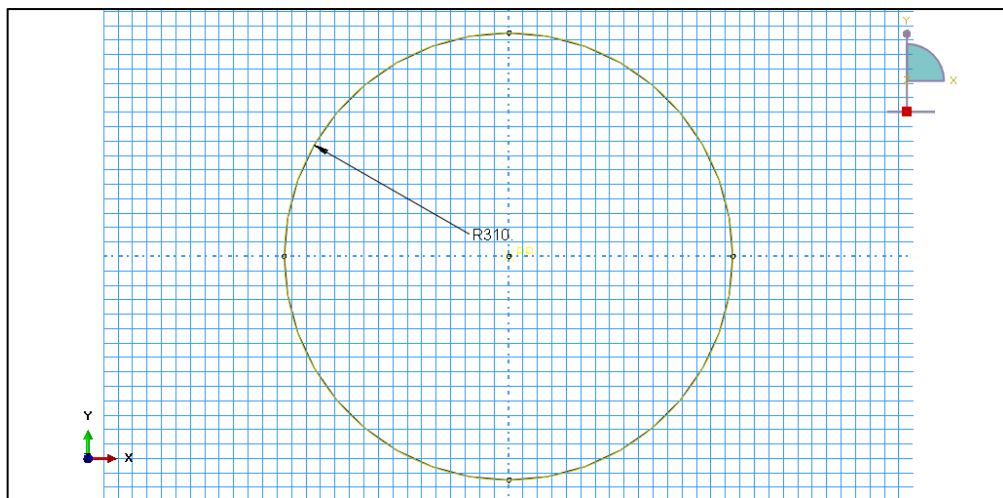


Рис. Д.2. Створення ескізу валка

Для визначення сили та моменту прокатки, вказування центру валка було створено довідкову точку RP1, яку додано до налаштувань елемента «Валок», рис. Д.3.

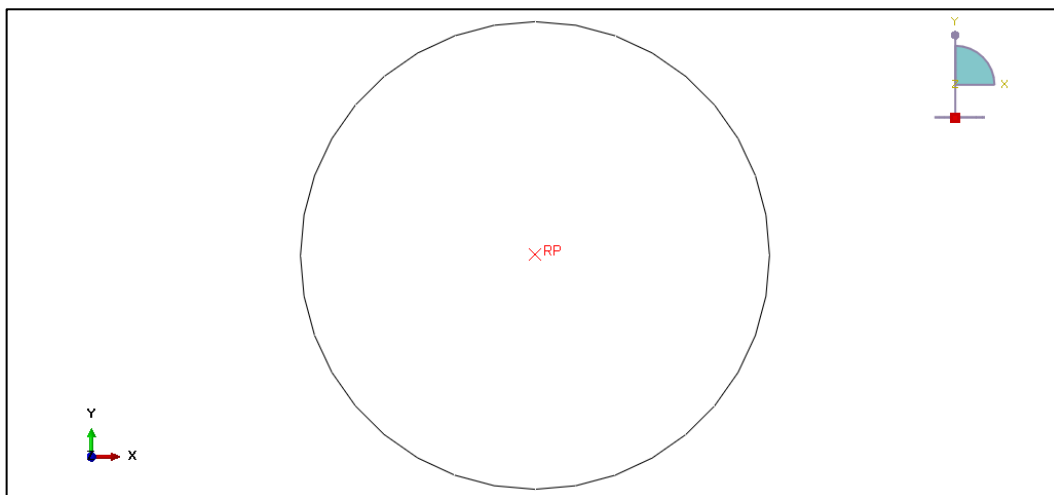


Рис. Д.3. Створення довідкової точки (Reference Point) елемента «Валок»

Для утворення контакту між валком та штабою в елементі «Валок» було вказано контактну поверхню, рис. Д.4.

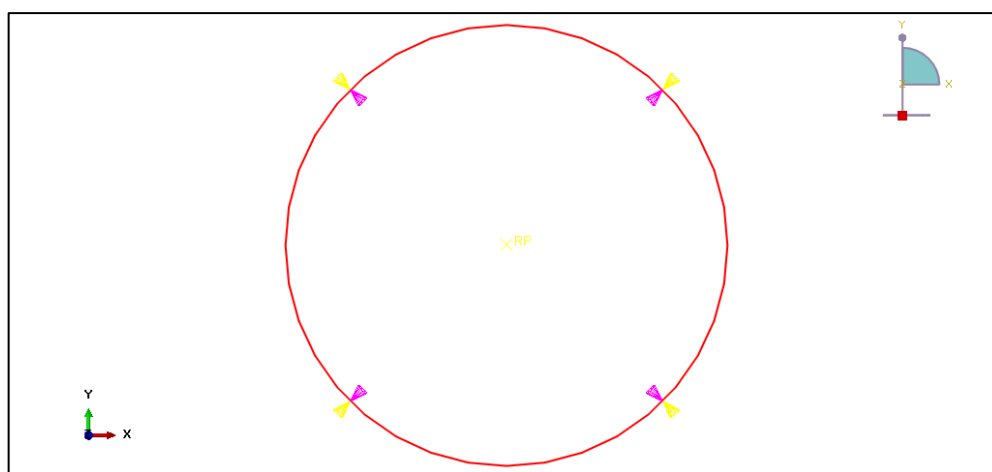


Рис. Д.4. Створення контактної поверхні елемента «Валок»

Ескіз штаби було створено у вигляді прямокутника висота якого дорівнює половині товщини штаби, а довжина перевищує десятикратну протяжність осередку деформації, рис. Д.5.

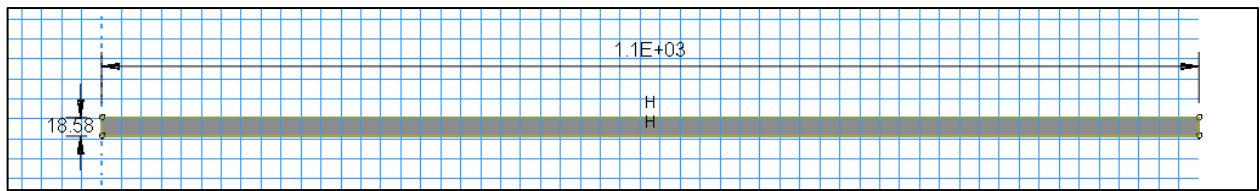


Рис. Д.5. Побудова ескізу штаби

В налаштуваннях елемента «Штаба» було вибрано ескіз повністю для вказування тіла, що деформується та його нижньої грані, та для вказування граничних умов по симетрії процесу, рис. Д.6.

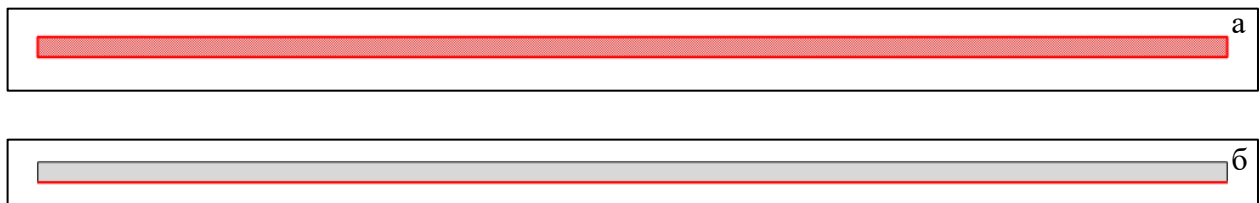


Рис. Д.6. Створення налаштувань об'єкту «Штаба» для визначення тіла, що деформується (а) та для вказання граничних умов по симетрії процесу (б)

Для вказування контактних поверхонь були вибрані вертикальні та верхня горизонтальна грань ескізу, рис. Д.7.

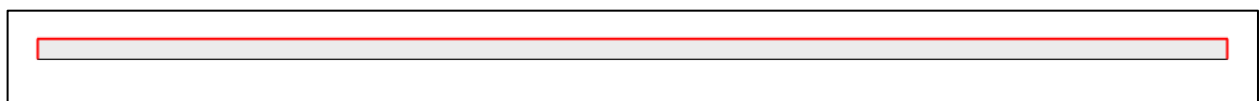


Рис. Д.7. Створення контактних поверхонь елемента «Штаба»

При створенні сітки скінченних елементів було враховано, що по висоті заготовки повинно бути не менше ніж 8 елементів, по довжині протяжність скінченного елемента не повинна перевищувати 1/10 довжини осередку деформації. Приклад сітки скінченних елементів наведений на рис. Д.8.

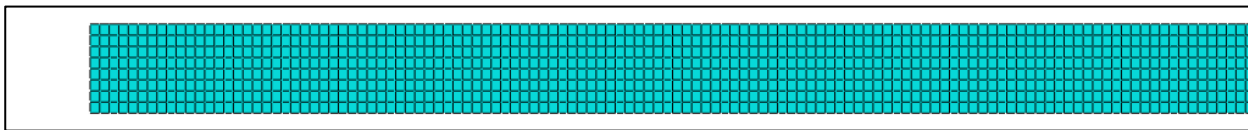


Рис. Д.8. Створення сітки скінченних елементів елементу «Штаба»

При накладанні матеріалу на налаштунки елементу «Штаба» було враховано ширину штаби, яка дорівнює 1500 мм, рис. Д.9.

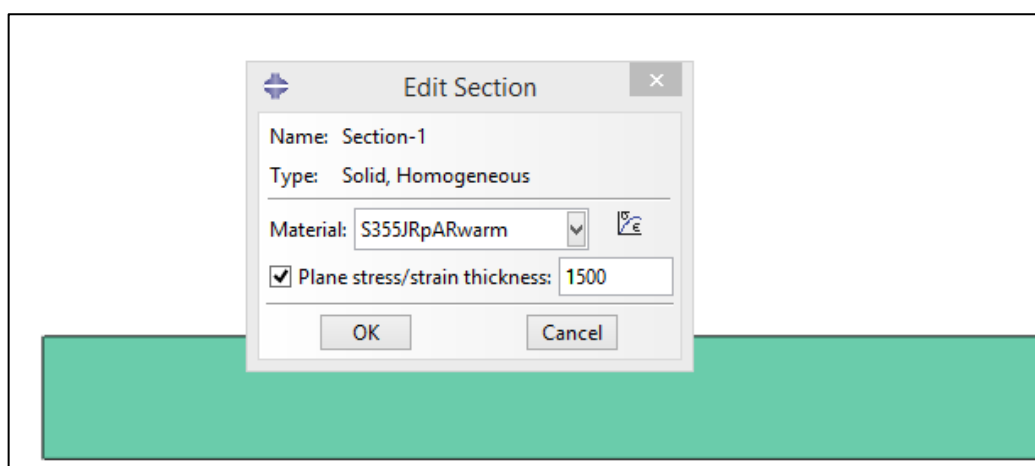


Рис. Д.9. Створення секції елементу «Штаба»

При побудові зборки, з метою скорочення часу розрахунку було обрано симетричну збірку, яка включала верхній валок та половину заготовки, рис. Д.10.

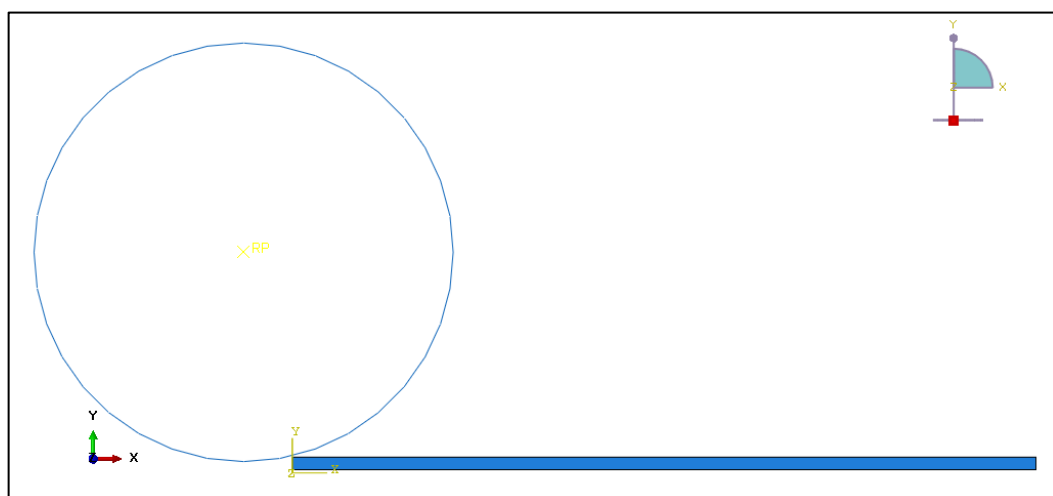


Рис. Д.10. Побудова збірки



При створенні кроку розрахунку було обрано динамічну постановку задачі, яка полегшує задавання металу в валки. При визначенні часу розрахунку було враховано швидкість прокатки та довжину штаби, рис. Д.11.

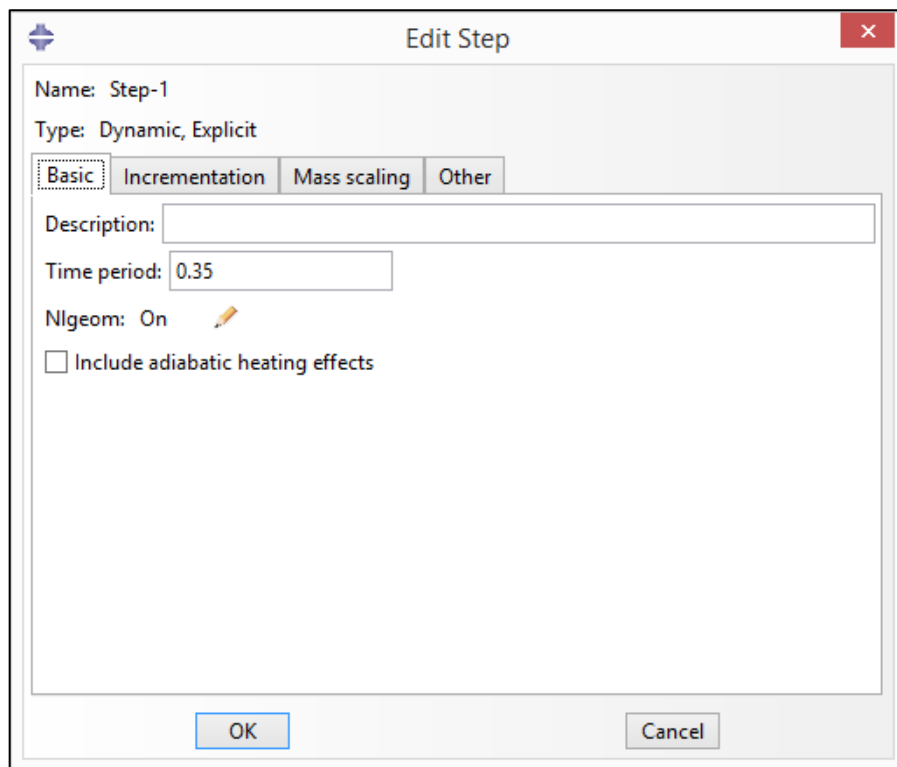


Рис. Д.11. Створення кроку розрахунку

Для визначення сили та моменту прокатки у вихідних даних було обрано реакції в довідковій точці валка RP1, рис. Д.12.

В якості контактних умов тертя було використано закон сухого тертя, рис. Д.13, при цьому коефіцієнт тертя визначали по наступній формулі [207]:

$$f = \frac{1}{2} \left[ 0,25 + 0,006 \left( 7 - \frac{L}{h_{cp}} \right)^2 - 0,01 \frac{\Delta h}{L} \left( V \frac{L}{h_{cp}} - 57 \right) - 0,1 \left( \frac{t}{1000} - 1 \right) \right], \quad (Д.1)$$

де  $L$  – довжина осередку деформації, мм;  $h_{cp}$  – середня товщина прокату, мм;  $\Delta h$  – абсолютне обтиснення, мм;  $V$  – швидкість прокатки, мм/с;  $t$  – температура прокатки, °С.

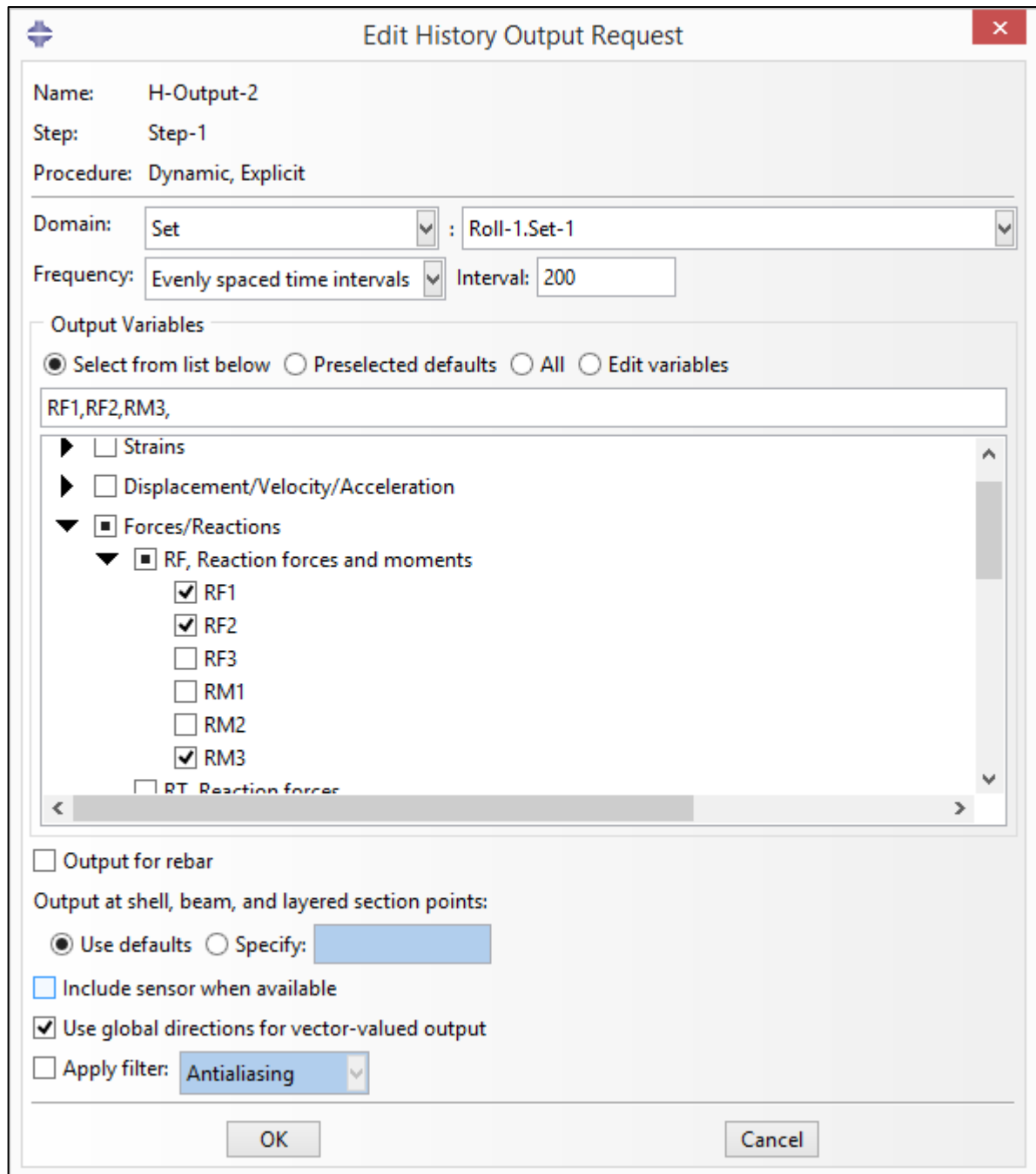


Рис. Д.12. Визначення в якості вихідних даних реакції в довідковій точці валка RP1 в вертикальній (RF2) та горизонтальній (RF2) площині, а також моменту обертання (RM3)

В якості контактних пар були обрані поверхні, що створені на етапі побудови елементів, рис. Д.4, Д.7. В якості методу було використано кінематичний контактний метод, рис. Д.14.

В якості граничних умов для валка було обране його обмеження по лінійному переміщенню та вільне обертання відносно довідкової точки, а також його кутова швидкість, яка відповідала швидкості прокатки, рис. Д.15.

Для зменшення часу розрахунків в моделі, згідно з рекомендаціями розробника програмного забезпечення, було використано симетрію процесу. Для цього була задана гранична умова по симетрії процесу, рис. Д.16.

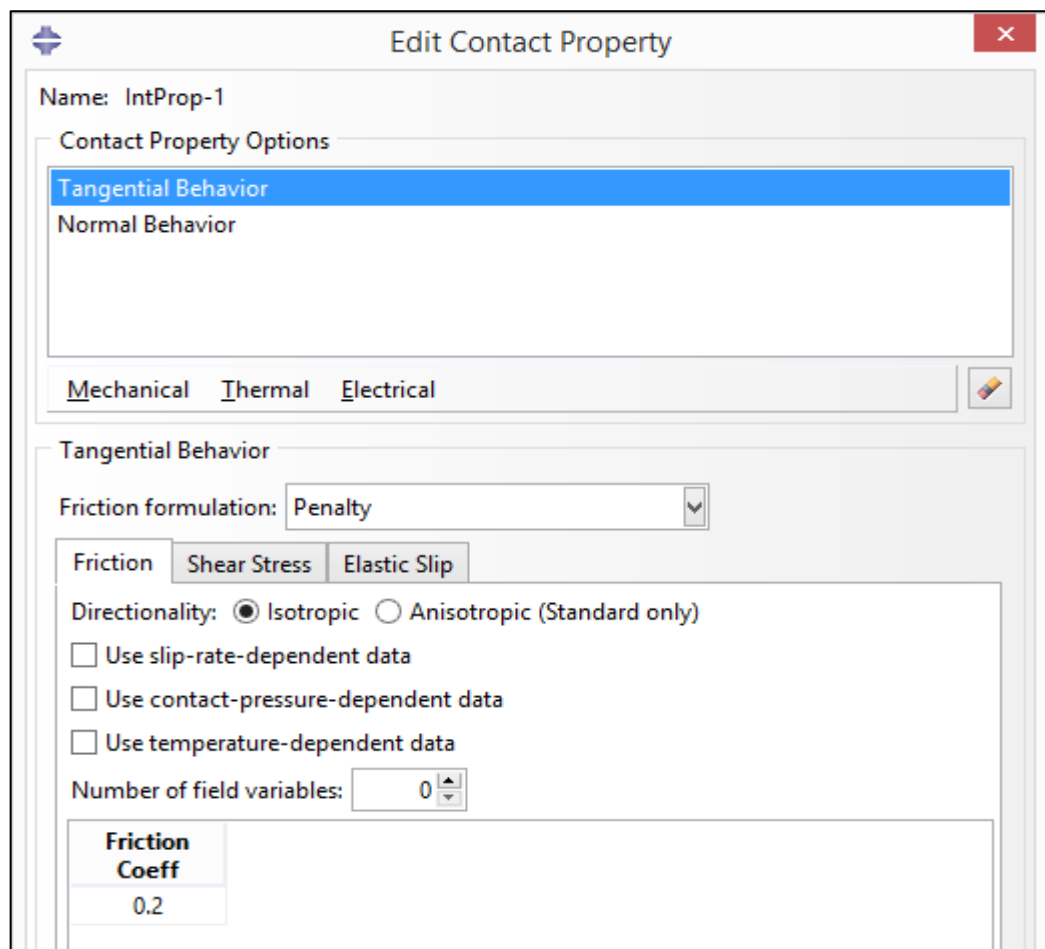


Рис. Д.13. Створення контактних умов тертя

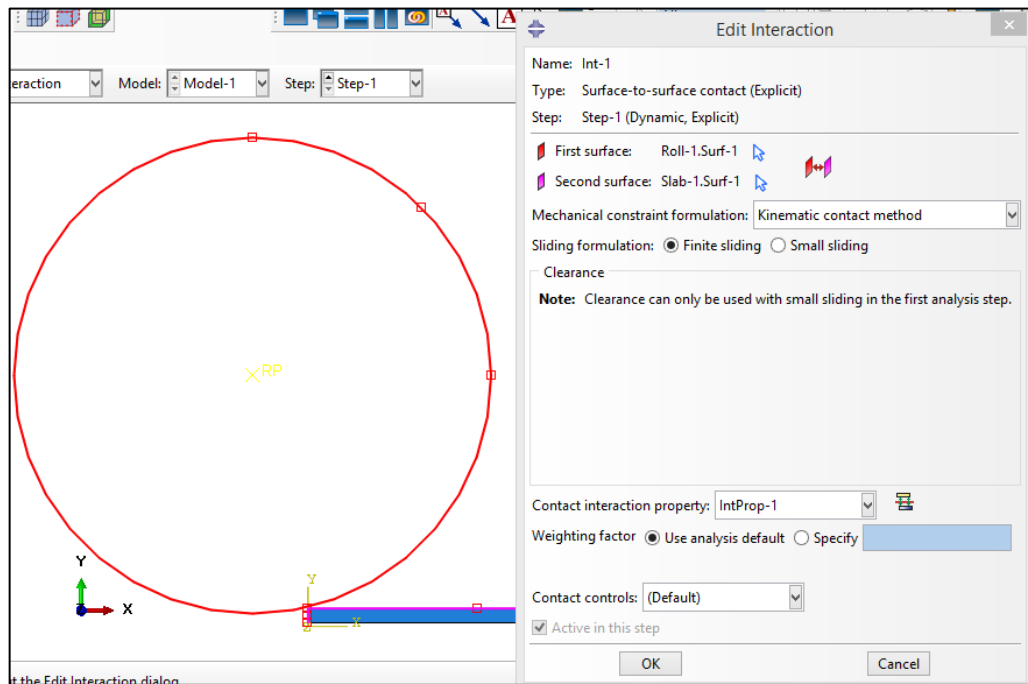
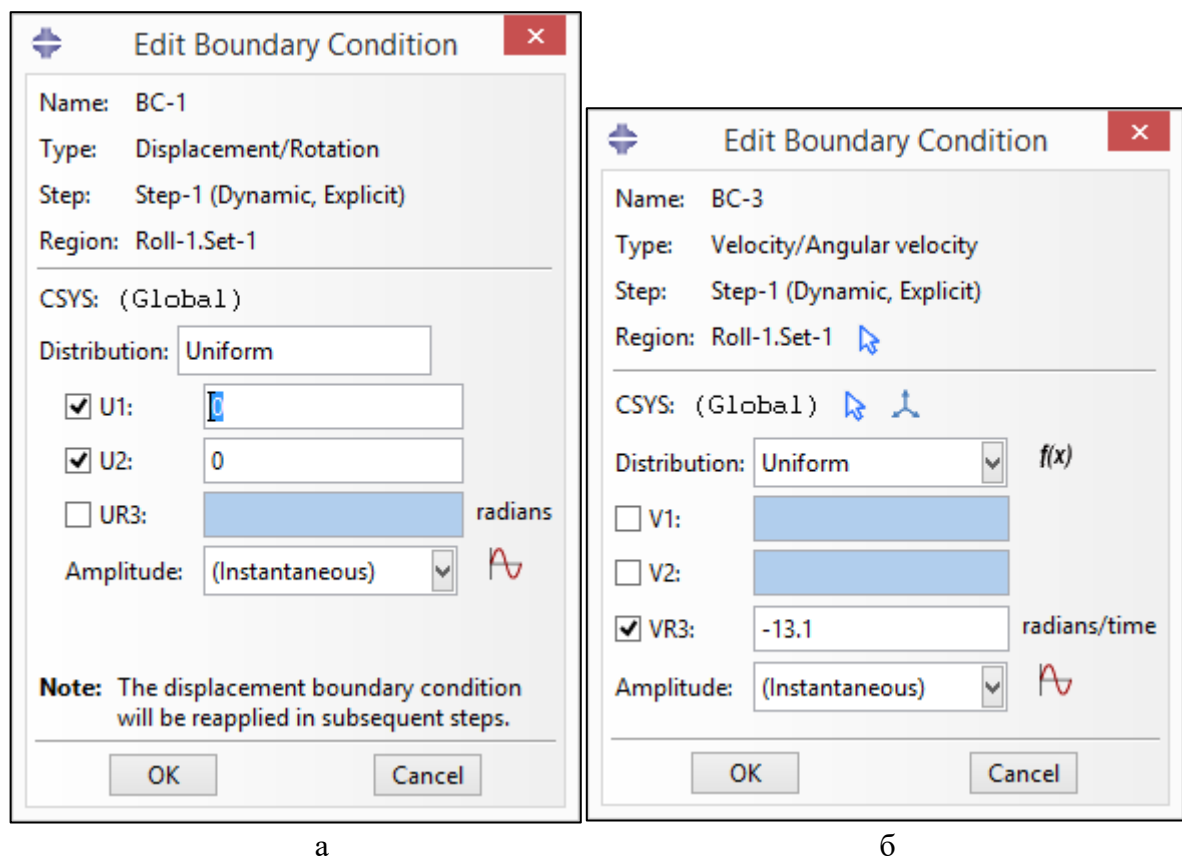


Рис. Д.14. Створення контактних пар



а

б

Рис. Д.15. Створення граничних умов для валка: обмеження переміщень (а); кутова швидкість обертання (б)

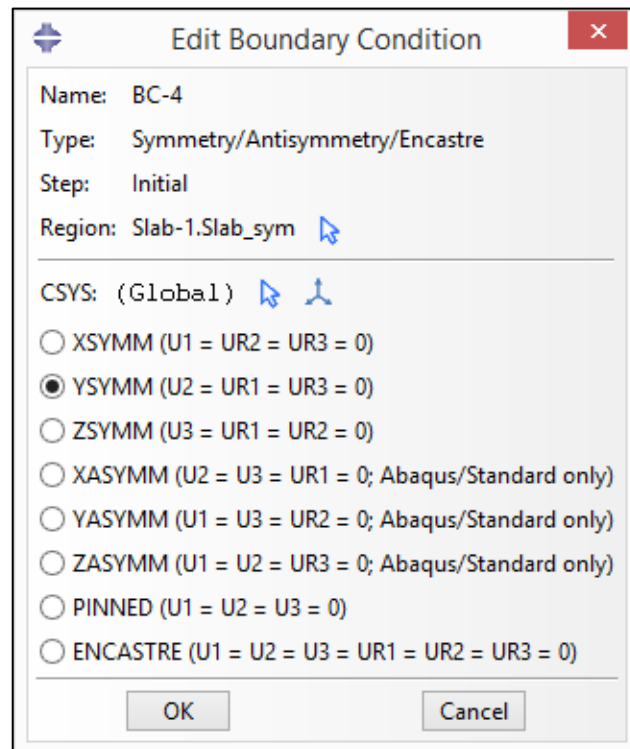


Рис. Д.16. Граничні умови щодо симетрії процесу

Для коректного врахування особливостей гарячої прокатки було використано модель матеріалу, яка враховує температуру прокатки. З цією метою на налаштування елемента «Штаба» було накладено поле, яке визначало його температуру, рис. Д.17.

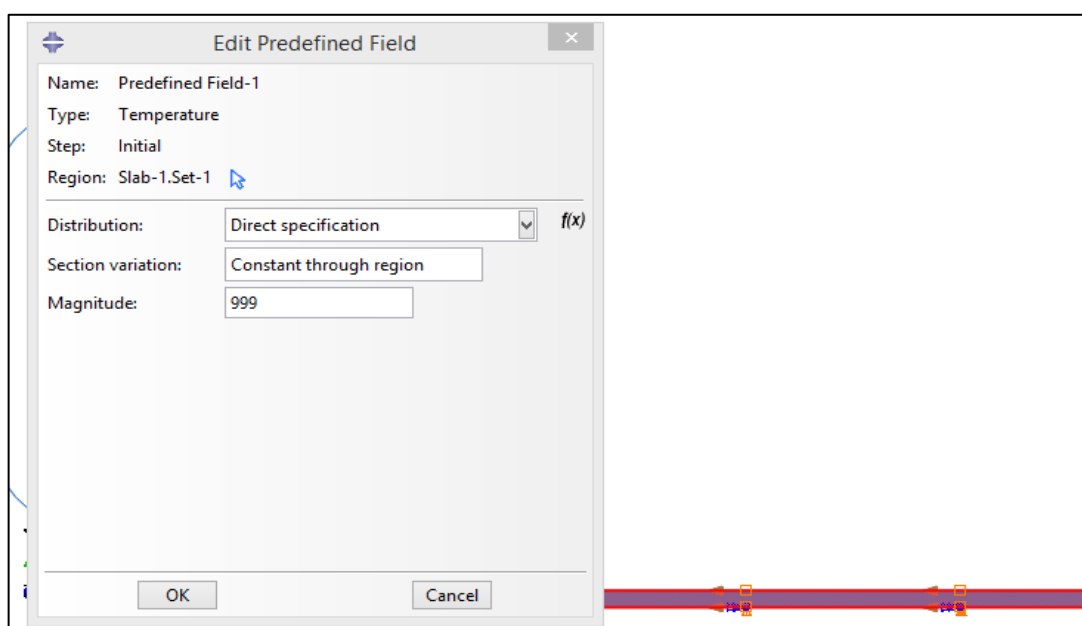


Рис. Д.17. Накладання температурного поля на елемент «Штаба»

Для надання руху смузі було накладено поле зі швидкістю прокатки у мм/с, рис. Д.18.

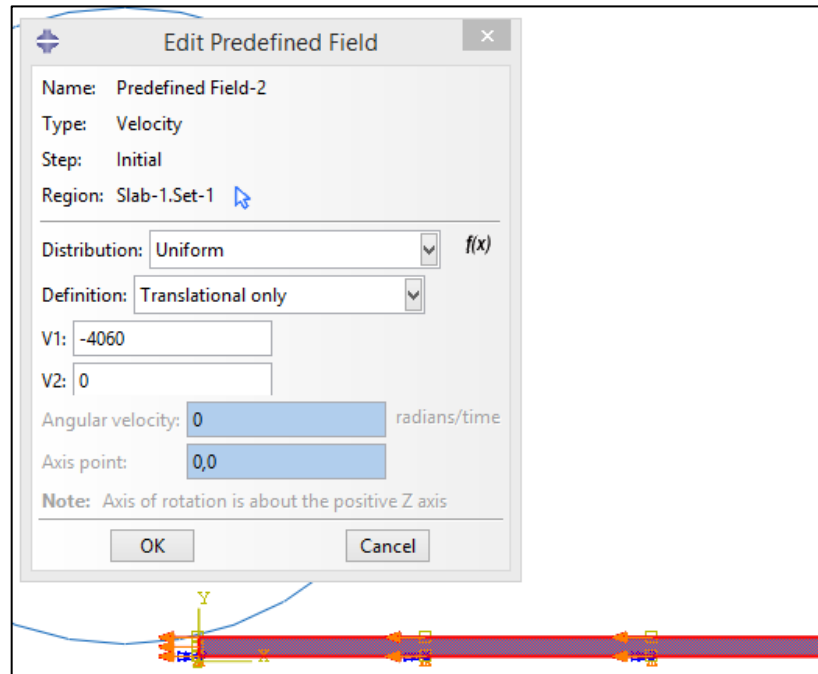


Рис. Д.18. Накладання швидкісного поля на елемент «Штаба»

При прокатці в чистовій кліті на штабу діє передній та задній натяг, який в моделі було задано за допомогою зовнішніх навантажень у вигляді напруження переднього та заднього натягу, рис. Д.19.

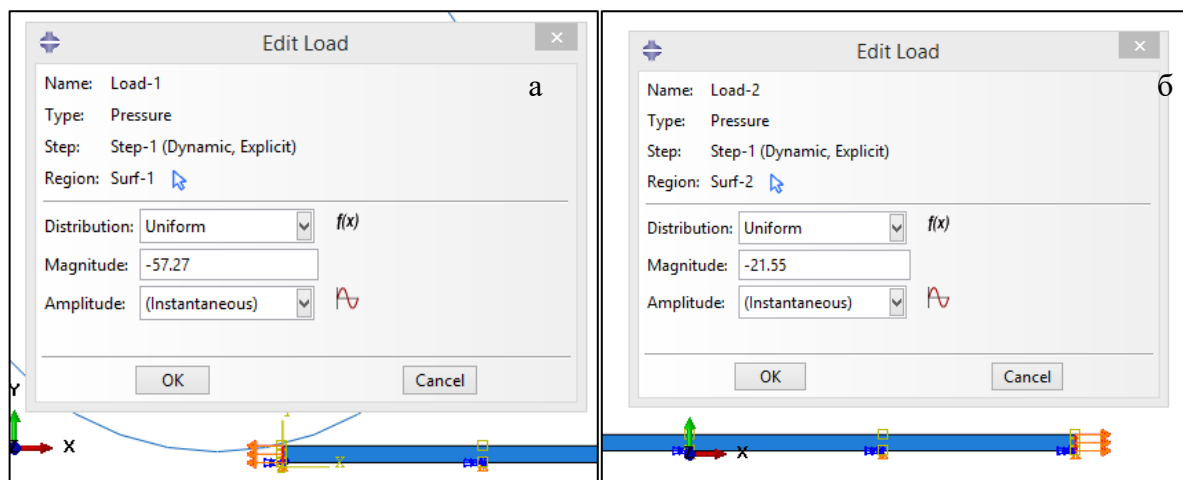


Рис. Д.19. Накладання зовнішніх навантажень у вигляді напруження переднього (а) та заднього (б) натягу

При створенні розрахункового блоку було використано два ядра процесору,  
рис. Д.20.

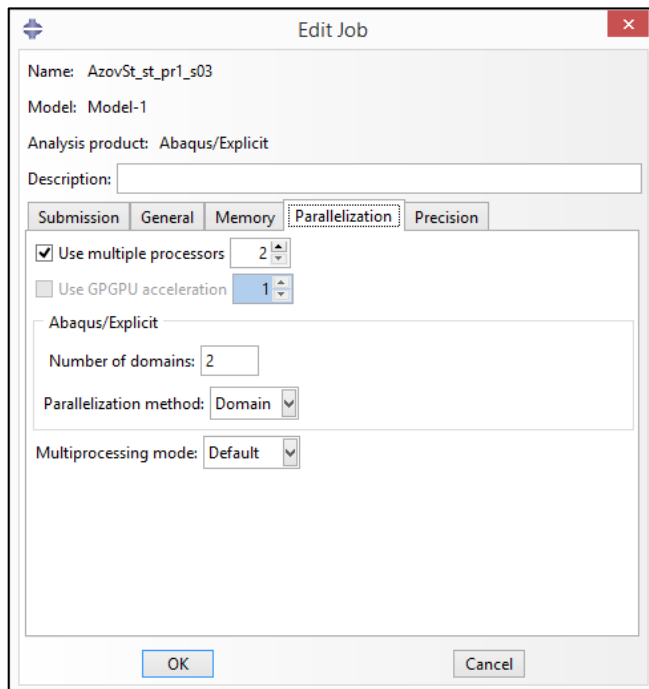


Рис. Д.20. Створення розрахункового блоку

## Додаток Е

**Методи інтерполяції даних по розміру зерна в залежності від температурно-деформаційних умов, запропоновані авторами робіт [135, 208]**

Оскільки експериментальні дані, які отримані при визначенні розміру зерна, при різноманітних температурах можуть мати відмінності, доцільно провести інтерполяцію вихідних даних кількома методами, а потім вибрати той, який дає найменшу похибку.

Лінійна інтерполяція полягає в тому, що задані точки  $(x_i, y_i)$ , де  $(i = 0, 1, \dots, n)$ , з'єднують відрізками прямої, а функція  $f(x)$  наближається до ломаної з верхівками в даних точках [211]. Рівняння кожного відрізка ломаної лінії різні. Оскільки є  $n$  інтервалів  $(x_i, x_{i+1})$ , то для кожного з них в якості рівняння інтерполяційного многочлену використовують рівняння прямої, яка проходить через дві точки. Зокрема, для  $i$ -го інтервалу можна записати рівняння прямої, яка проходить через точки  $(x_i, y_i)$  та  $(x_{i+1}, y_{i+1})$ , у вигляді:

$$\frac{y-y_i}{y_{i+1}-y_i} = \frac{x-x_i}{x_{i+1}-x_i}, \quad (\text{E.1})$$

Звідси:

$$y = a_i x + b_i, \quad x_i \leq x \leq x_{i+1}, \quad a_i = \frac{y_{i+1}-y_i}{x_{i+1}-x_i}, \quad b_i = y_i - a_i x_i. \quad (\text{E.2})$$

Таким чином, формула шматочно-лінійної інтерполяції має вигляд:

$$f(x) = y_i \cdot \frac{x-x_{i+1}}{x_i-x_{i+1}} + y_{i+1} \frac{x-x_i}{x_{i+1}-x_i}, \quad (\text{E.3})$$

Відповідно, при використанні лінійної інтерполяції спочатку потрібно визначити інтервал в який попадає значення аргументу  $x$ , а потім підставити його в формулу (E.3) та знайти приблизне значення функції в цієї точці.

Квадратична інтерполяція, в якої в якості інтерполяційної функції на відріжку  $(x_{i-1}, x_{i+1})$  приймають квадратний тричлен [211]:

$$y = a_i x^2 + b_i x + c_i, \quad x_{i-1} \leq x \leq x_{i+1} \quad (\text{E.4})$$



Залежність (Е.4) містить три невідомі коефіцієнти  $a_i, b_i, c_i$ , для визначення яких необхідні три рівняння, якими служать умови проходження параболи (Е.4) через точки  $(x_{i-1}, y_{i-1}), (x_i, y_i)$  та  $(x_{i+1}, y_{i+1})$ . Ці умови записують у вигляді:

$$\begin{cases} a_i x_{i-1}^2 + b_i x_{i-1} + c_i = y_{i-1}; \\ a_i x_i^2 + b_i x_i + c_i = y_i; \\ a_i x_{i+1}^2 + b_i x_{i+1} + c_i = y_{i+1}. \end{cases} \quad (\text{Е.5})$$

Інтерполяцію для будь якої точки  $x \in [x_0, x_n]$  проводять по трьох найближчих точках.

Кубічна сплайн-інтерполяція, в загальному випадку, для функції  $y = f(x)$  необхідно знайти наближення  $y = j(x)$  таким чином, щоб  $f(x_i) = j(x_i)$  в точках  $x = x_i$ , а в інших точках відрізка  $[a, b]$  значення функції  $f(x)$  та  $j(x)$  були близькими між собою. Кубічним інтерполяційним сплайном, який відповідає даній функції  $f(x)$  і даним вузлам  $x_i$ , називають функцію  $S(x)$ , яка задовольняє наступним вимогам [209, 210]: а) на кожному сегменті  $[x_{i-1}, x_i], i = 1, 2, \dots, N$  функція  $S(x)$  є поліномом третього ступеню; б) функція  $S(x)$ , а також її перша та друга похідні безперервні на відріжку  $[a, b]$ ; в)  $S(x_i) = f(x_i), i = 0, 1, \dots, N$ .

На кожному з відрізків  $[x_{i-1}, x_i], i = 1, 2, \dots, N$  шукали функцію  $S(x) = S_i(x)$  у вигляді поліному третього ступеню:

$$S_i(x) = a_i + b_i(x - x_{i-1}) + c_i(x - x_{i-1})^2 + d_i(x - x_{i-1})^3, \quad x_{i-1} \leq x \leq x_i, \quad (\text{Е.6})$$

де  $a_i, b_i, c_i, d_i$  – коефіцієнти, які підлягають визначенню на всіх  $n$  елементарних відрізках.

Щоби система алгебраїчних рівнянь мала рішення, необхідно, щоб число рівнянь дорівнювало числу невідомих. Тому необхідно отримати  $(4 \cdot n)$  рівнянь.

Перші  $(2 \cdot n)$  рівняння отримують з умов, що графік функції  $S(x)$  повинен проходити через задані точки, тобто  $S_i(x_{i-1}) = y_{i-1}, S_i(x_i) = y_i$ .

Ці умови записують у вигляді:

$$S_i(x_{i-1}) = a_i = y_{i-1}, \quad (\text{E.7})$$

$$S_i(x_i) = a_i + b_i h_i + c_i h_i^2 + d_i h_i^3 = y_i, \quad (\text{E.8})$$

де  $h_i = x_i - x_{i-1}$ ,  $i = 1, 2, \dots, n$ .

Наступні  $(2 \cdot n - 2)$  рівняння витікають з умов безперервності перших та других похідних у вузлах інтерполяції, тобто умови гладкості кривої у всіх точках [209]. Після перетворень, виконаних згідно з теорією сплайнів [209, 211], остаточно отримують наступну систему рівнянь для коефіцієнтів  $c_i$  ( $c_1 = 0, c_{n+1} = 0$ ):

$$h_{i-1} c_{i-1} + 2(h_{i-1} + h_i) c_i + h_i c_{i+1} = 3 \left( \frac{y_i - y_{i-1}}{h_i} - \frac{y_{i-1} - y_{i-2}}{h_{i-1}} \right). \quad (\text{E.9})$$

По знайдених коефіцієнтах  $c_i$  розраховують  $d_i$  та  $b_i$  [209, 211]:

$$d_i = (c_{i+1} - c_i) / 3h_i, \quad i = 1, 2, \dots, n-1, \quad d_n = -c_n / 3h_n \quad (\text{E.10})$$

$$b_i = \frac{y_i - y_{i-1}}{h_i} - \frac{h_i}{3} (c_{i+1} + 2c_i), \quad i = 1, 2, \dots, n-1, \quad b_n = \frac{y_n - y_{n-1}}{h_n} - \frac{3}{2} (h_n c_n). \quad (\text{E.11})$$

Глобальна інтерполяція, класичний підхід вимагає строгого співпадіння значень  $f(x)$  и  $\phi(x)$  в точках  $x_i$  ( $i = 0, 1, \dots, n$ ) [209, 210]. Будемо шукати інтерполяційну функцію  $\phi(x)$  у вигляді поліному ступеня  $n$ . Цей поліном має  $n + 1$  коефіцієнт. При цьому має  $n + 1$  умов:

$$\phi(x_0) = y_0, \quad \phi(x_1) = y_1, \quad \dots, \quad \phi(x_n) = y_n. \quad (\text{E.12})$$

Умови (E.12) накладаються на поліном:

$$\phi(x) = a_n x^n + a_{n-1} x^{n-1} + \dots + a_1 x + a_0. \quad (\text{E.13})$$

Таким чином, можна однозначно встановити коефіцієнти поліному (E.13). Вимагаючи для  $\phi(x)$  виконання умов (E.12), отримаємо систему  $n + 1$  рівнянь з  $n + 1$  невідомими:

$$\sum_{k=0}^n a_k x_i^k = y_i, \quad (i = 0, 1, \dots, n). \quad (\text{E.14})$$

Вирішуючи цю систему відносно невідомих  $a_0, a_1, \dots, a_n$ , отримаємо аналітичне вираження поліному (E.13). Система (E.14) має єдине рішення, так як її визначник запишеться у вигляді:

$$\Delta = \begin{vmatrix} x_0^n & x_0^{n-1} & x_0 & \dots & 1 \\ x_1^n & x_1^{n-1} & x_1 & \dots & 1 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & 1 \\ x_n^n & x_n^{n-1} & x_n & \dots & 1 \end{vmatrix}. \quad (\text{E.15})$$

Визначник Вандермонда (E.15) відрізняється від нуля. Відповідно, інтерполяційний поліном  $\phi(x)$  для функції  $f(x)$ , заданої таблицею, існує та є єдиним.

Для отримання аналітичних залежностей для розрахунку показників механічних властивостей при заданих умовах гарячої деформації використовували стандартні методи апроксимації даних [209-211]: метод найменших квадратів та метод перебору. В якості моделей керування рівняннями регресії в методі найменших квадратів використовували: лінійну модель, експоненціальну модель, квадратичну модель, степеневу модель та кубічну модель. Методом перебору по аргументу знаходили коефіцієнти рівнянь регресії, при яких мінімальне відхилення визначаємо як [210]:

$$\Delta = \sum_{i=1}^n (y_i^p - y_i)^2 / n, \quad (\text{E.16})$$

де  $n$  – кількість пар експериментальних даних;

$y_i$  та  $y_i^p$  – задані та розраховані значення відповідно.

При ітеративних обчисленнях розрахунки припиняють після досягнення заданої різниці між значеннями коефіцієнтів рівнянь регресії на сусідніх ітераціях.

## Додаток Є

**Методика обробки результатів експерименту з осадження свинцевих зразків, що запропонована авторами роботи [212]**

Визначимо параметри зразків по результатах експерименту:

Об'єм зразка:

$$V = \left(\frac{\pi D_0}{4}\right) H_0, \quad (\text{Є.1})$$

де  $D_0$  – початковий діаметр зразка, мм;  $H_0$  – початкова висота зразка, мм

Величина осаджування:

$$\Delta h = H_0 - H_k. \quad (\text{Є.2})$$

Середній переріз зразка:

$$F_{\bar{x}} = \frac{V}{H_k}. \quad (\text{Є.3})$$

Максимальний переріз зразка:

$$F_{max} = \frac{\pi d_{max}^2}{4}, \quad (\text{Є.4})$$

де  $d_{max}$  - максимальний діаметр зразка, мм

Максимальний радіус зразка:

$$r_{max} = \frac{d_{max}}{2}. \quad (\text{Є.5})$$

Радіус контактної поверхні:

$$r = \frac{D_k}{2}. \quad (\text{Є.6})$$

Радіус кривизни бочки зразка:

$$r_{\sigma} = \frac{h^2}{8 \cdot (r_{max} - r)}. \quad (\text{Є.7})$$

Відносний ступінь деформації:

$$\varepsilon = \frac{H_0 - H_k}{H_0}. \quad (\text{Є.8})$$

Ідеальний діаметр:

$$D_{ид} = D_0 \sqrt{\frac{1}{1 - \varepsilon}}. \quad (\text{Є.9})$$

Початковий переріз зразка:

$$F_0 = \frac{\pi D_0^2}{4}. \quad (\text{Є.10})$$

Ідеальний переріз зразка:

$$F_{\text{ід}} = \frac{\pi D_{\text{ід}}^2}{4}. \quad (\text{Є.11})$$

Середній тиск при початковому перерізі зразка:

$$q_1 = \frac{P_{\bar{x}}}{F_0}. \quad (\text{Є.12})$$

Середній тиск при ідеальному перерізі зразка:

$$q_2 = \frac{P_{\bar{x}}}{F_{\text{ід}}}. \quad (\text{Є.13})$$

Дійсний (логарифмічний) ступінь деформації:

$$e = \ln \frac{H_0}{H_k}. \quad (\text{Є.14})$$

Середній діаметр:

$$d_{\bar{x}} = 1,128 \sqrt{F_{\bar{x}}}. \quad (\text{Є.15})$$

Коефіцієнт тертя  $f$  на двох зразках визначимо наступним чином:

Середній діаметр бочки:

$$D_{6\bar{x}} = \frac{D_{61} + D_{62}}{2}. \quad (\text{Є.16})$$

Середній діаметр торцю:

$$D_{\text{т}\bar{x}} = \frac{D_{\text{т}1} + D_{\text{т}2}}{2}. \quad (\text{Є.17})$$

Відносний ступінь деформації:

$$\varepsilon = \frac{H_0 - H_k}{H_0}. \quad (\text{Є.18})$$

Коефіцієнт бочкоподібності:

$$\theta = \frac{D_{6\bar{x}} - D_{\text{т}\bar{x}}}{D_{6\bar{x}}}. \quad (\text{Є.19})$$

Визначимо коефіцієнт тертя:

$$f = \frac{6,25 \cdot (\theta - 2\theta^2)}{1 + E_H} \cdot \left( \frac{D_0}{H_0} \right)^{\frac{3}{2}}. \quad (\text{Є.20})$$

Істинний опір деформації визначаємо по наступних формулах [212, 213]:

Формула С.І. Губкіна, Е. Зибеля

$$\sigma = \frac{q}{1 + \left[\frac{1}{3}f(d/h)\right]}, \quad (\text{Є.21})$$

де  $q$  – середній тиск, Н;  $f$  – коефіцієнт тертя;  $d, h$  – поточні діаметр та висота зразка, мм

Формула А.Ф. Головіна

$$\sigma = \frac{q}{0,315fd/h + \sqrt{1 + (0,315fd/h)^2}}. \quad (\text{Є.22})$$

Формула Е.Л. Унксова

$$\sigma = \frac{P}{F_0 e^{\bar{\epsilon}} (1 + 0,17d_0/h_0 e^{1,5\bar{\epsilon}})}, \quad (\text{Є.23})$$

де  $P$  – поточна сила стиснення, Н;  $d_0, h_0$  – початковий діаметр та висота зразка, мм;  $\bar{\epsilon}$  – ступінь деформації, відн. од.

Формула К. Рейшетера

$$\sigma = \frac{P}{F_{max} \left(1 - \frac{r_{max}}{4\rho} + \frac{f}{3} \times \frac{d_1 - h}{h}\right)}, \quad (\text{Є.24})$$

де  $F_{max}$  – максимальний переріз в місці випучення, мм<sup>2</sup>;  $r_{max}$  – радіус максимального перерізу, мм;  $\rho$  – радіус кривизни бочки зразка, мм, визначається як:

$$\rho = \frac{h^2}{[8(r_{max} - r)]}, \quad (\text{Є.25})$$

де  $r$  – радіус контактної поверхні зразка з бойками, мм.

Формула Липмана [213]

$$\sigma = \frac{q}{\left(1 + \frac{d}{6h}\right)}. \quad (\text{Є.26})$$

## Додаток Ж

## Результати розрахунків до дослідження процесів прокатки методами фізичного моделювання

Таблиця Ж.1

## Результати розрахунків істинного опору деформації марок сталі-аналогів (сплаву) при різних температурно-деформаційних умовах прокатки

№ п/п	Параметр <sup>a</sup>		Істинний опір деформації для марок сталі (сплаву) $\sigma_i$ , МПа						
	Ступінь деформації, од	Температура деформації, °С	0X18МФТ	15X25Т	DD11	65Г	X80	X70	СтЗсп
1	0,1	1200	27,18	30,63	42,00	42,21	52,24	56,91	54,80
2	0,1	1160	30,74	34,73	47,02	46,76	59,89	63,15	59,72
3	0,1	1120	34,93	39,54	52,85	51,99	68,62	70,07	65,29
4	0,1	1080	39,88	45,24	59,65	58,03	78,54	77,75	71,61
5	0,1	1040	45,75	52,01	67,64	65,03	89,83	86,27	78,82
6	0,1	1000	52,77	60,14	77,08	73,21	102,64	95,73	87,07
7	0,2	1200	28,47	31,76	47,16	49,23	57,04	60,57	61,52
8	0,2	1160	32,21	36,00	52,79	54,54	65,39	67,21	67,05
9	0,2	1120	36,59	40,99	59,34	60,64	74,91	74,58	73,30
10	0,2	1080	41,77	46,90	66,97	67,68	85,75	82,75	80,40
11	0,2	1040	47,93	53,92	75,94	75,85	98,07	91,82	88,49
12	0,2	1000	55,28	62,35	86,54	85,39	112,06	101,88	97,76
13	0,3	1200	29,25	32,43	50,46	53,87	59,84	62,71	65,83
14	0,3	1160	33,09	36,77	56,49	59,68	68,61	69,59	71,75
15	0,3	1120	37,60	41,87	63,49	66,35	78,60	77,21	78,44
16	0,3	1080	42,92	47,90	71,67	74,05	89,97	85,68	86,03
17	0,3	1040	49,24	55,07	81,26	82,99	102,89	95,07	94,68
18	0,3	1000	56,80	63,67	92,60	93,43	117,57	105,48	104,60
19	0,4	1200	29,82	32,92	52,94	57,42	61,83	64,23	69,07
20	0,4	1160	33,74	37,32	59,27	63,61	70,89	71,27	75,28
21	0,4	1120	38,33	42,50	66,62	70,73	81,21	79,08	82,30
22	0,4	1080	43,76	48,62	75,19	78,94	92,96	87,75	90,26
23	0,4	1040	50,20	55,90	85,26	88,47	106,32	97,37	99,34
24	0,4	1000	57,91	64,63	97,16	99,59	121,48	108,04	109,75
25	0,54	1200	30,43	33,44	55,66	61,38	63,91	65,82	72,62
26	0,54	1160	34,42	37,91	62,32	68,00	73,27	73,03	79,15
27	0,54	1120	39,11	43,16	70,04	75,60	83,94	81,03	86,53
28	0,54	1080	44,65	49,38	79,06	84,38	96,08	89,92	94,90
29	0,54	1040	51,22	56,78	89,65	94,56	109,88	99,77	104,45
30	0,54	1000	59,08	65,65	102,15	106,45	125,56	110,71	115,39

<sup>a</sup> Швидкість деформації,  $u$ , по всіх розрахунках становить  $1 \text{ с}^{-1}$

**Результати розрахунків коефіцієнтів змінення істинного опору деформації  
марок сталі-аналогів (сплаву) при різних температурно-деформаційних умовах  
прокатки**

№ п/п	Параметр <sup>a</sup>		Коефіцієнти змінення істинного опору деформації для марок сталі (сплаву)						
	Ступінь деформації, од	Температура деформації, °С	0X18МФТ	15X25Т	DD11	65Г	X80	X70	Ст3сп
1	0,1	1200	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
2	0,1	1160	1,13	1,13	1,12	1,11	1,15	1,11	1,09
3	0,1	1120	1,29	1,29	1,26	1,23	1,31	1,23	1,19
4	0,1	1080	1,47	1,48	1,42	1,37	1,50	1,37	1,31
5	0,1	1040	1,68	1,70	1,61	1,54	1,72	1,52	1,44
6	0,1	1000	1,94	1,96	1,84	1,73	1,96	1,68	1,59
7	0,2	1200	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
8	0,2	1160	1,13	1,13	1,12	1,11	1,15	1,11	1,09
9	0,2	1120	1,29	1,29	1,26	1,23	1,31	1,23	1,19
10	0,2	1080	1,47	1,48	1,42	1,37	1,50	1,37	1,31
11	0,2	1040	1,68	1,70	1,61	1,54	1,72	1,52	1,44
12	0,2	1000	1,94	1,96	1,84	1,73	1,96	1,68	1,59
13	0,3	1200	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
14	0,3	1160	1,13	1,13	1,12	1,11	1,15	1,11	1,09
15	0,3	1120	1,29	1,29	1,26	1,23	1,31	1,23	1,19
16	0,3	1080	1,47	1,48	1,42	1,37	1,50	1,37	1,31
17	0,3	1040	1,68	1,70	1,61	1,54	1,72	1,52	1,44
18	0,3	1000	1,94	1,96	1,84	1,73	1,96	1,68	1,59
19	0,4	1200	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
20	0,4	1160	1,13	1,13	1,12	1,11	1,15	1,11	1,09
21	0,4	1120	1,29	1,29	1,26	1,23	1,31	1,23	1,19
22	0,4	1080	1,47	1,48	1,42	1,37	1,50	1,37	1,31
23	0,4	1040	1,68	1,70	1,61	1,54	1,72	1,52	1,44
24	0,4	1000	1,94	1,96	1,84	1,73	1,96	1,68	1,59
25	0,54	1200	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
26	0,54	1160	1,13	1,13	1,12	1,11	1,15	1,11	1,09
27	0,54	1120	1,29	1,29	1,26	1,23	1,31	1,23	1,19
28	0,54	1080	1,47	1,48	1,42	1,37	1,50	1,37	1,31
29	0,54	1040	1,68	1,70	1,61	1,54	1,72	1,52	1,44
30	0,54	1000	1,94	1,96	1,84	1,73	1,96	1,68	1,59

<sup>a</sup> Швидкість деформації,  $u$ , по всіх розрахунках становить  $1 \text{ с}^{-1}$



## Додаток З

**Лістинг розроблених в середовищі VB6.0 програмних засобів для визначення  
опору деформації в залежності від ступеня, швидкості та температури  
деформації**

```
FileOUT$ = "steel2.txt"
```

```
Open App.Path & "\" & FileOUT$ For Output As 10
```

```
'The coefficients of the Andreiuk-Tyulenev method
```

```
C_K1 = -65.7: C_K2 = 141: C_L1 = 9.17: C_L2 = -5.24: C_m1 = 23: C_m2 = -18.6: C_n1 = -63: C_n2 = 43.1
Mn_K1 = 134: Mn_K2 = -36.2: Mn_L1 = -0.314: Mn_L2 = 0.107: Mn_m1 = 2.37: Mn_m2 = -0.591: Mn_n1 = -25.6: Mn_n2 = 8.07
Si_K1 = 31.9: Si_K2 = -37.8: Si_L1 = -4.98: Si_L2 = 3.57: Si_m1 = 5.3: Si_m2 = -3.39: Si_n1 = 59.3: Si_n2 = -45.5
Cr_K1 = 155: Cr_K2 = -31.3: Cr_L1 = -0.29: Cr_L2 = 0.0612: Cr_m1 = 1.32: Cr_m2 = -0.385: Cr_n1 = -15.9: Cr_n2 = 2.66
Ni_K1 = 70.6: Ni_K2 = -5.04: Ni_L1 = -0.315: Ni_L2 = 0.0319: Ni_m1 = 0.45: Ni_m2 = -0.037: Ni_n1 = 7.28: Ni_n2 = -0.633
W_K1 = -155: W_K2 = 40.1: W_L1 = 0.559: W_L2 = -0.148: W_m1 = 1.9: W_m2 = -0.549: W_n1 = -29.3: W_n2 = 11
Mo_K1 = -371: Mo_K2 = 175: Mo_L1 = 3.07: Mo_L2 = -1.07: Mo_m1 = -2.64: Mo_m2 = 0.428: Mo_n1 = 16.5: Mo_n2 = 5.56
V_K1 = 2204: V_K2 = -1521: V_L1 = -20.8: V_L2 = 19.3: V_m1 = -28.9: V_m2 = 24: V_n1 = 286: V_n2 = -495
Ti_K1 = 757: Ti_K2 = -625: Ti_L1 = -8.44: Ti_L2 = 5.56: Ti_m1 = -0.0365: Ti_m2 = -6.19: Ti_n1 = -44.7: Ti_n2 = 28.3
Al_K1 = 1303: Al_K2 = -908: Al_L1 = 15.2: Al_L2 = -9.55: Al_m1 = 60.6: Al_m2 = -36.5: Al_n1 = -804: Al_n2 = 503
Co_K1 = 1874: Co_K2 = -412: Co_L1 = 23.1: Co_L2 = -5.63: Co_m1 = 63.9: Co_m2 = -15.2: Co_n1 = -1155: Co_n2 = 270
Nb_K1 = -291: Nb_K2 = 219: Nb_L1 = -7.09: Nb_L2 = 5.3: Nb_m1 = 56.3: Nb_m2 = -63.9: Nb_n1 = -1529: Nb_n2 = 1610
Cu_K1 = -84: Cu_K2 = 127: Cu_L1 = 4.96: Cu_L2 = -2.62: Cu_m1 = -7.59: Cu_m2 = 6.43: Cu_n1 = -242: Cu_n2 = 124
```

```
'Entering the initial data on the percentage of elements
```

```
C_cont = Val(Text9.Text) '1
Mn_cont = Val(Text11.Text) '2
Si_cont = Val(Text19.Text) '3
Cr_cont = Val(Text16.Text) '4
Ni_cont = Val(Text14.Text) '5
W_cont = Val(Text20.Text) '6
Mo_cont = Val(Text12.Text) '7
V_cont = Val(Text13.Text) '8
Ti_cont = Val(Text15.Text) '9
Al_cont = Val(Text18.Text) '10
Co_cont = Val(Text21.Text) '11
Nb_cont = Val(Text10.Text) '12
Cu_cont = Val(Text17.Text) '13
```

```
'deformation resistance
```

```
SG0d = C_K1 * C_cont + C_K2 * C_cont ^ 1.5 + Mn_K1 * Mn_cont + Mn_K2 * Mn_cont ^ 1.5 + Si_K1 * Si_cont + Si_K2 * Si_cont ^ 1.5
SG0d = SG0d + Cr_K1 * Cr_cont + Cr_K2 * Cr_cont ^ 1.5 + Ni_K1 * Ni_cont + Ni_K2 * Ni_cont ^ 1.5 + W_K1 * W_cont + W_K2 * W_cont ^ 1.5
SG0d = SG0d + Mo_K1 * Mo_cont + Mo_K2 * Mo_cont ^ 1.5 + V_K1 * V_cont + V_K2 * V_cont ^ 1.5 + Ti_K1 * Ti_cont + Ti_K2 * Ti_cont ^ 1.5
SG0d = SG0d + Al_K1 * Al_cont + Al_K2 * Al_cont ^ 1.5 + Co_K1 * Co_cont + Co_K2 * Co_cont ^ 1.5 + Nb_K1 * Nb_cont + Nb_K2 * Nb_cont ^ 1.5
SG0d = SG0d + Cu_K1 * Cu_cont + Cu_K2 * Cu_cont ^ 1.5
SG0d = 66.8 + 0.1 * SG0d
```

```
a0 = C_L1 * C_cont + C_L2 * C_cont ^ 1.5 + Mn_L1 * Mn_cont + Mn_L2 * Mn_cont ^ 1.5 + Si_L1 * Si_cont + Si_L2 * Si_cont ^ 1.5
```

```
a0 = a0 + Cr_L1 * Cr_cont + Cr_L2 * Cr_cont ^ 1.5 + Ni_L1 * Ni_cont + Ni_L2 * Ni_cont ^ 1.5 + W_L1 * W_cont + W_L2 * W_cont ^ 1.5
```

## Продовж. дод. 3

$$a0 = a0 + Mo\_L1 * Mo\_cont + Mo\_L2 * Mo\_cont ^ 1.5 + V\_L1 * V\_cont + V\_L2 * V\_cont ^ 1.5 + Ti\_L1 * Ti\_cont + Ti\_L2 * Ti\_cont ^ 1.5$$

$$a0 = a0 + Al\_L1 * Al\_cont + Al\_L2 * Al\_cont ^ 1.5 + Co\_L1 * Co\_cont + Co\_L2 * Co\_cont ^ 1.5 + Nb\_L1 * Nb\_cont + Nb\_L2 * Nb\_cont ^ 1.5$$

$$a0 = a0 + Cu\_L1 * Cu\_cont + Cu\_L2 * Cu\_cont ^ 1.5$$

$$a0 = 0.126 + 0.01 * a0$$

$$b = C\_m1 * C\_cont + C\_m2 * C\_cont ^ 1.5 + Mn\_m1 * Mn\_cont + Mn\_m2 * Mn\_cont ^ 1.5 + Si\_m1 * Si\_cont + Si\_m2 * Si\_cont ^ 1.5$$

$$b = b + Cr\_m1 * Cr\_cont + Cr\_m2 * Cr\_cont ^ 1.5 + Ni\_m1 * Ni\_cont + Ni\_m2 * Ni\_cont ^ 1.5 + W\_m1 * W\_cont + W\_m2 * W\_cont ^ 1.5$$

$$b = b + Mo\_m1 * Mo\_cont + Mo\_m2 * Mo\_cont ^ 1.5 + V\_m1 * V\_cont + V\_m2 * V\_cont ^ 1.5 + Ti\_m1 * Ti\_cont + Ti\_m2 * Ti\_cont ^ 1.5$$

$$b = b + Al\_m1 * Al\_cont + Al\_m2 * Al\_cont ^ 1.5 + Co\_m1 * Co\_cont + Co\_m2 * Co\_cont ^ 1.5 + Nb\_m1 * Nb\_cont + Nb\_m2 * Nb\_cont ^ 1.5$$

$$b = b + Cu\_m1 * Cu\_cont + Cu\_m2 * Cu\_cont ^ 1.5$$

$$b = 0.125 + 0.01 * b$$

$$c = C\_n1 * C\_cont + C\_n2 * C\_cont ^ 1.5 + Mn\_n1 * Mn\_cont + Mn\_n2 * Mn\_cont ^ 1.5 + Si\_n1 * Si\_cont + Si\_n2 * Si\_cont ^ 1.5$$

$$c = c + Cr\_n1 * Cr\_cont + Cr\_n2 * Cr\_cont ^ 1.5 + Ni\_n1 * Ni\_cont + Ni\_n2 * Ni\_cont ^ 1.5 + W\_n1 * W\_cont + W\_n2 * W\_cont ^ 1.5$$

$$c = c + Mo\_n1 * Mo\_cont + Mo\_n2 * Mo\_cont ^ 1.5 + V\_n1 * V\_cont + V\_n2 * V\_cont ^ 1.5 + Ti\_n1 * Ti\_cont + Ti\_n2 * Ti\_cont ^ 1.5$$

$$c = c + Al\_n1 * Al\_cont + Al\_n2 * Al\_cont ^ 1.5 + Co\_n1 * Co\_cont + Co\_n2 * Co\_cont ^ 1.5 + Nb\_n1 * Nb\_cont + Nb\_n2 * Nb\_cont ^ 1.5$$

$$c = c + Cu\_n1 * Cu\_cont + Cu\_n2 * Cu\_cont ^ 1.5$$

$$c = -2.82 + 0.01 * c$$

' Calculation

For tt = 800 To 1200 Step 20

    For uu = 0.01 To 41 Step 2

        For ee = 0.001 To 0.8 Step 0.02

            u = uu: t = tt: e = ee

            Gs = SG0d \* u ^ a0 \* (10 \* e) ^ b \* (t / 1000) ^ c

            Gs = Gs \* (1 + e)

            Gs = Int(Gs \* 10) / 10

            e = Log(1 + e)

            xx = 0.0001 \* t ^ 3 - 0.219 \* t ^ 2 - 2.9165 \* t + 206718

            e = e - Gs / xx

            If e < 0 Then e = 0

            Print #10, Gs, Int(ee \* 100) / 100, Int(uu), tt

        Next



    Next



Next



Close 10

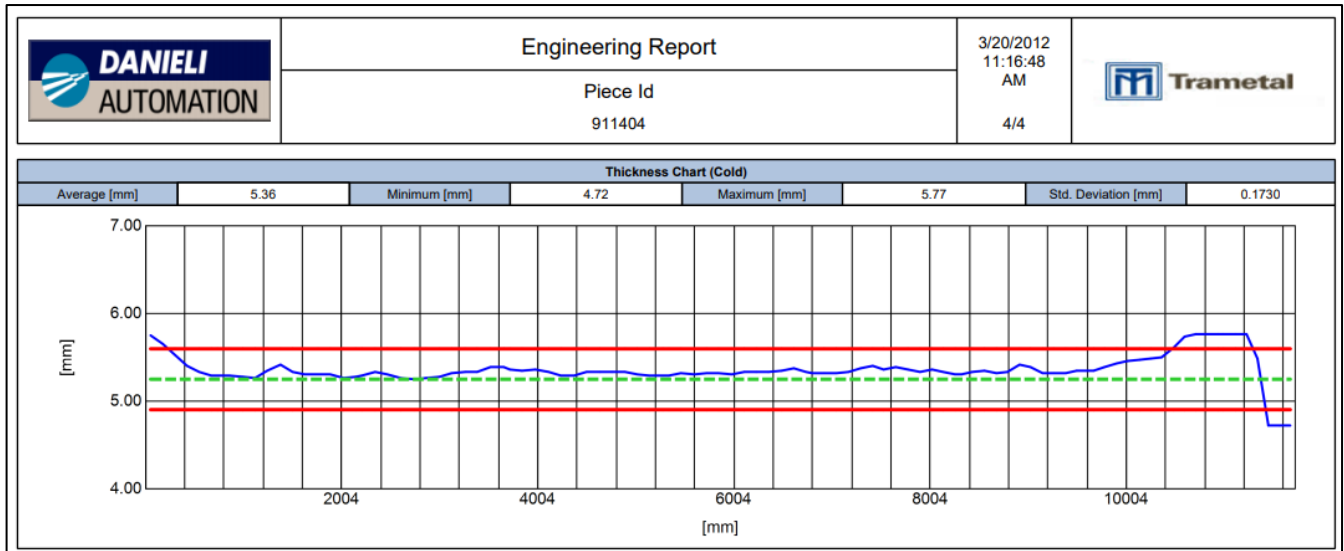
## Додаток І

## Технічний звіт по фактичних параметрах прокатки листів розмірами 5x3125x12000 мм зі сталі А320 на заводі Trametal

	Engineering Report		3/20/2012 11:16:48 AM		
	Piece Id 911404		1/4		
<b>General Informations</b>					
Status	PRODUCED	Rolling Direction Req.	FREE	Archive Date	20/03/2012 11:16:44
Slab Id	1TL5800906	Start Rolling Temp. [C]	1196	Time To Start [sec]	45
Steel Grade	A320	End Rolling Temp. [C]		Wait Time [sec]	0
Product Type	5[mm]	Final Plate Thick. [mm]	5.37	Rolling Time [sec]	174
Charged Rotated	YES	Weight PDI [kg]	1800		
		PDI Wait. Thick. [mm]	0		
<b>Input Plate Data</b>					
Entry Thickness [mm]	217	Entry Width [mm]	780	Entry Length [mm]	1355
CC Fiber Dir	TRANSVERSE	Entry Width Meas. [mm]	801.36	Entry Length Meas. [mm]	-1
<b>Output Plate Data</b>					
Target Thickness [mm]	5.25	Target Width [mm]	3115	Target Length L3 [mm]	12000 [+75 / -0]
Target Thick. L3 [mm]	5.35 [+0.35 / -0.35]	Target Width L3 [mm]	3125 [+95 / -125]	Avg Meas Length	13860.83 [1860.83]
Avg Meas Thick	5.36 [0.01]	Avg Meas Width	3097.69 [-27.31]		
<b>Furnace Data</b>					
Charging Time	20/03/2012 04:18:26	PDI Temperature	1250	Furnace / Line	RHF1 / 1
Discharging Time	20/03/2012 11:13:07	Discharge Temperature [C]	-1	Reheating Time	7: 55
<b>Process Data</b>					
Waiting Thick 1 [mm]	-1	Waiting Thick. 2 [mm]	-1	Target EOR Temp. [C]	-1
Restart Temp. 1 [C]	-1	Restart Temp. 2 [C]	-1		
<b>Rolls Data</b>					
Top Work Roll Id	W133379	Bot Work Roll Id	W133378	Top Backup Roll Id	103587
Diameter [mm]	734.2	Diameter [mm]	734.2	Diameter [mm]	1414.2
Bot Backup Roll Id		Top Work Roll Id		Bot Backup Roll Id	103586
Bot Backup Roll Id		Diameter [mm]		Diameter [mm]	1413.8
Rolled Weight [tons]	1877	Rolled Weight [tons]	1877	Rolled Weight [tons]	71936
Mech Crown [um]	50	Mech Crown [um]	50	Mech Crown [um]	50
Wear Crown [um]	-18.5	Wear Crown [um]	-18.5	Mech Crown [um]	50

	Engineering Report		3/20/2012 11:16:48 AM										
	Piece Id 911404		2/4										
<b>Setup</b>													
Pass #	Pass Type	Exit Thick. [mm]	Draft [mm]	Reduction [%]	Exit Width [mm]	Exit Length [mm]	Force [kN]	Bending [kN]	Torque [kN*m]	Temperature [C]	Speed [m/s]	Wait Time [s]	Descale
1	SIZING	182	35.93	16.49	1387	959	12093	2454	1432	1196	1.92	41	YES
2	SIZING	146.06	35.88	19.72	1390	1195	11969	2440	1401	1209	2.04	6	NO
3	BROADSIZING	123.5	21.71	14.95	1195	1635	8499	2097	782	1197	2.13	22	YES
4	BROADSIZING	98.71	24.83	20.1	1195	2059	9911	2220	1005	1186	2.21	6	NO
5	BROADSIZING	77.6	21.15	21.42	1198	2619	10108	2239	940	1173	2.28	6	YES
6	BROADSIZING	64.14	13.45	17.33	1201	3168	8185	2072	604	1166	2.36	6	NO
7	ROUGHING	49.96	13.85	21.7	3163	1533	24579	3182	1825	1153	2.11	22	YES
8	ROUGHING	37.51	12.41	24.85	3146	2048	26187	3189	1901	1120	2.21	6	NO
9	ROUGHING	26.39	11.1	29.62	3150	2911	27889	2985	1862	1115	2.32	7	YES
10	ROUGHING	17.56	8.9	33.63	3154	4373	31137	3048	1780	1093	2.52	7	NO
11	FINISHING	11.78	5.88	33.28	3157	6516	32804	2973	1435	1060	2.73	6	NO
12	FINISHING	8.38	3.7	30.61	3158	9166	33651	2891	1126	1022	2.92	5	NO
13	FINISHING	6.41	1.98	23.6	3157	11978	30257	2355	719	969	3.19	5	NO
14	FINISHING	5.31	1.15	17.76	3156	14456	28573	2114	508	907	3.4	4	NO
15	DUMMY	5.3	0	0	3154	14456	0	0	0	855	3	4	NO

		<p align="center"><b>Engineering Report</b></p> <p align="center">Piece Id 911404</p>										<p>3/20/2012 11:16:48 AM</p>					
<p align="center"><b>Measures</b></p>																	
Pass #	Target Thick [mm]	Actual Tick. [mm]	Meas. Thick. [mm]	Actual Width [mm]	Actual Length [mm]	Force Tot. [kN]	Force Diff. [kN]	Gap AVG [mm]	Torque TOP [kN*m]	Torque BOT [kN*m]	Entry Temp	Exit Temp	Current [A] Bottom	Current [A] Top	Speed [m/s]	Wait Time [s]	Descale
1	182	182.16	-1	1360	1134	11852	401	177.66	787	778	-1	-1	151	334	1.82	45	NO
2	146.06	146.41	-1	-1	1323	12404	345	141.74	767	779	-1	-1	328	158	1.83	7	NO
3	123.50	123.64	-1	1389	1756	8443	-73	119.79	401	436	-1	-1	332	268	1.88	22	YES
4	98.71	98.83	-1	-1	2202	9831	-226	94.59	448	535	-1	-1	372	289	1.88	7	NO
5	77.60	77.47	-1	-1	2677	9169	-208	73.38	396	432	-1	-1	405	325	1.88	7	NO
6	64.14	64	-1	-1	3201	7199	116	60.46	262	265	-1	-1	284	253	1.88	6	NO
7	49.96	50.20	-1	3147	1763	24621	480	43.08	847	853	-1	-1	436	521	1.82	36	NO
8	37.51	37.58	-1	-1	2234	26020	623	30.08	860	836	-1	-1	602	426	1.83	6	NO
9	26.39	26.56	-1	3131	3086	28210	752	18.59	887	840	-1	-1	674	762	2	6	NO
10	17.56	17.85	-1	-1	4477	32945	488	8.96	825	886	-1	-1	852	844	2.26	5	NO
11	11.78	12.09	-1	3127	6534	33710	654	3.08	727	647	-1	-1	783	863	2.51	5	NO
12	8.38	8.42	-1	-1	8956	33751	628	-0.60	526	505	358	761	772	801	2.72	5	NO
13	6.41	6.36	5.46	3129	11632	29124	715	-1.67	339	323	651	942	593	621	3.02	4	NO
14	5.31	5.22	-1	-1	14002	28006	387	-2.58	249	230	875	871	512	514	3.26	5	NO
15	-1	5.22	5.42	-1	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	8	NO



Додаток Й

**Технічний звіт по фактичних параметрах прокатки рулонів розмірами 6x1500 мм зі сталі B638 на стані Стеккеля, заводу Ferriera Valsider**

scheda	spessore coil (mm)	larghezza coil (mm)	durata forno Bendotti	spess transfer bar stimato mm	SK DUO	tab forno tunnel	temp entrata forno tunnel corpo(C°)	durata forno tunnel +/- 2 min)	T.LAM	T.AVV	T.AVV	GAP P1	GAP P2	GAP P3	GAP P4	GAP P5	GAP P6	GAP P7	SPEED P1	SPEED P2	SPEED P3	SPEED P4	SPEED P5	SPEED P6	SPEED P7	FORZA P1	FORZA P2	FORZA P3	FORZA P4	FORZA P5	FORZA P6	FORZA P7
CL16/11369A	6	1500	4.71	35.60	332	980	908	00:09:09	876	622	627	2580	1900	1420	1100	870	750	620	170	450	450	450	450	450	400	2171	1926	1762	1657	1290	1164	1240
CL16/20707A	6	1500	4.88	34.20	252	1030	916	00:08:44	920	626	593	2300	1500	1060	820	610			170	300	350	350	280			2189	2178	1836	1445	1544		

**METINVEST**  
Ferriera Valsider SpA

**Dati identificativi coils:**  
 N.i.m.: 16/11369A    Dimensioni: 6x1500    Acciaio int.: B638    Tipo lam.  
 Pos. Provino 10mt punta Fv    N°provino A07890    Rm 533    Reh 467    A% 17    Res 105



Micro 100x



Micro 500x



Micro 100x



Micro 500x



Micro 100x



Micro 500x

**ANALISI CHIMICA**

C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	Al	V	Cu	Nb	Ti	Ceq
0.08	0.230	1.23	0.012	0.003	0.040	0.220	0.005	0.032	0.036	0.04	0.022	0.026	0.319

**Parametri di laminazione**

temp. lam °C	876	Lam. DUO		Tunnel °C	996	Pass 4H	7
Temp. avv. Sup. °C	622	T.B. mm	35.6	Tempo (min)	9.09	Scheda	2580-1900-1420-1100-870-750-620
Temp. avv. inf. °C	627	Note		T° entrata °C	908	Forze	2171-1926-1762-1657-1290-1164-1240




DOCCIATURA

**METINVEST**  
Forniera Valsider SpA




**Dati identificativi coils:**

N.l.m.: 16/20707A      Dimensioni: 6x1500      Acciaio int.: B638      Tipo lam.

Pos. Provino      CORPO      N° provino      A08483      Rm 575      Reh 523      A% 18      Res 98

Micro 100x

Micro 500x

**ANALISI CHIMICA**

C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	Al	V	Cu	Nb	Ti	Ceq
0.08	0.220	1.24	0.009	0.003	0.040	0.210	0.005	0.038	0.033	0.03	0.021	0.025	0.318

**Parametri di laminazione**

Temp. lam. °C	920	Lam. DUO	Tunnel °C	916	Pass 4Hi	5	
Temp. avv. Sup. °C	626	T.B. mm	34.2	Tempo (min)	8.44	Scheda	2300-1500-1060-820-810
Temp. avv. inf. °C	593	Note		T° entrata °C	1017	Forze	2189-2178-1838-1445-1544

DOCCIATURA

**OSSERVAZIONI**

Il campione analizzato presenta una struttura ferrite-perlite tipica di un acciaio a basso tenore di carbonio. La struttura nel complesso, ha grano molto fine che rimane omogeneo su tutto lo spessore. Nello specifico, la parte superiore del campione è costituita da una struttura ferrite perlite di tipo molto fine, che all'avvicinarsi della mezzena mette in mostra ciò che rimane della segregazione che vi era a metà spessore. Man mano che si passa la zona di mezzena, il grano riprende l'andamento di una struttura ferrite perlite omogenea e di tipo molto fine.

Додаток К

Технічний звіт по фактичних параметрах прокатки рулонів зі сталі марки S355 в клітях стану Стеккеля

cartellino

mg	scheda	colata	articolo	confirma	pos	articolo originale	featt- fienza	consegna	sta- to	sc.	C M	LOG	postiz
			*S355*15*1500										
0	2010/81512	A1/01005403	CLS355L15001500	90101241	3	LLS355L00421520		30/08/2010	130			24290	
0	2010/81513	A1/01005403	CLS355L15001500	90101241	3	LLS355L00421520		30/08/2010	130			24291	
0	2010/81514	A1/02005400	CLS355L15001500	90101241	3	LLS355L00421520		30/08/2010	130			24292	
0	2010/81515	A1/02005388	CLS355L15001500	90101241	3	LLS355L00421520		30/08/2010	130			24293	
0	2010/81516	A1/01005403	CLS355L15001500	90101241	3	LLS355L00421520		30/08/2010	130			24294	
0	2010/81517	A1/02005391	CLS355L15001500	90101241	3	LLS355L00421520		30/08/2010	130			24295	
0	2010/81518	A1/02005400	CLS355L15001500	90101241	3	LLS355L00421520		30/08/2010	130			24296	

**Dati**  I -371-PG-1

registrazione

Ora laminazione: 03/09/2010 5.15.39

perc. sfiamm. LOG

n° car.norm.  0

temp. box  0

Pregi

scheda: 2010/81518

bramma		
spess. calc.	larg. media	lung. taglio informato
219	1525	9800
spess. lamin.	largh. lamin.	lung. taglio bramma
35	1500	9800
spess. SX	spess. DX	spess. med.
0.0	0.0	0.0

dim. bramma: 220x1520x9800	n° bramma: 4
S355JR+AR: KV+20 - Lamiera laminata a	172445
nave: VICTORIA 3	B305

gruppi	marca	n° LCM
A cl. 3	S355	5

C	eq	C	Sr	Ma	P	S	Cr	Ni	Co	Al	Ti	Nb	Mo	V	N	As
.3997		.14	.023	1.4	.014	.003	.05	.18	.02	.035	.005	.034	.01	.005	.007	.005

operatore pulpito LORENZETTI ANDREA      operatore spianatrice SVEC JANO      operatore rifilo

dim. confe. 15 x 1500 x 135881

01/01/2002

03/11/2010

364 schede dim. rifilo 0 x 0 x 0 ton

teor. 0.00      eff. 25.34 L

mg	data	aus	numero regis.	causale	descriz movimento	ca- rico	sca- rico	valore unitario	tonn.

Ordinato per  Consegna  Scheda  Finale scheda

articolo =  0     0    t

variazione  0     0.00

```

-----
                        VALSIDER S.p.a.
-----
Impianto DUO                REPORT LAMINAZIONE                Report By Gr1 2005
-----
                        N.I.M. : 24296
=====
Inizio rapporto      : venerdm 03 set 2010 05.15.12

Laminazione ON      : 05.15.12

Posiz. Refola       : 05.15.13      - Width: 1750 mm

Dis primaria        : 05.15.20      - Pressione : 243 Bar

Sfornamento OK [P2] : 05.15.22      - Temp: 1068°C

Posiz. Refola       : 05.15.38      - Width: 1545 mm

Mis.Larghezza [P11] : 05.15.50      - Width: 1494 mm   Temp: 1090°C

Temp.Iniziale [P11] : 05.15.59      - Temp: 1090°C
Passaggio [P1]      : 05.16.04      - N: 01  194,9 x 1494 x 10430 mm   Load: 137 %   Temp: 0783°C   Ton: 0502 0505 t

Posiz. Refola       : 05.16.13      - Width: 1540 mm

Posiz. Refola       : 05.16.30      - Width: 1535 mm
Passaggio [P1]      : 05.16.31      - N: 02  173,8 x 1494 x 11660 mm   Load: 145 %   Temp: 1068°C   Ton: 0465 0439 t

Dis secondaria      : 05.16.35      - Pressione : 155 Bar   [SUP INF]
Passaggio [P1]      : 05.16.45      - N: 03  152,8 x 1494 x 12920 mm   Load: 138 %   Temp: 1044°C   Ton: 0000 0000 t

Posiz. Refola       : 05.16.54      - Width: 1530 mm

Posiz. Refola       : 05.17.11      - Width: 1525 mm
Passaggio [P1]      : 05.17.12      - N: 04  133,9 x 1494 x 14720 mm   Load: 147 %   Temp: 1073°C   Ton: 0533 0484 t

Dis secondaria      : 05.17.19      - Pressione : 155 Bar   [SUP INF]
Passaggio [P1]      : 05.17.28      - N: 05  114,9 x 1494 x 16740 mm   Load: 138 %   Temp: 1023°C   Ton: 0521 0494 t

Posiz. Refola       : 05.17.37      - Width: 1520 mm

Posiz. Refola       : 05.17.57      - Width: 1515 mm
Passaggio [P1]      : 05.17.58      - N: 06  097,9 x 1494 x 19870 mm   Load: 146 %   Temp: 1055°C   Ton: 0561 0516 t

Dis secondaria      : 05.18.07      - Pressione : 156 Bar   [SUP INF]
Passaggio [P1]      : 05.18.18      - N: 07  081,0 x 1494 x 23480 mm   Load: 121 %   Temp: 1009°C   Ton: 0566 0555 t
Passaggio [P1]      : 05.18.51      - N: 08  064,9 x 1494 x 28660 mm   Load: 149 %   Temp: 1027°C   Ton: 0658 0585 t
Passaggio [P1]      : 05.19.12      - N: 09  050,9 x 1494 x 35440 mm   Load: 145 %   Temp: 1027°C   Ton: 0625 0629 t

Posiz. Refola       : 05.19.13      - Width: 1750 mm
Passaggio [P1]      : 05.19.36      - N: 10  039,9 x 1494 x 44000 mm   Load: 120 %   Temp: 1041°C   Ton: 0634 0612 t
Passaggio [P1]      : 05.20.08      - N: 11  029,4 x 1494 x 56280 mm   Load: 128 %   Temp: 1008°C   Ton: 0691 0706 t
Passaggio [P1]      : 05.20.53      - N: 12  046,4 x 1494 x 56280 mm   Load: 000 %   Temp: 1009°C   Ton: 0000 0000 t

Reset ciclo        : 05.27.04      -

```



Продовж. дод. К

-----  
VALSIDER S.p.a.  
-----

Impianto Steckel

REPORT LAMINAZIONE COIL

Report By Gr1 2009  
=====

venerdm 03 set 2010 05.21.27

Entrata Forno	: 05.21.27		Testa °C 955	Corpo °C 920	Coda °C 897				
Start Ciclo	: 05.27.35	N° 3	Spes. mm 15,00	Lar.mm 1500	Pas. 2400 1880 1530 0 0 0 0				
Taglio Cesoià	: 05.28.05		Temp. °C 1038						
Discagliatura +	: 05.28.12		Bar 228						
Passaggio	: 05.28.28	P. 1	Gap mm 19,26	ton 1957	Trq% 55 56	°C 999			
Taglio Cesoià	: 05.29.05		Temp. °C 0						
Uscita Forno	: 05.29.06		Testa °C 1110	Corpo °C 997	Coda °C 1043				
Discagliatura -	: 05.29.12		Bar 204						
Pirometro 1BB	: 05.29.16		Testa °C 954	Corpo °C 930	Coda °C 929				
Passaggio	: 05.29.24	P. 2	Gap mm 15,03	ton 1351	Trq% 35 35	°C 958			
Pirometro 1BB	: 05.30.22		Testa °C 909	Corpo °C 898	Coda °C 897				
Passaggio	: 05.30.28	P. 3	Gap mm 11,47	ton 1195	Trq% 22 23	°C 920			
Imbocco Aspo 3	: 05.31.08		Trq % 64	Sup°C 656	Inf°C 651				
Temp. Avvolgim.	: 05.31.25		Trq % 81	Sup°C 661	Inf°C 668				
Temp. Avvolgim.	: 05.31.35		Trq % 89	Sup°C 641	Inf°C 651				
Pirometro 1BB	: 05.31.41		Testa °C 899	Corpo °C 904	Coda °C 911				
Stop Ciclo	: 05.31.47	N° 0							
Temp. Avvolgim.	: 05.31.52		Trq % 68	Sup°C 659	Inf°C 658				
Temp. Avvolgim.	: 05.32.02		Trq % 67	Sup°C 680	Inf°C 672				

=====

N.I.M. : 81518

=====

Salvataggio Log : venerdm 03 set 2010 05.32.14

cartellino

mg	scheda	colata	articolo	conferma	pos	articolo originale	resistenza	consegna	stato	sc.	C M	LOG	posiz.
			*S355*12*1500										
1	CL10/82036	A1/01005375	CLS355L12001500	90101250	4			10/09/2010	99	1	C	0	
1	CL10/82037	A1/02005377	CLS355L12001500	90101270	17			10/09/2010	99	1	C	0	
1	CL10/82754	A1/02006937	CMS355L12001500	90101533	12			30/10/2010	99	1B	C	0	
1	CL10/82755	A1/02006937	CMS355L12001500	90101533	12			30/10/2010	99	1B	C	0	
1	CL10/82756	A1/02006937	CMS355L12001500	90101533	12			30/10/2010	99	1B	C	0	
1	CL10/82757	A1/01008505	CMS355L12001500	90101533	12			30/10/2010	99	1B	C	0	
1	CL10/83270	A1/01008812	CMS355L12001500	90101183	6			10/09/2010	99	1B	C	0	

**Dati**  I -357-PD-2

registrazione 1149394

Ora laminazione: 05/10/2010 17.52.19

perc. sfiamm. LOG 27316

n\* car.norm.  temp. box

**bramma**

spess. calc.	larg. media	lung. taglio infornato
220	1522	9800
spess. lamin.	largh. lamin.	lung. taglio bramma
0	0	9800
spess. SX	spess. DX	spess. med.

C	Si	Mn	P	S	Ca	Ni	Cu	Al	Ti	Nb	Mo	V	N	As
377	.14	.015	1.34	.017	.004	.04	.02	.033	.005	.034	.01	.005	.005	.005

operatore pulpito  operatore spianatrice  operatore rifilo

dim. confe. 11.99 x 1500 x 169993

308 schede dim. rifilo 11.99 x 1500 x 0 ton

teor 0.00

eff. 25.10 C

mg	data	aus	numero regis.	causale	descriz movimento	carico	scarico	valore unitario	tonn.
1	06/10/2010	40	1149394	Carico da Produzione	Produzione coils	1			25.10
1	12/10/2010	70	1151654	Vendite	DDT n.1013834		1		- 24.52
1	12/10/2010	60	1151654	Rettifica Lotto di Magazzino	rettifica lotto	0			- 0.58

SIDERURGICA GABRIELLI SPA conf. 90101183/6

Ordinato per  Consegna  Scheda  Finale scheda  articolo =

variazione  pz  t

```

-----
                        VALSIDER S.p.a.
-----
Impianto DUO                REPORT LAMINAZIONE                Report By Grl 2005
-----

                        N.I.M. : 27316

=====
Inizio rapporto      : martedì 05 ott 2010 17.50.44

Laminazione ON      : 17.50.44

Posiz. Refola       : 17.50.44          - Width: 1750 mm

Dis primaria        : 17.50.49          - Pressione : 252 Bar

Sfornamento OK [P2] : 17.50.54          - Temp: 1094°C

Posiz. Refola       : 17.51.09          - Width: 1545 mm

Dis primaria        : 17.51.27          - Pressione : 245 Bar

Mis.Larghezza [P11] : 17.51.54          - Width: 1556 mm   Temp: 1111°C

Dis secondaria      : 17.52.05          - Pressione : 164 Bar   [SUP INF]

Temp.Iniziale [P11] : 17.52.06          - Temp: 1111°C
Passaggio [P1]      : 17.52.11          - N: 01  194,9 x 1556 x 10560 mm   Load: 139 %   Temp: 1031°C   Ton: 0478 0420 t

Posiz. Refola       : 17.52.19          - Width: 1540 mm

Posiz. Refola       : 17.52.39          - Width: 1535 mm
Passaggio [P1]      : 17.52.39          - N: 02  173,4 x 1556 x 11780 mm   Load: 143 %   Temp: 1076°C   Ton: 0491 0441 t

Dis secondaria      : 17.52.45          - Pressione : 165 Bar   [SUP INF]
Passaggio [P1]      : 17.52.52          - N: 03  152,9 x 1556 x 13090 mm   Load: 127 %   Temp: 1033°C   Ton: 0000 0000 t

Posiz. Refola       : 17.53.01          - Width: 1530 mm

Posiz. Refola       : 17.53.18          - Width: 1525 mm
Passaggio [P1]      : 17.53.18          - N: 04  133,8 x 1556 x 15020 mm   Load: 135 %   Temp: 1063°C   Ton: 0502 0468 t

Dis secondaria      : 17.53.25          - Pressione : 166 Bar   [SUP INF]
Passaggio [P1]      : 17.53.34          - N: 05  114,9 x 1556 x 17050 mm   Load: 121 %   Temp: 1024°C   Ton: 0510 0469 t

Posiz. Refola       : 17.53.42          - Width: 1520 mm

Posiz. Refola       : 17.54.00          - Width: 1515 mm
Passaggio [P1]      : 17.54.01          - N: 06  097,8 x 1556 x 20330 mm   Load: 130 %   Temp: 1051°C   Ton: 0533 0488 t

Dis secondaria      : 17.54.08          - Pressione : 167 Bar   [SUP INF]
Passaggio [P1]      : 17.54.21          - N: 07  080,8 x 1556 x 23910 mm   Load: 110 %   Temp: 1015°C   Ton: 0549 0510 t
Passaggio [P1]      : 17.54.53          - N: 08  065,9 x 1556 x 29140 mm   Load: 142 %   Temp: 1045°C   Ton: 0615 0558 t

Dis secondaria      : 17.54.59          - Pressione : 162 Bar   [SUP INF]
Passaggio [P1]      : 17.55.14          - N: 09  052,9 x 1556 x 35280 mm   Load: 122 %   Temp: 1006°C   Ton: 0611 0567 t

Posiz. Refola       : 17.55.17          - Width: 1750 mm
Passaggio [P1]      : 17.55.40          - N: 10  040,9 x 1556 x 43880 mm   Load: 114 %   Temp: 1042°C   Ton: 0634 0587 t

Dis secondaria      : 17.55.46          - Pressione : 164 Bar   [SUP INF]
Passaggio [P1]      : 17.56.10          - N: 11  029,0 x 1556 x 57310 mm   Load: 144 %   Temp: 0988°C   Ton: 0781 0743 t

Posiz. Refola       : 17.56.25          - Width: 1750 mm

Misura carrello     : 17.56.31          - CMSX: 035,9 mm  CMDX: 035,7 mm  Width: 1556 mm  Temp: 0988°C
Passaggio [P1]      : 17.57.16          - N: 12  048,3 x 1556 x 57310 mm   Load: 000 %   Temp: 0960°C   Ton: 0000 0000 t

Reset ciclo         : 18.03.05          -

```

```

-----
                                VALSIDER S.p.a.
-----
Impianto Steckel                REPORT LAMINAZIONE COIL                Report By Gr1 2009
-----
                                martedm 05 ott 2010 17.58.07
-----

Entrata Forno   : 17.58.07          Testa °C 885   Corpo °C 867   Coda °C 835

Start Ciclo    : 18.04.29   N° 3   Spes. mm 11,99 Lar.mm 1500   Pas. 2350 1640 1220 0 0 0 0
Taglio Cesoa   : 18.04.53          Temp. °C 1048
Discagliatura + : 18.05.00          Bar 247
Passaggio      : 18.05.17   P. 1   Gap mm 19,05   ton 1678       Trq% 50 50   °C 987
Taglio Cesoa   : 18.05.55          Temp. °C 0

Uscita Forno   : 18.05.57          Testa °C 1061  Corpo °C 1001  Coda °C 1066

Discagliatura - : 18.06.02          Bar 214
Pirometro 1BB  : 18.06.06          Testa °C 950   Corpo °C 904   Coda °C 935
Passaggio      : 18.06.15   P. 2   Gap mm 12,23   ton 1706       Trq% 46 47   °C 964
Pirometro 1BB  : 18.07.24          Testa °C 927   Corpo °C 890   Coda °C 900
Passaggio      : 18.07.30   P. 3   Gap mm 8,22    ton 1480       Trq% 30 29   °C 916

Imbocco Aspo 3 : 18.08.07          Trq % 62       Sup°C 664      Inf°C 686

Temp. Avvolgim. : 18.08.13          Trq % 69       Sup°C 625      Inf°C 676
Temp. Avvolgim. : 18.08.25          Trq % 79       Sup°C 618      Inf°C 655
Temp. Avvolgim. : 18.08.35          Trq % 87       Sup°C 662      Inf°C 685
Temp. Avvolgim. : 18.08.46          Trq % 94       Sup°C 657      Inf°C 667
Pirometro 1BB  : 18.08.50          Testa °C 888   Corpo °C 882   Coda °C 913
Temp. Avvolgim. : 18.08.56          Trq % 84       Sup°C 636      Inf°C 649

Stop Ciclo     : 18.08.57   N° 0
Temp. Avvolgim. : 18.09.06          Trq % 66       Sup°C 610      Inf°C 638
Temp. Avvolgim. : 18.09.16          Trq % 71       Sup°C 638      Inf°C 686
-----

```

N.I.M. : 83270

Salvataggio Log : martedm 05 ott 2010 18.09.28

cartellino

mg	scheda	colata	articolo	conferma	pos	articolo originale	real- lienza	consegna	sta- to	sc.	C M	LOG	posiz
0	2010/83468	A1/02008890	CLS355L10001500	90101261	23	LLS275L00421520		30/09/2010	130			27543	
0	2010/83744	A1/01008812	CLS355L10001500	90101421	20	LLS275L00421520		20/10/2010	130			28212	
0	2010/83745	A1/01008828	CLS355L10001500	90101421	20	LLS275L00421520		20/10/2010	130			28213	
0	2010/83746	A1/01008811	CLS355L10001500	90101484	3	LLS275L00421520		20/10/2010	130			28214	
0	2010/83747	A1/02008897	CLS355L10001500	90101484	3	LLS275L00421520		20/10/2010	130			28215	
0	2010/83748	A1/02008915	CLS355L10001500	90101484	3	LLS275L00421520		20/10/2010	130			28216	
0	2010/83749	A1/02008905	CLS355L10001500	90101484	3	LLS275L00421520		20/10/2010	130			28217	

**Dati**  E -3545-PL-2

registrazione

Ora laminazione: 14/10/2010 4.05.25

perc. sfiamm. LOG 28217

n° car.norm.  temp. box

Pregi

scheda  2010/83749

bramma		
spess. calc.	larg. media	lung. taglio informato
219	1522	9800
spess. lamin.	largh. lamin.	lung. taglio bramma
35	1500	9800
spess. SX	spess. DX	spess. med.
0.0	0.0	0.0

C	eq	C	Si	Mu	P	S	Ci	Ni	Co	Al	Ti	Nh	Mo	V	N	A
3753		.13	.009	1.37	.014	.004	.05	.03	.03	.037	.005	.03	.01	.005	.006	.005

operatore pulpito CUFIDENTES FELIPE      operatore spianatrice SVECJANO      operatore rifilo

dim. confe. 10 x 1500 x 203822      teor. 0.00      eff. 25.34 L

01/01/2002

03/11/2010

407 schede dim. rifilo 0 x 0 x 0 ton

mg	data	aus	numero regis.	causale	descriz movimento	ca- rico	sca- rico	valore unitario	tonn.

Ordinato per  Consegna  Scheda  Finale scheda

articolo =        t

variazione   0.00

-----						
VALSIDER S.p.a.						
-----		REPORT LAMINAZIONE		Report By Gr1 2005		
-----						
N.I.M. : 28217						
=====						
Inizio rapporto	:	giovedm 14 ott 2010 04.04.40				
Laminazione ON	:	04.04.40				
Posiz. Refola	:	04.04.40	- Width:	1750 mm		
Dis primaria	:	04.04.46	- Pressione :	242 Bar		
Sforamento OK [P2]	:	04.04.50	- Temp:	1048°C		
Posiz. Refola	:	04.05.05	- Width:	1545 mm		
Mis.Larghezza [P11]	:	04.05.26	- Width:	1533 mm	Temp:	1126°C
Dis secondaria	:	04.05.37	- Pressione :	167 Bar	[SUP INF]	
Temp.Iniziale [P11]	:	04.05.38	- Temp:	1126°C		
Passaggio [P1]	:	04.05.42	- N: 01	194,8 x 1533 x 10680 mm	Load: 140 %	Temp: 1039°C Ton: 0506 0488 t
Posiz. Refola	:	04.05.51	- Width:	1540 mm		
Posiz. Refola	:	04.06.10	- Width:	1535 mm		
Passaggio [P1]	:	04.06.12	- N: 02	173,9 x 1533 x 11650 mm	Load: 149 %	Temp: 1079°C Ton: 0518 0489 t
Dis secondaria	:	04.06.18	- Pressione :	166 Bar	[SUP INF]	
Passaggio [P1]	:	04.06.26	- N: 03	152,8 x 1533 x 13140 mm	Load: 151 %	Temp: 1024°C Ton: 0527 0509 t
Posiz. Refola	:	04.06.36	- Width:	1530 mm		
Posiz. Refola	:	04.06.54	- Width:	1525 mm		
Passaggio [P1]	:	04.06.54	- N: 04	133,9 x 1533 x 14910 mm	Load: 150 %	Temp: 1053°C Ton: 0538 0509 t
Passaggio [P1]	:	04.07.10	- N: 05	114,9 x 1533 x 17090 mm	Load: 146 %	Temp: 1024°C Ton: 0539 0533 t
Posiz. Refola	:	04.07.19	- Width:	1520 mm		
Posiz. Refola	:	04.07.39	- Width:	1515 mm		
Passaggio [P1]	:	04.07.40	- N: 06	097,9 x 1533 x 20150 mm	Load: 149 %	Temp: 1048°C Ton: 0550 0537 t
Dis secondaria	:	04.07.45	- Pressione :	166 Bar	[SUP INF]	
Passaggio [P1]	:	04.07.59	- N: 07	080,8 x 1533 x 24100 mm	Load: 137 %	Temp: 1003°C Ton: 0579 0568 t
Passaggio [P1]	:	04.08.34	- N: 08	065,9 x 1533 x 29320 mm	Load: 149 %	Temp: 1024°C Ton: 0615 0550 t
Passaggio [P1]	:	04.08.56	- N: 09	052,9 x 1533 x 35260 mm	Load: 150 %	Temp: 1003°C Ton: 0604 0617 t
Posiz. Refola	:	04.08.59	- Width:	1750 mm		
Passaggio [P1]	:	04.09.21	- N: 10	040,9 x 1533 x 44110 mm	Load: 138 %	Temp: 1023°C Ton: 0656 0654 t
Passaggio [P1]	:	04.09.52	- N: 11	030,0 x 1533 x 56460 mm	Load: 139 %	Temp: 0995°C Ton: 0726 0744 t
Passaggio [P1]	:	04.10.35	- N: 12	046,5 x 1533 x 56460 mm	Load: 000 %	Temp: 0995°C Ton: 0000 0000 t
Reset ciclo	:	04.16.59	-			

```

-----
                                VALSIDER S.p.a.
-----
Impianto Steckel                REPORT LAMINAZIONE COIL                Report By Gr1 2009
=====
                                giovedì 14 ott 2010 04.11.19
-----

Entrata Forno   : 04.11.19                Testa °C 934   Corpo °C 904   Coda °C 877

Start Ciclo    : 04.19.04   N° 3      Spes. mm 10,00 Lar.mm 1500   Pas. 2230 1360 1050 0 0 0 0
Taglio Cesoià  : 04.19.37                Temp. °C 1033
Discagliatura + : 04.19.45                Bar      240
Passaggio      : 04.20.00   P. 1      Gap mm 17,40   ton 1893       Trq% 57 57   °C 1005
Taglio Cesoià  : 04.20.41                Temp. °C 0

Uscita Forno   : 04.20.42                Testa °C 1092  Corpo °C 1048  Coda °C 1050

Discagliatura - : 04.20.47                Bar      210
Pirometro 1BB  : 04.20.52                Testa °C 963   Corpo °C 937   Coda °C 941
Passaggio      : 04.21.02   P. 2      Gap mm 8,85    ton 2064       Trq% 58 58   °C 975
Pirometro 1BB  : 04.22.24                Testa °C 925   Corpo °C 905   Coda °C 908
Passaggio      : 04.22.29   P. 3      Gap mm 5,99    ton 1491       Trq% 28 27   °C 929

Imbocco Aspo 3 : 04.23.05                Trq % 62       Sup°C 635     Inf°C 646

Pirometro 1BB  : 04.24.07                Testa °C 870   Corpo °C 896   Coda °C 911
Temp. Avvolgim. : 04.24.12                Trq % 58       Sup°C 636     Inf°C 630

Stop Ciclo     : 04.24.13   N° 0
Temp. Avvolgim. : 04.24.22                Trq % 41       Sup°C 640     Inf°C 656
Temp. Avvolgim. : 04.24.32                Trq % 57       Sup°C 608     Inf°C 612

=====
                                N.I.M. : 83749
=====
Salvataggio Log : giovedì 14 ott 2010 04.24.53
=====

```

## Додаток Л

**Протокол щодо виробництва прокату категорії міцності X65  
на заводі Ferriera Valsider**

<b>Протокол</b>	<b>Verbale</b>
<b>технических переговоров по освоению технологии производства рулонного проката трубного сортамента в условиях завода Ferriera Valsider SpA</b>	<b>Della riunione tecnica sull'implementazione della tecnologia della produzione coils per i tubi nello stabilimento Ferriera Valsider SpA</b>
<b>Валлезе ди Оппеано, 28-29 октября 2010</b>	<b>Vallese di Oppeano, 28-29 ottobre 2010</b>
<b>Присутствовали:</b> Константин Поляков, ДСП, Метинвест Холдинг	<b>Presenti:</b> Polyakov Konstantin, PMD dept., SRPD, Metinvest Holding
Александр Курпе, начальник отдела прокатного производства технического управления ОАО «МК «Азовсталь» Елизавета Змазнева, вед. Инженер технического управления ОАО «МК «Азовсталь»	Kurpe Alexander, Resp. Laminazione della Direzione Tecnica Azovstal Zmazneva Elyzavyeta, Resp. Ing. della Direzione Tecnica Azovstal
Бруно Споторно, Ген. Директор Ферриера Вальсидер Серджио Маркуччи, Директор завода Ферриера Вальсидер Роберто Барбиери, Директор по производству и техобслуживанию Ферриера Вальсидер Роберто Спреа, Начальник Отдела контроля качества Ферриера Вальсидер Лоренцо Боццолан, Начальник Отдела новых технологий Ферриера Вальсидер Симоне Гини, специалист Отдела контроля качества Ферриера Вальсидер Эмилия Гольдштейн, помощник дирекции Ферриера Вальсидер	Bruno Spotorno, AD Ferriera Valsider SpA Sergio Marcucci, Direttore di Stabilimento Ferriera Valsider SpA Roberto Barbieri, Direttore Produzione e Manutenzione Ferriera Valsider SpA Roberto Sprea, Resp. Ufficio Controllo Qualità Ferriera Valsider SpA Lorenzo Bozzolan, Resp. Nuove Tecnologie e Processi Ferriera Valsider SpA Simone Ghini, Ufficio Controllo Qualità Ferriera Valsider SpA Emilia Goldshteyn, Assistente Direzione Ferriera Valsider SpA
Марко Каррара, начальник Отдела контроля качества Метинвест Траметал Альберто Гуттиерез, консультант	Marco Carrara, Resp. Ufficio Controllo Qualità Metinvest Trametal SpA Alberto Gutierrez, consulente esterno
<b>Повестка дня:</b>	<b>Agenda:</b>
1. Согласование опытного сортамента рулонов для производства труб и размерного сортамента слябов 2. Рассмотрение возможности реализации нескольких вариантов технологических	1. concordare l'assortimento sperimentale dei coils per tubi, e relativi format delle bramme 2. valutare le possibilità di utilizzare dei diversi regimi tecnologici di laminazione 3. piano delle azioni successive e il programma



режимов прокатки

3. Дальнейшие действия и сроки поэтапного внедрения проекта

**В ходе встречи обсуждено и согласовано следующее:**

1. Экспериментальное производство рулонной стали категории прочности X60 и X65 в условиях завода Ferriera Valsider SpA технически возможно. Для определения возможности производства рулонной стали категории прочности X70 требуется дополнительная техническая проработка, в том числе силовых характеристик имеющегося оборудования.

2. Для проведения опытных прокаток необходимо использовать 3-5 слэбов текущего производства МК «Азовсталь» из стали X60, X65, X70 с оптимальным сечением 220x1250мм весом 15-20т.

3. Имеющаяся на заводе Ferriera Valsider SpA испытательная база позволяет выполнять ряд стандартных испытаний (испытания на разрыв, испытания на ударную вязкость при пониженных температурах, определение твердости). Дополнительные испытания и исследования проката для труб в рамках данного проекта могут быть выполнены в условиях МК «Азовсталь».

4. Для некоторых заказов могут потребоваться испытания металла на стойкости против водородной и сероводородной коррозии. Данные испытания в рамках проекта также могут быть проведены в условиях МК «Азовсталь».

5. Рассмотрены предложения по реализации технологии производства рулонов трубного сортамента, представленные специалистами завода Ferriera Valsider SpA и МК «Азовсталь». Специалистами завода Ferriera Valsider SpA предложен вариант производства проката с охлаждением на установке контролируемого

della realizzazione del progetto

**Nel corso della riunione è stato discusso e concordato quanto segue:**

1. La produzione sperimentale dei coils degli acciai tipo X60 e X65 nello stabilimento Valsider è tecnicamente possibile. Per verificare la possibilità di produzione coils in X70 sono necessari ulteriori accertamenti tecnici, anche nei termini della potenza dell'impianto.

2. Per le laminazione sperimentali verranno utilizzate le bramme X60, X65, X70 (3-5 pz di ciascun tipo) della produzione corrente di Azovstal; le dimensioni ottimali sono 220x1250 mm, peso 15-20 mt,

3. Gli strumenti disponibili nel laboratorio Valsider consentono di effettuare le prove standard (prova di trazione, prova di resilienza alle temperature basse, prove di durezza). Altre prove possono essere eseguite presso i laboratori Azovstal.

4. Per alcuni tipi di prodotti possono essere necessari le prove di resistenza alla corrosione dell'idrogeno e dell'idrogeno solforato. Tali prove possono essere eseguite presso i laboratori Azovstal.

5. Sono stati valutati e confrontati i suggerimenti e proposte sulla tecnologia di laminazione coils per i tubi, presentati da Valsider e da Azovstal. Lo staff tecnico di Valsider propone come ottimale il regime di laminazione con raffreddamento controllato nel campo di rallentamento di ricristallizzazione dell'austenite.

охлаждения с области торможения рекристаллизации аустенита.

6. Специалистами завода Ferriera Valsider SpA предложено при проектировании вариантов технологии МК «Азовсталь» рассматривать прокатку в клети дуо только в одну стадию.

7. Специалистами завода Ferriera Valsider SpA отмечена необходимость учитывать влияние эффекта Баушингера при проектировании технологии с целью получения требуемого уровня механических характеристик.

**По итогам обсуждения приняты следующий решения:**

1. МК «Азовсталь» отобрать из текущего производства по 3-5 слябов каждой марки X60, X65, X70, толщиной 220 мм, шириной не более 1550мм, весом 15-20т. Направить информацию по отобранным слябам с указанием химического состава на завод Ferriera Valsider. **Срок: январь 2011г.**

2. МК «Азовсталь» выполнить анализ качества листового проката произведенного из плавок, от которых отобраны опытные слябы.

3. Проведение опытных прокаток необходимо запланировать в период январь-февраль 2011г.

4. Ferriera Valsider SpA направить специалистам МК «Азовсталь» материалы по результатам текущих прокаток по клетям в согласованном на переговорах формате, а также схему расположения основного оборудования с указанием расстояния между ним.

5. МК «Азовсталь» выполнить адаптацию разработанной математической модели прокатки рулонов, на основании представленных Ferriera Valsider SpA материалов текущих прокаток.

6. Lo staff tecnico di Valsider, in base alle opzioni presentati da Azovstal, propone di adottare lo schema diretto (a una fase) di laminazione nella gabbia Duo.

7. Lo staff tecnico di Valsider sottolinea la necessità di considerare l'effetto Bauschinger nell'elaborazione del regime di laminazione ai fini di ottenere i valori necessari delle caratteristiche meccaniche.

**A seguito della discussione è stato deciso quanto segue:**

1. Azovstal selezionerà dalla produzione corrente e le scorte disponibili 3-5 bramme di X60, X65, X70, di spessore 220 mm e larghezza non superiore di 1550 mm, di peso 15-20 mt. I dati di riferimento delle bramme selezionate (in particolare composizione chimica) verranno inoltrate a Valsider. **Termine: Gennaio 2011.**

2. Azovstal condurrà l'analisi interna sulla qualità delle lamiere prodotte dalle colate selezionate per le sperimentazioni in Valsider.

3. Le laminazioni sperimentali verranno programmate per gennaio-febbraio 2011.

4. Valsider fornirà ad Azovstal le informazioni (in un formato concordato) sui regimi di laminazioni attualmente utilizzati, nonché le informazioni sull'impianto.

5. L'ufficio tecnico di Azovstal aggiusterà il modello teorico delle caratteristiche di laminazione coils in base ai dati acquisiti durante la visita.

6. МК «Азовсталь» и Ferriera Valsider SpA выполнить обмен результатов расчета технологических режимов прокатки на адаптированной модели и по методике Кука.

6. Gli specialisti di Valsider e di Azovstal confronteranno i risultati dei calcoli dei parametri di laminazione fatti con il modello aggiustato e con il metodo Cook.

7. Службе продаж Метинвест Холдинга рассмотреть возможность реализации опытных рулонов.

7. L'Ufficio Vendite della Metinvest Holding studierà le possibilità di vendita dei prodotti sperimentali.

Директор по стратегии и развитию бизнеса  
ДСП Метинвест Холдинга  
Direttore per Strategia e Sviluppo del Business  
della Divisione Acciaio e Laminati, Metinvest  
Holding

Анатолий Игнатуша/Anatoly Ignatusha

Управляющий директор Ферриера Вальсидер  
Amministratore Delegato Ferriera Valsider SpA

Бруно Споторно/Bruno Spotorno

Директор завода Ферриера Вальсидер  
Direttore di Stabilimento Ferriera Valsider SpA

Серджио Маркуччи/Sergio Marcucci

Директор по производству и техобслуживанию  
Ферриера Вальсидер  
Direttore Produzione e Manutenzione Ferriera  
Valsider SpA

Роберто Барбиери/Roberto Barbieri

И.о. Генерального директора  
ОАО «МК «Азовсталь» / Direttore Generale ad  
Interim di Azovstal

Энвер Цкитишвили/Enver Tskitishvili

## Додаток М

## Технологія виробництва рулонів зі сталі марки S460MC на стані 1700 «ММК ІМЕНІ ІЛІЧА»

<p>31/1841 30.06.2016</p>	<p>ЧАО «МАРИУПОЛЬСКИЙ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИЙ КОМБИНАТ ИМ. ИЛЬИЧА»</p> <p style="font-size: small;">Утвержден заяв. ТЗ-ЦДМК № 59/16-2-Пр 1 к.с.с.т.б.</p> <p style="text-align: center;"><b>УТВЕРЖДАЮ:</b> Директор по технологиям и качеству К.Е. Писмарев «29» июня 2016г.</p>
<p>И.о. начальника УП ..... Козловцеву С.В. И.о.начальнику ЛПЦ-1700 ..... Седелкину А.А. Начальнику УпрКК ..... Анисимову Г.В. Начальнику участка ОТК ЛПЦ-1700 ..... Попову А.А.</p>	
<p><b>ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ</b> ТЗ - ЦДМК - № 59/16-2-Пр 1</p>	
<p><b>На отработку технологии прокатки металла марки S460MC по EN 10149-2</b></p> <p>Срок действия с 29.06.2016г по 29.06.2017г.</p>	
<p><b>Цель ТЗ:</b> отработка технологии прокатки нового вида продукта из металла марки S460MC по EN 10149-2.</p>	
<p><b>Основание ТЗ:</b> принятие в производственную программу ЛПЦ-1700 заказа марки S460MC по EN 10149-2 в объеме 120т.</p>	
<p>Задействованы: ЛПЦ-1700, участок УКК при ЛПЦ-1700, УА, ТУ (группа горячей прокатки рулонов, ОМТ).</p>	
<p>И.о. начальника УП ..... Козловцев С.В. И.о.начальника ЛПЦ-1700 ..... Седелкину А.А. Начальнику ККЦ ..... Ларионову А.А.</p>	
<p>1. Планировать производство проката в ЛПЦ-1700: из непрерывнолитых слябов толщиной 151 мм с разливкой на МНЛЗ №3 по шифру МВКС М6.550, шириной в соответствии с текущим заказом, длиной 6000-6200 мм. Расходы материалов на производство металла аналогичные, как при производстве марки S355MC.</p>	
<p>И.о.начальника ЛПЦ-1700 ..... Седелкину А.А. Начальнику участка УКК ЛПЦ-1700 ..... Попову А.А.</p>	
<p>2.1 Перед прокаткой проверить состояние оборудования стана (в том числе гидросбивов окалины, работу клетей черновой и чистовой группы, петледержателей рольгангов, моталок).</p>	
<p>2.2 Произвести опытное опробование технологии на 4 слябах. После получения положительных результатов произвести посад оставшегося металла.</p>	
<p>2.3 Нагрев литых слябов в методических печах осуществлять в соответствии с технологической картой № 1700-2/2016 «на режим работы нагревательных печей ЛПЦ-1700.</p>	

Остальные требования по нагреву металла в соответствии с ТИ 227-П.ГЛ 21-2014 «Производство горячекатаной листовой стали на непрерывном широкополосном стане 1700». При этом при прокатке полос температура за клетью 4а должна быть не менее 1080 °С.

2.4 Прокатку в черновой группе осуществлять по режимам, приведенным в таблице 8.1 ТИ 227-П. ГЛ-21-2014, как для марки стали S355MC (на основании имеющегося опыта прокатки). Толщина подката перед чистовой группой 23-24мм (может корректироваться по согласованию с работниками технического управления).

2.5 Прокатку осуществлять при работающих трех гидросбивах окалины (№№2, №4, №6 (или №7)).

2.6 Процесс прокатки вести с использованием ТСУ.

2.7 Обрезку переднего и заднего концов полосы производить в обязательном порядке на летучих ножницах перед чистовой группой до полной ширины и удаления «подстуженных» участков.

2.8 Настройку чистовых клетей осуществлять в соответствии с разделом 10 ТИ 227-П.ГЛ-21-2014. Допуски на размеры в соответствии с EN 10051:2010.

2.9 При прокатке металла отключить «гидрообеспыливание» и обеспечить минимальное количество воды на поверхности полос в межклетевых промежутках.

2.10 Температура конца прокатки составляет  $T_{кп} = 820-880^{\circ}\text{C}$ , температура начала смотки  $T_{см} = 560-600^{\circ}\text{C}$ , режим душирования - 10-14.

2.11 Процесс смотки рулонов на моталке производить с увеличенной окружной скоростью барабана моталки по сравнению с рабочими вальками кл.№10, для обеспечения плотной смотки полосы в рулон.

2.12 Сразу после смотки полосы в рулон и установки на конвейер №1 прокат снимается краном и устанавливается под вентиляторы охлаждения (азраторы) для обеспечения ускоренного охлаждения до  $450-400^{\circ}\text{C}$  и исключения образования воздушной окалины.

2.13 Приемку отделки и сдачу рулонов осуществлять в соответствии с ТИ 227-П.ГЛ-27-2010.

3 Начальнику участка УА

Георгиеву Н.Е.

Обеспечить фиксацию информации по прокатке опытных полос марки S460MC в системе «Клесим» и «системе визуализации». При необходимости предоставить в ТУ для анализа.

4 Начальнику группы горячей прокатки рулонов ТУ

Васильченко С.Е.

Обобщить полученные результаты и сделать вывод о возможности прокатки металла марки S460MC. При необходимости внести изменения в Н.Д о расширении марочного сортамента.

Начальник ТУ

А.Г. Курпе

Согласовано:  
И.о.начальника ЛПЦ-1700

А.А. Седелкин

Исполнитель:  
Васильченко С.Е., 3-22-51

*Васильченко*  
(С.Е. Васильченко)

## Додаток Н

**Акт освоения производства нового продукта – горячекатаных рулонов з марки  
сталі S460MC згідно з вимогами EN 10149-2**

ЧАО «Мариупольский металлургический комбинат имени Ильича»


 Утверждаю:  
 Директор по технологиям и качеству  
 Трещин К.Е.  
 19.06.2016 г.

**АКТ ОСВОЕНИЯ  
 НОВОГО ВИДА ПРОДУКТОВ ММКИ № 1/2016**

**Производство проката из стали марки S460MC по EN10149-2 термомеханическим способом прокатки.**

(наименование и вид продукта)

1. Наименование объекта, на котором проводится внедрение нового вида продукта  
*Непрерывной широкополосной стал 1700 из литой заготовки.*  
 (цех, участок, производство)

2. Краткое описание нового вида продукта, его особенности, отличие от действующей технологии производства  
*Ранее на комбинате отсутствовал опыт производства указанного проката. С целью расширения марочного ассортимента производимой продукции, принято решение произвести опытную партию горячекатаных (неправильных) рулонов с необрезной кромкой (по спецификация № 0622RD) из высокопрочной стали марки S460MC по EN10149-2 термомеханическим способом прокатки.  
 Для возможности выполнения заказа была разработана технология производства металла и проката, выдано технологическое задание ТЗ-ЦПМК-59/16-2-Пр1 от 29.06.2016: «На отработку технологии прокатки металла марки S460MC по EN 10149-2».*

3. Состояние выполнения опытного заказа, первоначальный объем производства  
*По спецификации № 0622RD объем заказа стали марки S460MC по EN 10149-2 составляет 120 т. Для возможности выполнения заказа были разработаны необходимый химический состав стали (шифр регламента М6.350) и температурно-деформационные режимы прокатки, обеспечивающие механические свойства проката.  
 Необходимый химический состав стали, температурно-деформационные режимы прокатки, обеспечивающие механические свойства проката, требования к допускам по форме и размерам при производстве эл. рулонов из стали марки S460MC - выполнены.*

4. Результаты проведенной работы по освоению нового вида продукции  
*Выход годного по прокату отгруженного под заказ потребителю – 110,81т (выход годного 100%). Производство считается успешно освоенной.*

5. Период внедрения июль 2016 г.

Начальник ТУ  А.Г. Курне

Согласовано:

И.о. Начальник Управления по производству  С.В. Кольцовцев

И.о. Начальник ЛПЦ-1700 С.Д. Негрий

## Додаток О

## Металлографічне дослідження зразків гарячекатаних рулонів зі сталі марки В

ЧАО «Мариупольский металлургический комбинат им. Ильича»  
Техническое управление

УТВЕРЖДАЮ:  
Начальник технического  
управления

*[Signature]* А.Г. Курне

« 08 » 08 2017 г.

*[Stamp]*

ОТЧЕТ № 79-2017  
по металлографическому исследованию  
Образцов от горячекатаного проката  
стали марки В плавки 172648-3

Начальник лаборатории металловедения *[Signature]* О.Н. Шебаниц  
08.08.17

И. о. начальника группы

*[Signature]* Е.В. Смирнова  
08.08.2017 г.

ОТЧЕТ № 79-2017  
по металлографическому исследованию

Страница 2 из 9

## ОСНОВАНИЕ ДЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЯ:

Заказ группы горячей прокатки рулонов

## ЦЕЛЬ ИССЛЕДОВАНИЯ:

Оценка микроструктуры горячекатаного проката стали марки В плавки 172648-3

### 1 МАТЕРИАЛ И МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Для исследования микроструктуры представлены разрывные образцы от горячекатаного проката стали марки В плавки 172648-3 после проведения механических испытаний.

Результаты механических испытаний представлены в таблице:

Номер образца	Толщина, мм	Номер партии	Предел прочности $R_m$ , МПа	Предел текучести $R_{p0.2}$ , МПа	Относительное удлинение $\delta$ , %	Изгиб $180^\circ$
1	5,7	4439	475	360	30	выд.
2			465	340	33	выд.
5	4,7	4438	480	360	36	выд.
6			485	365	40	выд.
Стандарт API 5L (PSL1)			min 415	min 245	4,7 мм $\geq 21$ Дж 5,7 мм $\geq 22$ Дж	-

Испытания проводились на разрывных образцах, отобранных в продольном направлении.

В ходе исследования определен химический состав образцов, измерена твердость, проведен анализ микроструктуры на микрошлифах, изготовленных в продольном и поперечном направлениях. Микроструктуру выявляли химическим травлением 4% спиртовым раствором  $HNO_3$ , оценивали по ГОСТ 5640-68. Величину зерна оценивали по ГОСТ 5639-82.

### 2 РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Результаты химического анализа образцов, плавочный химический состав, требования МВКС-2015и стандарта API 5L приведены в таблице 2.

Результаты измерения твердости образцов представлены в таблице 3:

Номер образца	Твердость по Бринеллю НВ
1	131 140 137
2	140 128 134
5	140 143 143
6	128 140 134



### **1. Образцы №№ 1, 2**

Микроструктура феррито – перлитная с зерном феррита 10, 9 номера. Полосчатость структуры неоднородная по толщине, у поверхности практически отсутствует, более выражена в осевой зоне:

- образец № 1 – шкала 3 балл 3 по ряду А (рис. 1, 5);
- образец № 2 – шкала 3 балл 2 по ряду А (рис. 2, 5).

### **2. Образцы №№ 5, 6**

Микроструктура феррито – перлитная. Зерно феррита неравноосное, оценено 10 номером. У поверхности структура без полосчатости, в  $\frac{1}{2}$  по толщине полосчатость оценена:

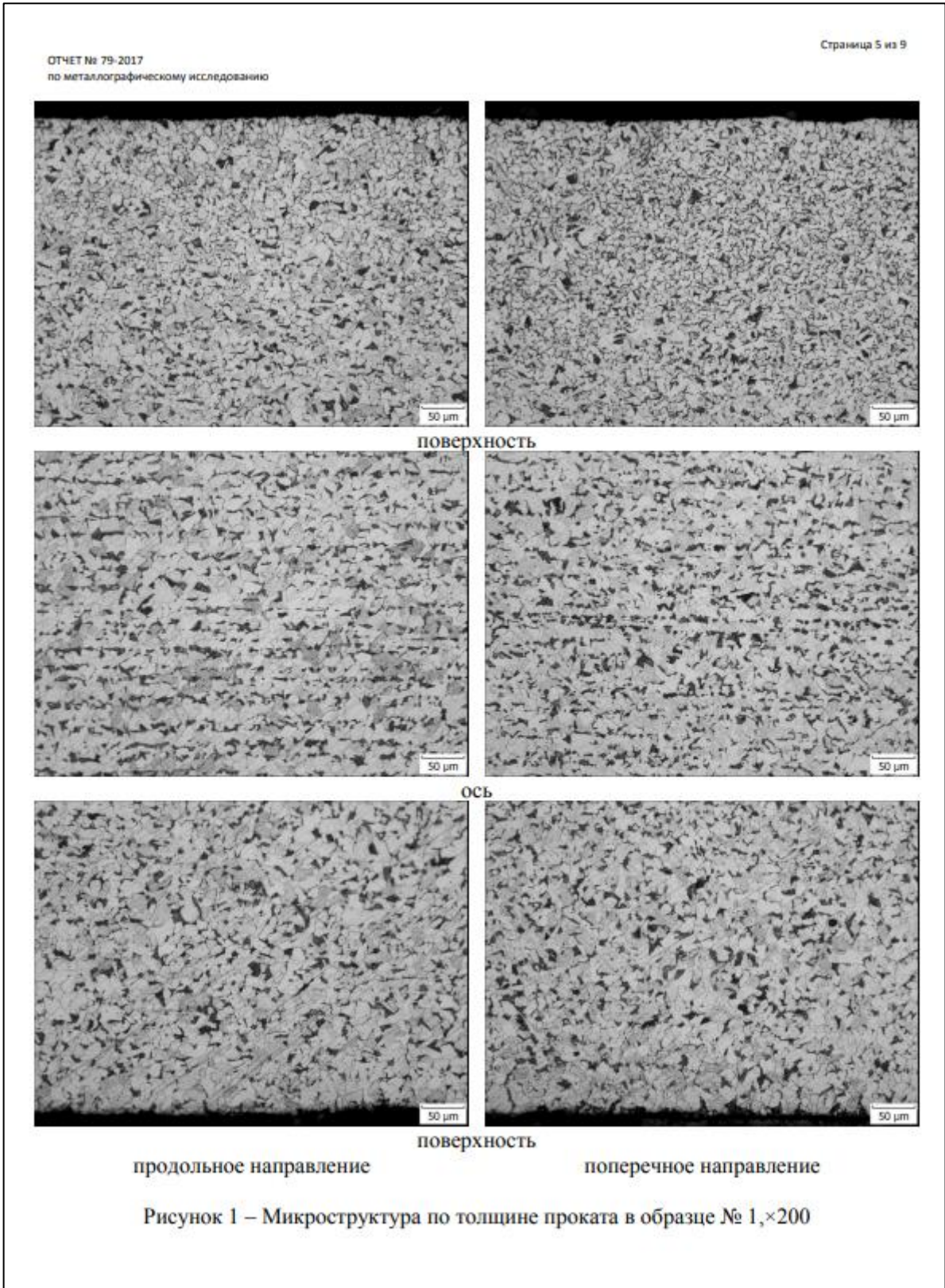
- образец № 5 – шкала 3 балл 1 ряд А (рис. 3, 5);
- образец № 6 – шкала 3 балл 2 ряд А (рис. 4, 5).

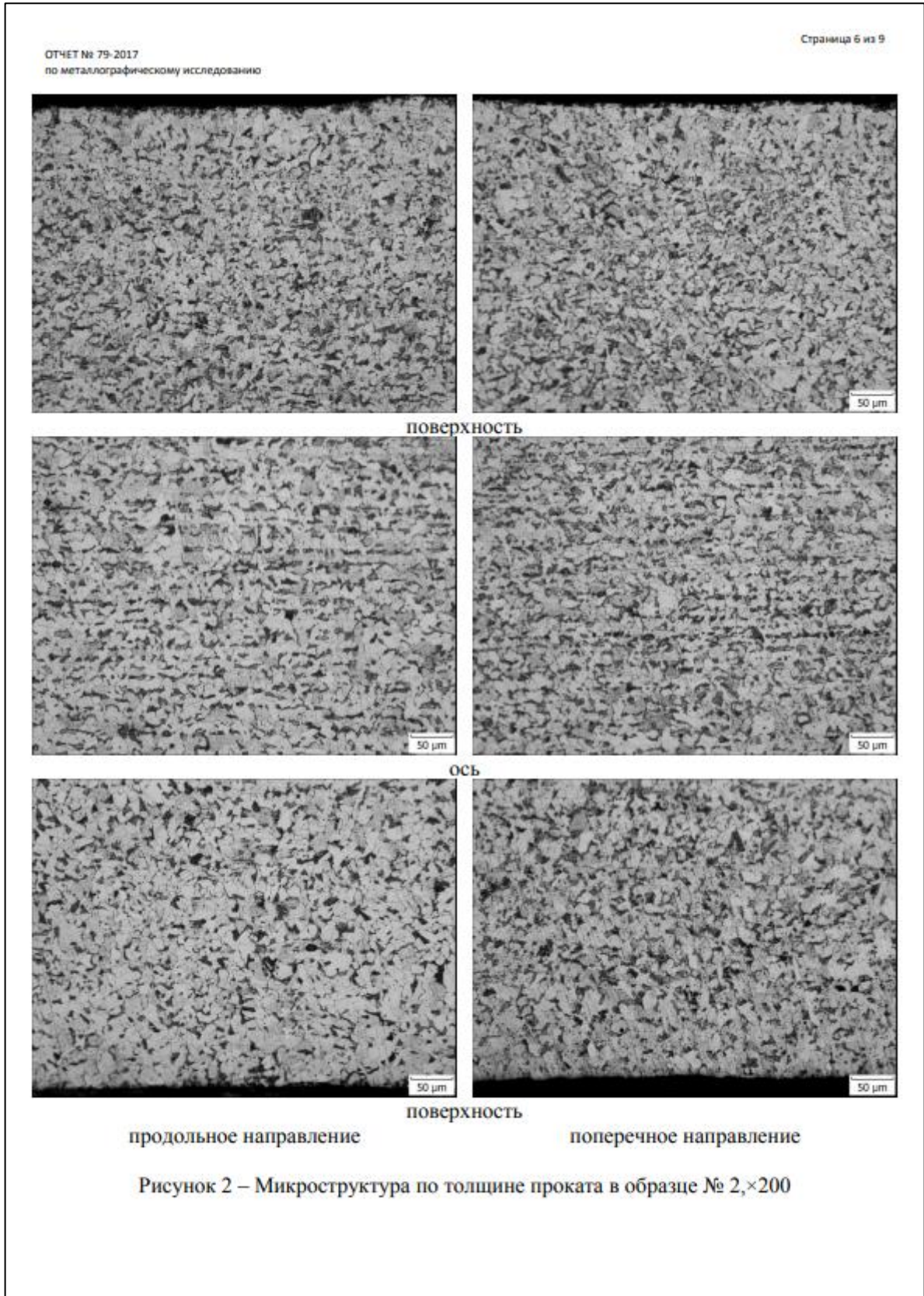
## **3 ВЫВОДЫ**

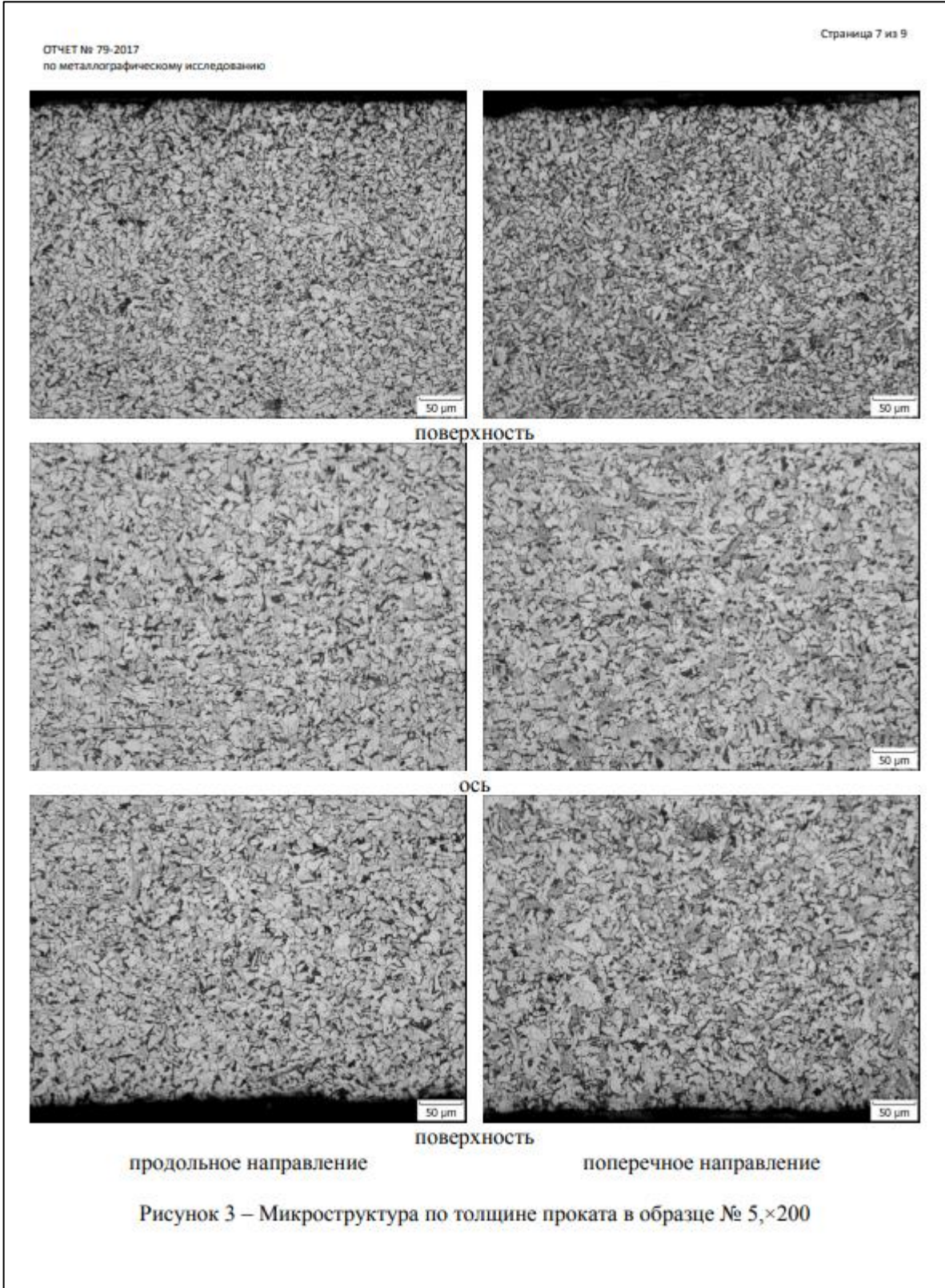
3.1 Химический состав образцов №№ 1, 2, 5, 6 от горячекатаного проката соответствует плавочному, требованиям МВКС-2015 и стандарта API 5L для стали марки В.

3.2 Микроструктура образцов от горячекатаного проката феррито-перлитная, с зерном феррита 9, 10 номера.









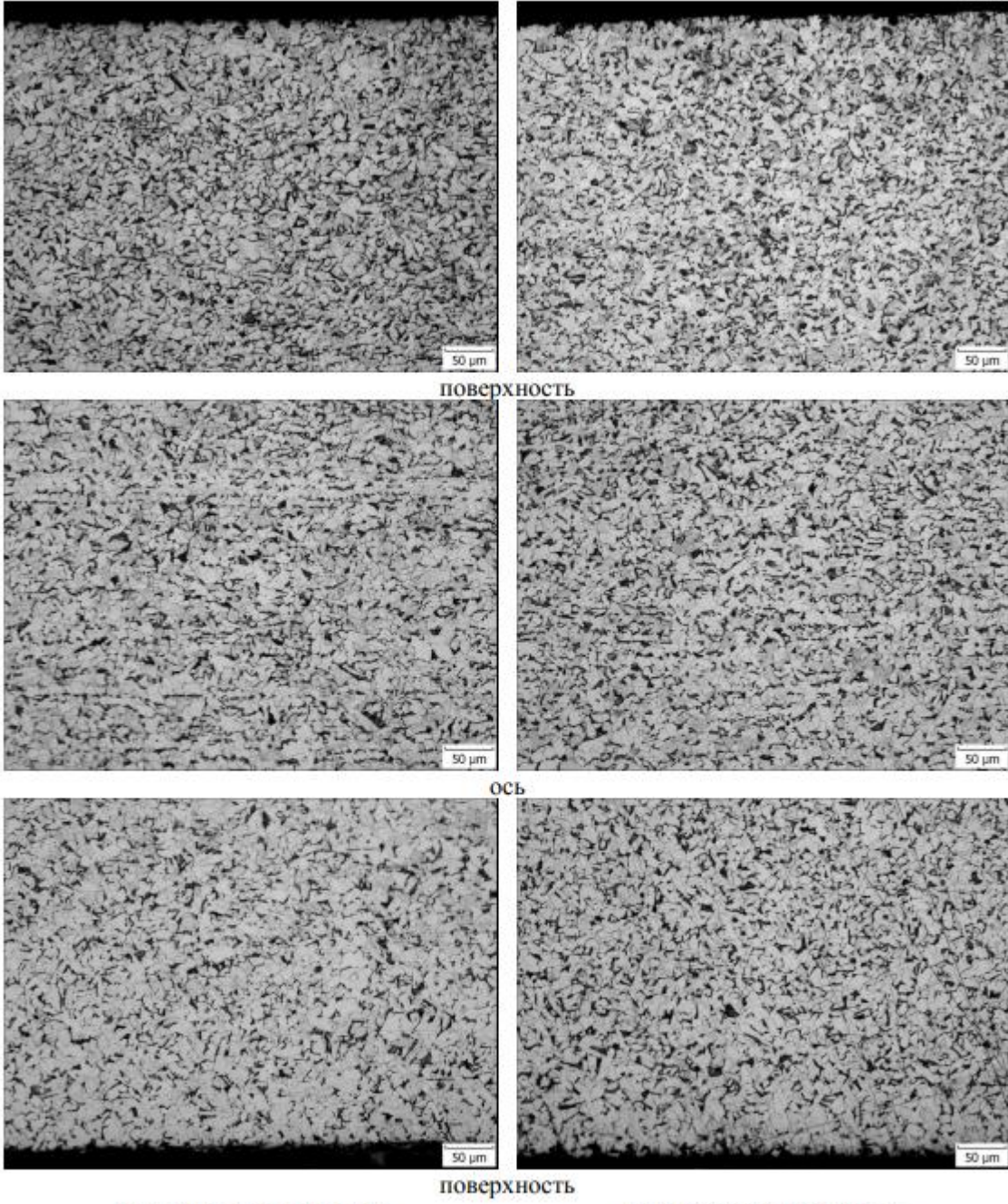
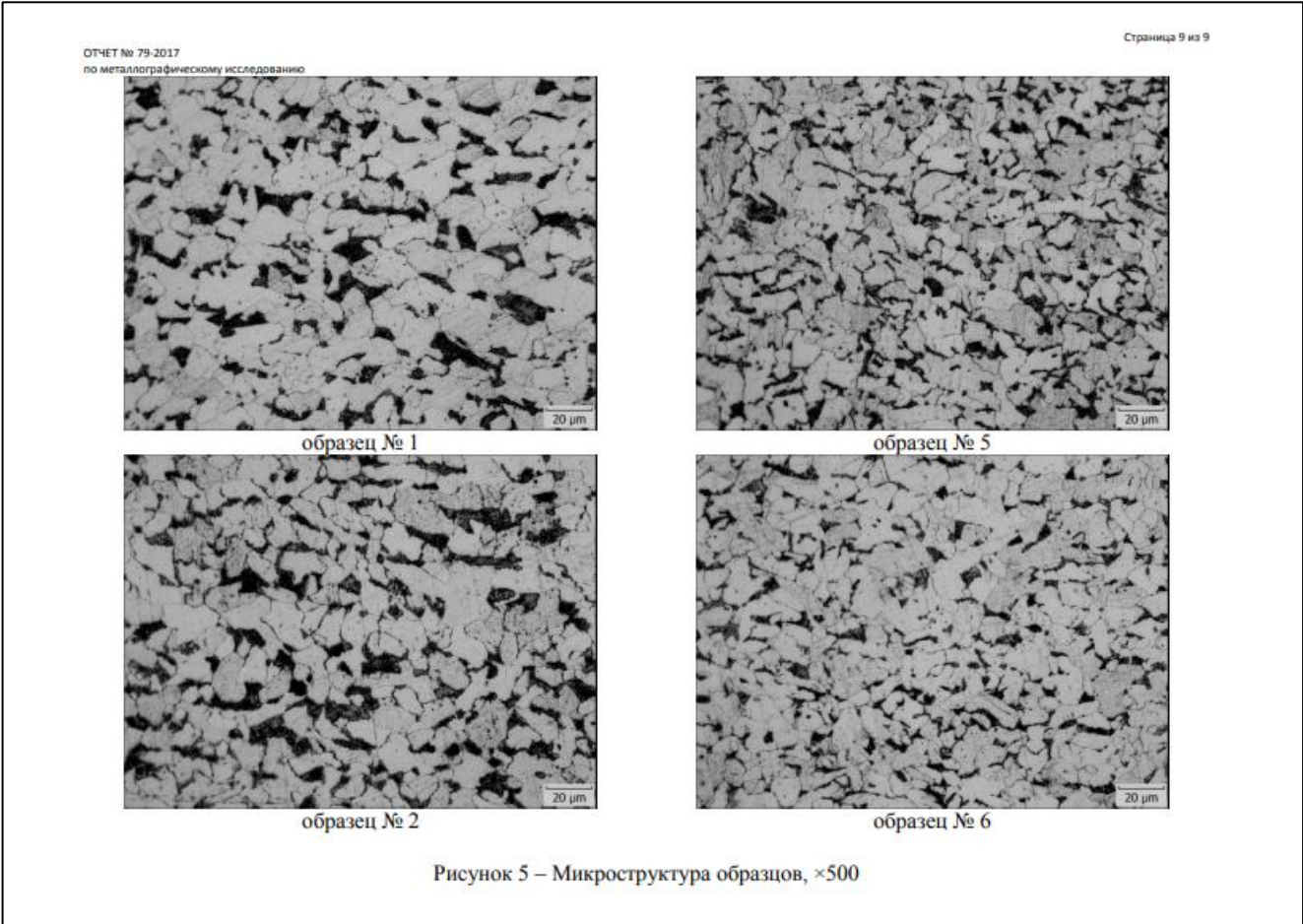


Рисунок 4 – Микроструктура по толщине проката в образце № 6, ×200



## Додаток П

## Акт освоения производства нового продукта – горячекатаных рулонов зі сталі марки В згідно з вимогами API-5L

ПАО «Мариупольский металлургический комбинат имени Ильича»

Утверждаю:  
Директор по качеству  
Нов В.П.  
« 09 » мая 2017 г.

**АКТ ОСВОЕНИЯ  
НОВОГО ВИДА ПРОДУКТОВ ММКИ № 9**

**Производство проката из стали марки В по API 5L (PSL1)**

(наименование и вид продукта)


1. Наименование объекта, на котором проводится внедрение нового вида продукта  
*Непрерывный широкополосный стан 1700 из листового металла высшего по МНПЗ-3.*  
(цех, участок, производство)

2. Краткое описание нового вида продукта, его особенности, отличие от действующей технологии производства  
*Ранее на комбинате отсутствовал опыт производства и поставки указанного проката. С целью расширения ассортимента производимой продукции было принято решение произвести поставку опытной партии горячекатаных (неотраченных) рулонов с несрезной крошкой из стали марки В по API 5L (PSL1) размерами: 4,7/5,7x1190мм.  
Для выполнения заказа разработана технология производства проката, выписан новый лист регламента МВКС 2015 и технологическое указание ТУк -68/17-2-1700 «На обработку технологии производства рулонного проката из легированных качественных марок стали предназначенных для производства электросварных, нефтягазопроводных труб при выполнении заказа на производство рулонов размерами 4,7/5,7x1190мм из стали марки В по API 5L (PSL1)».*


3. Состояние выполнения опытного заказа, первоначальный объем производства  
*По спецификации №29 объем заказа из стали марки В по API 5L (PSL1) составляет 120т. Для выполнения заказа произвели металл по шифру М5.540. Нагрев и прокат горячекатаного проката осуществлялся в соответствии с ТУк -68/17-2-1700. Допуски по форме и размерам в соответствии с EN 10051:2010. Потребителю отгружено 118,36т.*


4. Результаты проведенной работы по освоению нового вида продукции  
*Общий выход годного 100%. Потребитель после производства труб из поставленного металла сообщил, что уровень механических свойств в конечном изделии удовлетворен требованиям API 5L (PSL1). Продукция считается успешно освоеной.*


5. Период внедрения май 2017 г.

Начальник ТУ  Л.С. Тихонов

Согласовано:

Начальник Управления по производству  В.Д. Нагай

Начальник ЛШЦ-1700  С.Д. Нетрий

 21.05.17



Додаток Р

**Металлографічне дослідження зразків гарячекатаних рулонів зі сталі категорії  
міцності X52M**

ЧАО «Мариупольский металлургический комбинат им. Ильича»  
Техническое управление

УТВЕРЖДАЮ:  
Начальник технического  
управления

  
А.Г. Курпе  
«23» 12 2016 г.  
УПРАВЛІННЯ

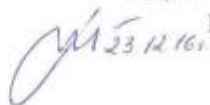
ОТЧЕТ № 220-2016  
по металлографическому исследованию  
Образцов горячекатаного проката стали марки S355MC

Начальник лаборатории металловедения



О.Н. Шебаниц

Инженер-технолог



Е.А. Похнатюк

ОТЧЕТ № 220-2016  
по металлографическому исследованию

Страница 2 из 9

#### ОСНОВАНИЕ ДЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЯ:

Заказ группы горячей прокатки рулонов ТУ

#### ЦЕЛЬ ИССЛЕДОВАНИЯ:

Оценка микроструктуры горячекатаного проката стали марки S355MC плавков 164022-3, 254077-2 толщиной 8,0 мм

### 1 МАТЕРИАЛ И МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Для оценки микроструктуры на исследование представлены образцы, отобранные в  $\frac{1}{4}$  ширины полос от конца рулонов горячекатаного проката стали марки S355MC плавков 164022-3, 254077-2 толщиной 8,0 мм. Схема отбора приведена на рис. 1.

Режимы прокатки и охлаждения полос, результаты механических испытаний представлены в приложении А, В.

В ходе исследования был определен химический состав образцов. Проведен анализ микроструктуры на микрошлифах, изготовленных в продольном направлении. Микроструктуру выявляли химическим травлением 4% спиртовым раствором  $\text{HNO}_3$ . Загрязненность неметаллическими включениями оценена по ГОСТ 1778-70, величина зерна по ГОСТ 5639-82, полосчатость феррито-перлитной структуры по ГОСТ 5640-68.

### 2 РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Результаты химического анализа исследуемых образцов, плавочный химический состав, требования МВКС-2015, требования ISO 3183 для стали марок L360M/X52M и требования EN 10149-2:1995 для стали марки S355MC приведены в таблице 1.

Содержание кремния и ниобия в стали плавки 254077-2 выше, чем в стали плавки 164022-3.

В ходе исследования установлено, что уровень загрязнения проката неметаллическими включениями не превышает 2 балл.

Анализ микроструктуры образцов приведен в таблице 2.

Микроструктура горячекатаного проката стали марки S355MC плавков 164022-3, 254077-2 феррито-перлитная, зерно 8-10 номера (рис. 2, 3).

В образце от проката стали марки S355MC плавки 164022-3 в осевой зоне выявлены грубые ликвационные полосы с повышенной долей перлита. Полосчатость неравномерная: участки с полосчатостью 3-4 балла чередуются с участками с полосчатостью 1 балла (рис. 2). Данный тип микроструктуры является неблагоприятным, так как наличие в структуре стали чередующихся полос феррита и перлита является основной причиной анизотропии механических свойств в горячекатаном прокате, а также значительно снижает значения ударной вязкости и предела текучести.

Микроструктура образца от проката стали марки S355MC плавки 254077-2 с более высокими значениями механических свойств (приложение

В) характеризуется более однородным строением по толщине и равномерной полосчатостью 1-2 балла (рис. 3).

В микроструктуре образцов от обеих плавков бейнитной составляющей не выявлено.

### ВЫВОДЫ

3.1 Химический состав образцов стали марки S355MC плавков 254077-2, 164022-3 соответствует плавочному, требованиям МВКС-2015, ISO 3183 для стали марок L360M/X52M, EN 10149-2:1995 для стали марки S355MC.

3.2 Микроструктура исследуемых образцов различается распределением перлитной составляющей по толщине проката.

Прокат плавки 254077-2 с удовлетворительной однородной по толщине микроструктурой показал более высокие прочностные свойства и значения ударной вязкости. Химический состав данной плавки характеризуется содержанием кремния на 0,18%, ниобия на 0,011% выше, чем в прокате плавки 164022-3.

3.3 Для повышения прочности и ударной вязкости горячекатаного проката необходимо получение однородной по толщине мелкодисперсной микроструктуры. Это достигается путем повышения скорости охлаждения после прокатки и снижения температуры смотки полос.

Таблица 1 – Химический состав исследуемого проката

Номер образца	Содержание химических элементов, %													
	C	Mn	Si	S	P	Cr	Ni	Cu	Al	Mo	Ti	V	Nb	N <sub>2</sub>
025	0,12	1,40	0,03	0,009	0,020	0,02	0,01	0,01	0,045	0,001	0,023	0,003	0,028	0,006
<b>плавка 164022-3</b>	<b>0,12</b>	<b>1,36</b>	<b>0,03</b>	<b>0,009</b>	<b>0,019</b>	<b>0,02</b>	<b>0,01</b>	<b>0,01</b>	<b>0,043</b>	<b>0,002</b>	<b>0,019</b>	<b>0,003</b>	<b>0,026</b>	<b>0,006</b>
S355MC ш. М6.550 МВКС-2015	0,08- 0,12	1,30- 1,50	≤0,03	≤0,010	≤0,020	≤0,10	≤0,10	≤0,10	0,02- 0,05	≤0,08	0,015- 0,030	≤0,10	0,25- 0,04	≤0,009
035	0,10	1,38	0,21	0,009	0,019	0,04	0,02	0,02	0,028	0,003	0,018	0,003	0,039	0,006
<b>плавка 254077-2</b>	<b>0,10</b>	<b>1,40</b>	<b>0,21</b>	<b>0,009</b>	<b>0,020</b>	<b>0,03</b>	<b>0,02</b>	<b>0,02</b>	<b>0,032</b>	<b>0,004</b>	<b>0,017</b>	<b>0,003</b>	<b>0,040</b>	<b>0,006</b>
S355MC ш. М6.500 МВКС-2015	0,08- 0,12	1,30- 1,50	0,15- 0,30	≤0,010	≤0,020	≤0,10	≤0,10	≤0,10	0,02- 0,05	≤0,08	0,015- 0,030	≤0,10	0,35- 0,50	≤0,009
Требования ISO 3183 для L360M/X52M	≤0,22	≤1,40	≤0,45	≤0,015	≤0,025	-	-	-	-	-	Ti+Nb+V ≤ 0,15		-	
Требования EN 10149- 2:1995 для S355MC	≤0,12	≤1,50	≤0,50	≤0,020	≤0,025	-	-	-	≥0,015		≤0,15	≤0,20	≤0,09	-

Таблица 2 – Анализ микроструктуры горячекатаного проката стали марки S355MC

Марка стали	Номер плавки	Толщ., мм	Номер зерна феррита		Полосчатость (ряд А)	
			поверхн.	½	поверхн.	½
S355MC	164022-3	8,0	равноосное, 10	равноосное 8; 9	2 балла	3-4 балла
	254077-2		равноосное 10; 9	равноосное 9; 8	1 балла	2 балла

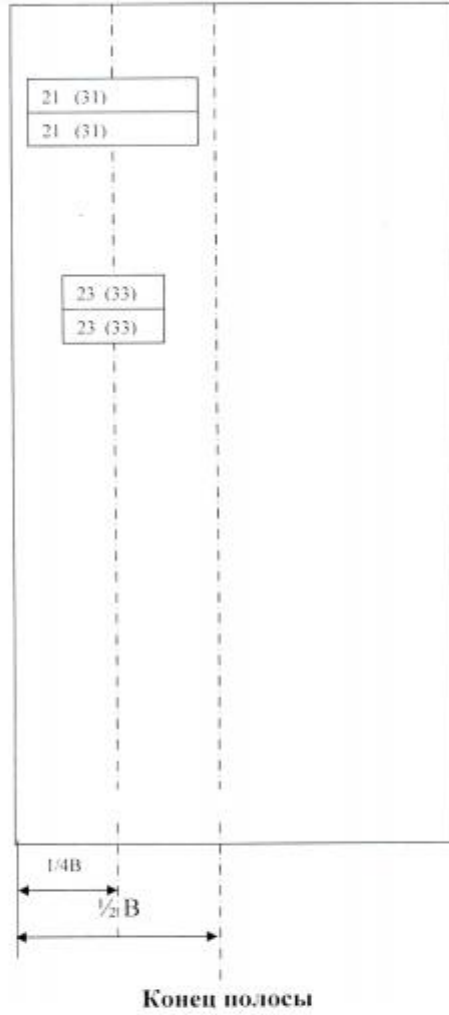
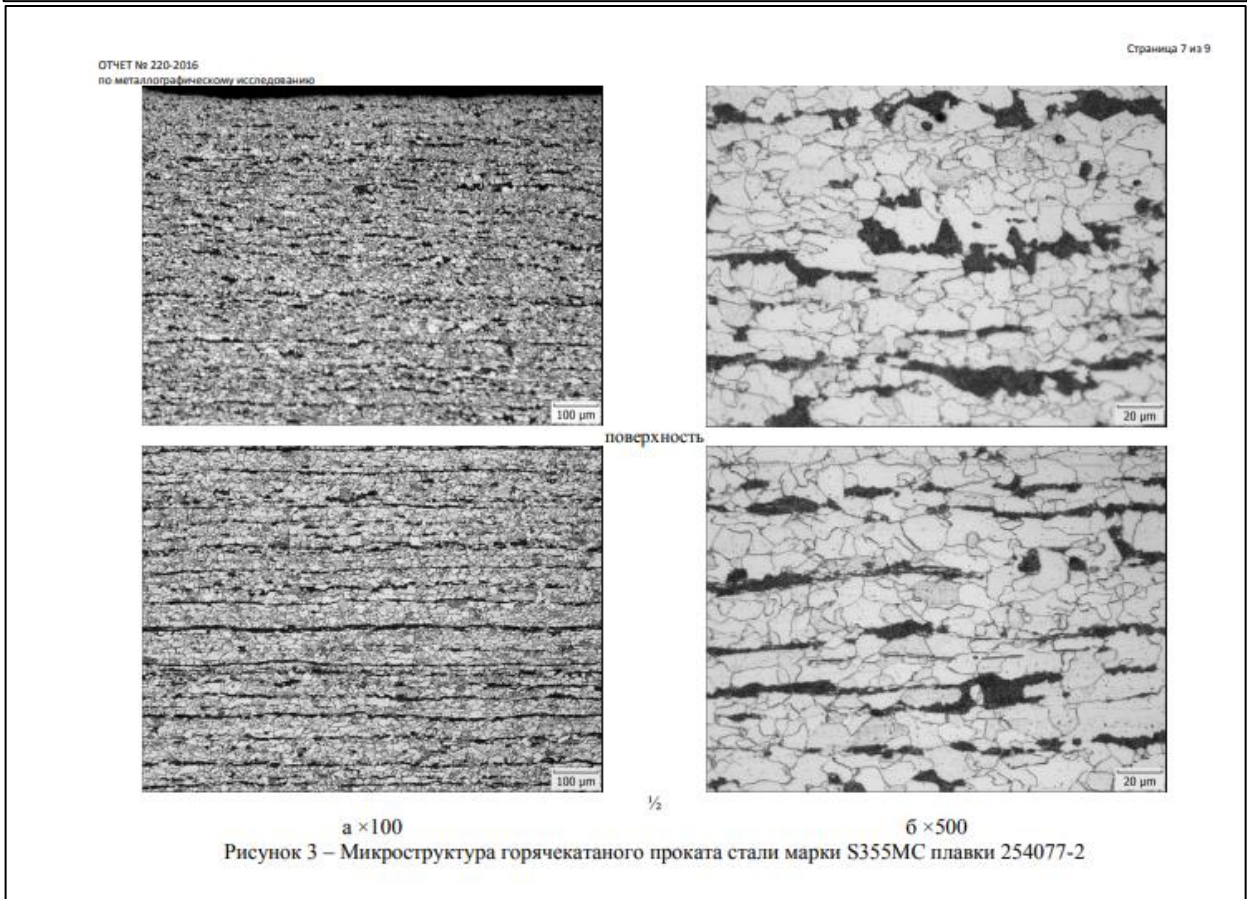
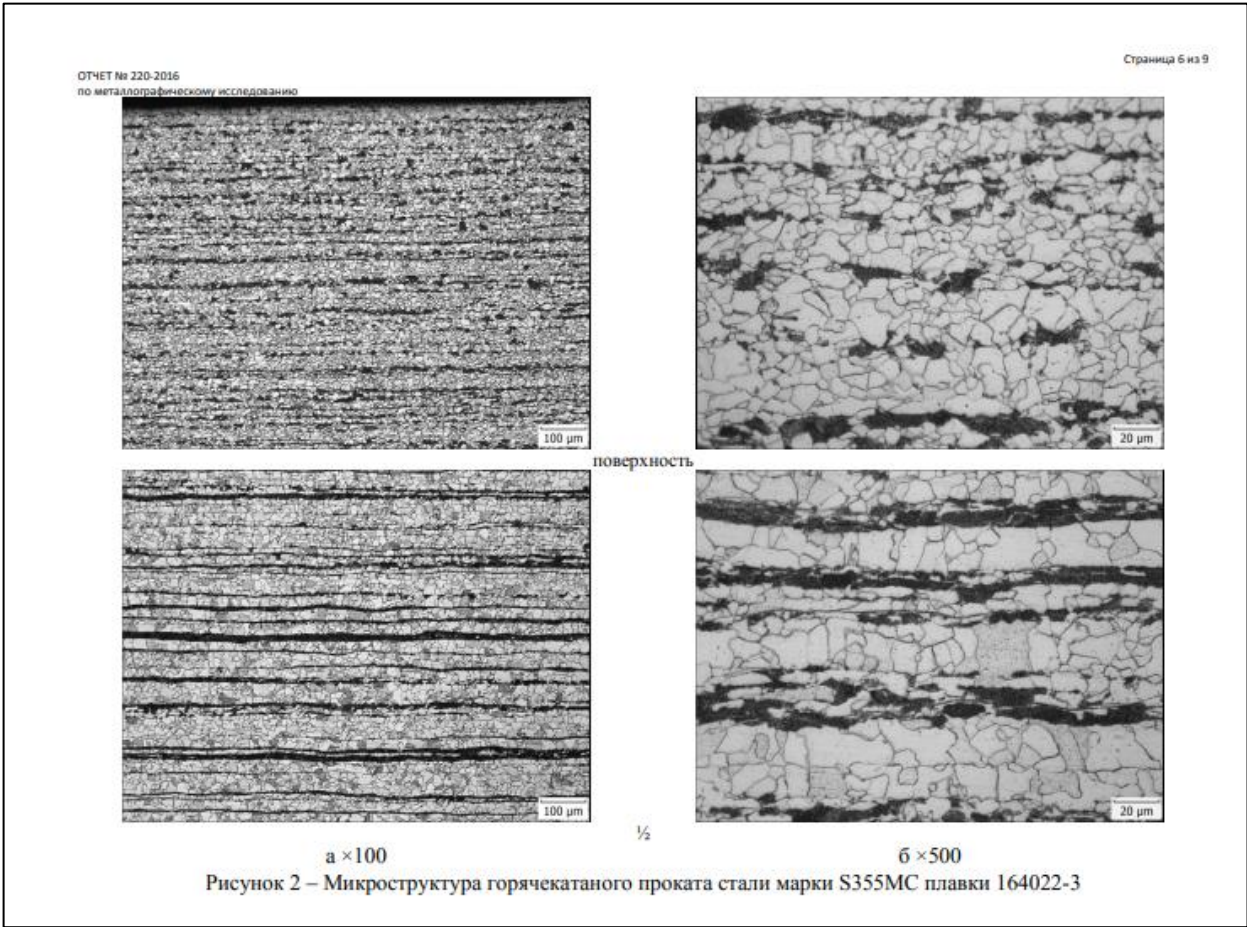


Рисунок 1– Схема отбора образцов от горячекатаного рулонного проката стали марки S355MC



ОТЧЕТ № 220-2016  
по металлографическому исследованию

Страница 8 из 9

Приложение А

Температурные режимы прокатки и охлаждения полос в ЛПЦ-1700

Дата	См	Бр	№ стр	№ плавки	Марка стали	Толщина, мм	Ширина, мм	Всад	Вес, кг	№ рулона	Замеч. ОТК в линии стана	Температура, °С						Режим душирования
												за клетью № 10 (Ткп)			перед моталками (Тсм)			
												гол.	хв.	ср.	гол.	хв.	ср.	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
Значение параметра по ТИ												820-880°С			580-630°С			
13.12.2016	2	3	3	254077-2	S355MC	8.0	1260	Х.всад	7690	1	нет	870				620		10
			5	164022-3					8570	1		860			620	11		

ОТЧЕТ № 220-2016  
по металлографическому исследованию

Страница 9 из 9

Приложение В

Мех испытания с указанием маркировки на образцах

Марка стали	Толщина полосы	№ плавки	№ рулона	Термо-обработ. образца	Место отбора проб	Направление по прокату	Место отбора по ширине	Предел текучести, МПа	Времен. сопротив. МПа	Удлинение, %	Изгиб	Испытание на ударный изгиб, КВ Дж (размер образца 5x10мм)			
												-20°С	-40°С	-60°С	
S355MC	8,0 мм	254077-2	167545801	—	конец	поперечные	¼ ширины	31 425 430	31 520 520	31 24 24	выд	-20°С	33 41	33 37	33 38
		-40°С	37	38				41							
		164022-3	167588501	—				21 380 390	21 500 500	21 24 27		-20°С	23 32	23 30	23 32
												-40°С	30	32	32
												-60°С	34	33	35
Норма по ISO 3183						L360M	≥ 3	360-530	460-760				≥	27	1 Дж
Норма по EN 10149-2:1995						S355	≥ 3	≥355	430-550	≥ 23		-20°С	≥	40	1 Дж

Примечание: <sup>1</sup> используя образцы для испытаний с шириной меньше 10 мм, минимальные величины, указанные в EN ISO 3183:2012, должны быть уменьшены прямо пропорционально площади поперечного сечения образца для испытаний.

## Додаток С

**Лист представництва Bureau Veritas щодо виробництва прокату способом  
ТМСП на стані 3600 «МК «АЗОВСТАЛЬ»**



**MARIUPOL BRANCH OF BUREAU VERITAS  
FOR BLACK SEA DISTRICT**  
MARINE DIVISION  
Our ref. № 020-11 BV/MRP  
Date : 08 November, 2011

**КОМУ: ПАО «МК «Азовсталь»**  
Директору по технологии и качеству  
Г-ну Левченко В.И.

На Вау 281-050 от 31.10.2011 г.

**Уважаемый Валерий Иванович!**

Bureau Veritas (BV), являясь Морским классификационным обществом, заинтересовано в освоении изготовителями судостали новых ресурсосберегающих технологий, и в частности, термомеханической прокатки (ТМ) в условиях листопркатного цеха 3600.

При этом мы хотим представить ряд соображений по разработке программы действий в указанном направлении, с целью обеспечения стабильно хорошего качества выпускаемой Вами продукции:

1. В правилах Международной ассоциации классификационных обществ (IACS, W11, item 3) и BV указано, что:

*«Термомеханическая прокатка, ТМ (термомеханический контролируемый процесс, ТМСП): это процедура, которая включает в себя строгий контроль как температуры стали, так и изменение размеров. В основном большая часть обжатия при прокатке осуществляется вблизи (выше)  $A_{r3}$  и может включать в себя прокатку в двухфазном температурном интервале».*

*«При применении ТМ с АсС или без, необходимо во время одобрения процесса предъявлять обществу запрограммированные режимы прокатки, которые должны предоставляться по требованию сюрвейера. Изготовитель должен строго контролировать выполнение запрограммированных режимов прокатки во время операции прокатки. Для этого фактические регистрационные записи прокатки должны контролироваться изготовителем и периодически Сюрвейером».*

*«В отличие от контролируемой прокатки CR (нормализующей прокатки NR) свойств достигаемые ТМ (ТМСП) не могут быть воспроизведены последующей нормализацией или другой термической обработкой».*

2. При выполнении опытных работ по освоению ТМ на ПАО «МК «Азовсталь» работниками ОТК, находящимися на постах управления клетями, осуществлялась визуальная регистрация показаний температуры и стрелочной индикации раствора валков, что заносилось в журнал. При этом своевременно отреагировать и откорректировать действия оператора невозможно.

В принятой международной практике под контролем запрограммированных режимов прокатки понимают использование приборов и автоматических устройств, исключающих отклонение параметров от заданного диапазона значений.

Обычно регулируемые параметрами ТМ являются температура и толщина в начале и в конце проходов, интервал между проходами, коэффициент обжатия (IACS, W11, A.2, 2.2.1, i).

Низкотемпературная ТМ (ТМСП) в двухфазном ( $\alpha+\gamma$ ) интервале температур существенно повышает риск снижения пластических свойств, возникновения микротрещин и расслоений. Поэтому при этом предъявляются повышенные требования к обеспечению при прокатке заданных параметров.

В настоящий момент на ПАО «МК «Азовсталь» нет необходимых технических средств для надежного обеспечения повторяемости технологических параметров, которые рассматриваются как существенное требование (для регистрации фактических значений толщины, расчета и регулирования требуемых усилий, обжатий, интервалов).



3. В общем объеме производства судостали (по правилам BV) в 2011г. на ПАО «МК «Азовсталь» изготовление марки EN36, занимает менее 1 %. Существенно более широко востребованы марки стали той же прочностной категории AH32, AH36 и DH32, DH36, для которых в диапазоне толщин  $>12,5 \text{ mm} \leq 100 \text{ mm}$  допускается поставка в состоянии нормализующей прокатки NR (контролируемой прокатки CR). Это позволяет обеспечить требуемые свойства при прокатке в высокотемпературной области (выше  $A_{r3}$ ).

Ценным при этом является:

- уменьшение загрузок на оборудования чистовой клетки и повышение производительности;
- исключение анизотропии свойств и риска снижения пластических свойств;
- возможность воспроизвести (улучшить) свойства последующей нормализацией.

В соответствии с вышеизложенным, предлагаем:

- разработать программу внедрения нормализующей прокатки для сталей AH32, AH36 и DH32, DH36 в соответствии с требованиями (*IACS, W11, A.2*);
- определить возможность и необходимость технического перевооружения стана 3600 для внедрения при производстве судостали способа *TM (TMCP)*.

Руководитель Морского департамента  
Мариупольского офиса  
ЦНИИ ООО «Бюро Веритас Украина»



Ю.С. Горелый

## Додаток Т

## Технологія виробництва прокату зі сталі марки ЕН36 на «МК «АЗОВСТАЛЬ»

ПАО «МК «Азовсталь»

УТВЕРЖДАЮ  
Директор по технологиям  
и качеству

В.И. Левченко

2011 г.

**ТРЕБОВАНИЯ К ПРОИЗВОДСТВУ ПРОДУКЦИИ**  
Производство листового проката размерами 25x2150мм  
из стали марки ЕН36 по режимам термомеханической прокатки  
по заказ-наряду № 401511-0038

ТПП 232 - 30 - 2011

Основание: решение кроссфункциональной группы по плоскому продукту, п.10 от 30.05.2011г.

Срок действия с 01.07.2011  
до 01.08.2011

## ТОЛСТОЛИСТОВОЙ ЦЕХ

1 Для проведения опытной прокатки использовать 2 сляба плавки № 2104917 находящихся на складе ТЛЦ.

2 Нагрев выполнять по табл. 3 ТИ 232-95-2010 по низкотемпературному режиму.

3 Производство листового проката из стали марки ЕН36 осуществлять в соответствии с ТИ232-93-2007 со следующими дополнениями:

3.1 Прокатку в черновой клети осуществлять без ограничения температуры, со степенью деформации по пропускам, за исключением пропусков при разбивке, не менее 15%.

Рекомендуемый режим деформации в черновой клети приведен в **приложении А**.

3.2 Прокатку в чистовой клети осуществлять по термомеханическим режимам с ограничением температуры начала прокатки в пределах 750-770 °С и конца прокатки в пределах 740-720 °С.

Рекомендуемый режим деформации в чистовой клети приведен в **приложении Б**.

4 После прокатки производить замедленное охлаждение в штабеле (ПФО) в соответствии с требованиями ТИ 232-97-2008.

5 Отбор проб осуществлять в соответствии с Правилами ВV. Предусмотреть дополнительный припуск для отбора проб и проведения испытаний в соответствии с **приложением В**.

Результаты основных и дополнительных испытаний являются факультативными.

6 В процессе производства проката допускается производить корректировку технологии по согласованию с работниками ИТЦ.

## ЦМИ

1 Выполнить необходимый объем испытаний в соответствии с требованиями Правил ВV и **приложением В**.

Зам. директора-  
начальник технического управления

А.А. Ситало  
01.07. 2011 г.

Начальник прокатной лаборатории

В.В. Володарский  
30.06. 2011 г.

ТПП 232 - 89 - 2011

## Приложение А

Рекомендуемый режим деформации листового проката размера 25x2150 мм стали марки ЕН36 в черновой клети стана 3600

Параметры	Значение параметров по пропускам					
	1	2	3	4	5	6
Толщина раската перед пропуском, мм	220,74	192	165	146	120	92
Толщина раската после пропуска мм	192	165	146	120	92	75
Абсолютное обжатие, мм	28,74	27	19	26	28	17
Степень деформации, %	13	14	12	18	23	18
Ширина проката, мм	1974,7	1974,7	1974,7	2331	2331	2331
Длина раската, м	1,74	2,03	2,29	2,36	3,08	3,78
Температура перед пропуском, °С	1150	1146	1141	1135	1129	1123
Паузы между пропусками, с	3	3	3	3	3	3
Скорость прокатки, м/с	2,30	2,30	2,30	2,30	2,30	2,30
Сила прокатки, т	2005,82	2022,78	1654,20	2609,48	2989,01	2285,70

## Приложение Б

Рекомендуемый режим деформации листового проката размера 25x2150 мм стали марки ЕН36 в чистовой клети стана 3600

Параметры	Значения параметров по пропускам										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Толщина раската перед пропуском, мм	75	71	65	59,5	54	49	44	39,5	35	31	27,5
Толщина раската после пропуска, мм	71	65	59,5	54	49	44	39,5	35	31	27,5	25
Абсолютное обжатие, мм	4	6	5,5	5,5	5	5	4,5	4,5	4	3,5	2,5
Степень деформации, %	5	8	8	9	9	10	10	11	11	11	9
Ширина проката, мм	2331	0	2331	2331	2331	2331	2331	2331	2331	2331	2331
Длина раската, м	3,99	4,36	4,76	5,25	5,79	6,44	7,18	8,10	9,15	10,31	11,34
Температура перед пропуском, °С	760	756	754	752	750	747	744	741	737	736	734
Паузы между пропусками, с	5	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
Скорость прокатки, м/с	3,67	3,67	3,67	3,67	3,67	3,67	3,67	3,67	3,67	3,67	3,67
Сила прокатки, т	2427,11	3419,17	3322,86	3452,60	3345,33	3501,95	3393,86	3570,23	3458,94	3274,62	2654,09

ТПП 232-59 - 2011

## Приложение В

## Перечень дополнительных испытаний

Вид испытаний	Местоположение пробы и направление образца для испытаний	Примечание
Испытание на растяжение	Голова и дно - поперек	В протоколе испытаний должны быть указаны предел текучести, временное сопротивление, относительное удлинение
Испытание на растяжение (со снятием напряжений)	Голова и дно - поперек	Снятие напряжений при 600°C (2мин/мм) мин. 1 час.
		Температура испытания (°C)
Испытания на ударный изгиб на не состаренных образцах <sup>1</sup>	Голова и дно - вдоль	0 -20 -40 -60
	Голова - поперек	- -20 -40 -60
Испытания на ударный изгиб на образцах с деформационным старением <sup>2</sup>	Голова вдоль	- -20 -40 -60
Химический состав	Голова	Полный химический анализ, включая микролегирующие элементы
Серные отпечатки	Голова	- - - -
Исследование микроструктуры	Голова	- - - -
Определение размера зерна	Голова	- - - -
Испытание падающим грузом	Голова	- - - -
Испытания на растяжение в направлении толщины	Голова - дно	- - - -

<sup>1</sup> Для каждого испытания на ударный изгиб необходим один комплект из 3 образцов для испытаний с V образным разрезом

<sup>2</sup> Деформация 5% + 1 час при 250°C.

Додаток У  
Керування показниками якості прокату, методологія освоєння  
нового сортаменту

Додаток У.1  
Методологія керування якістю

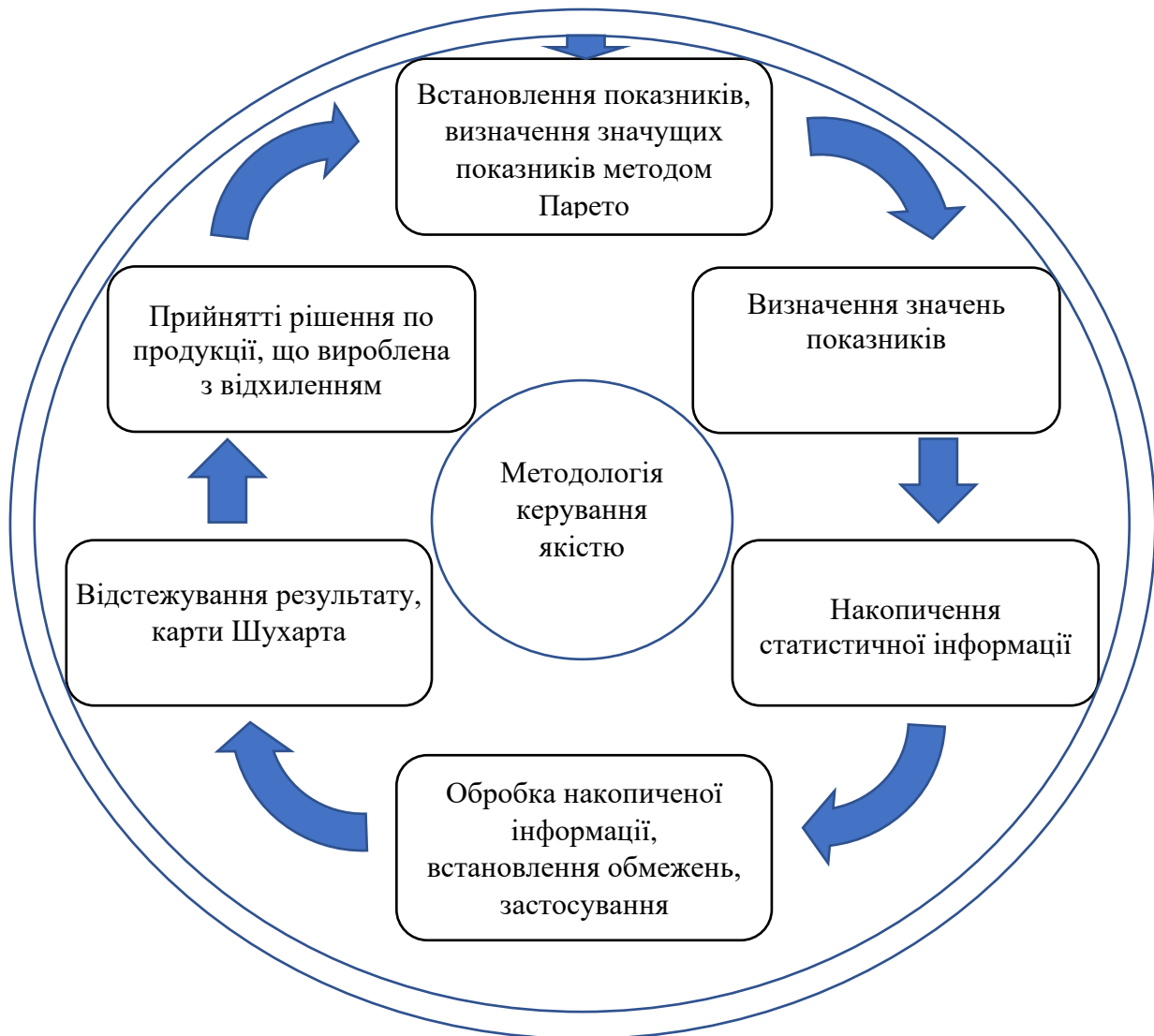
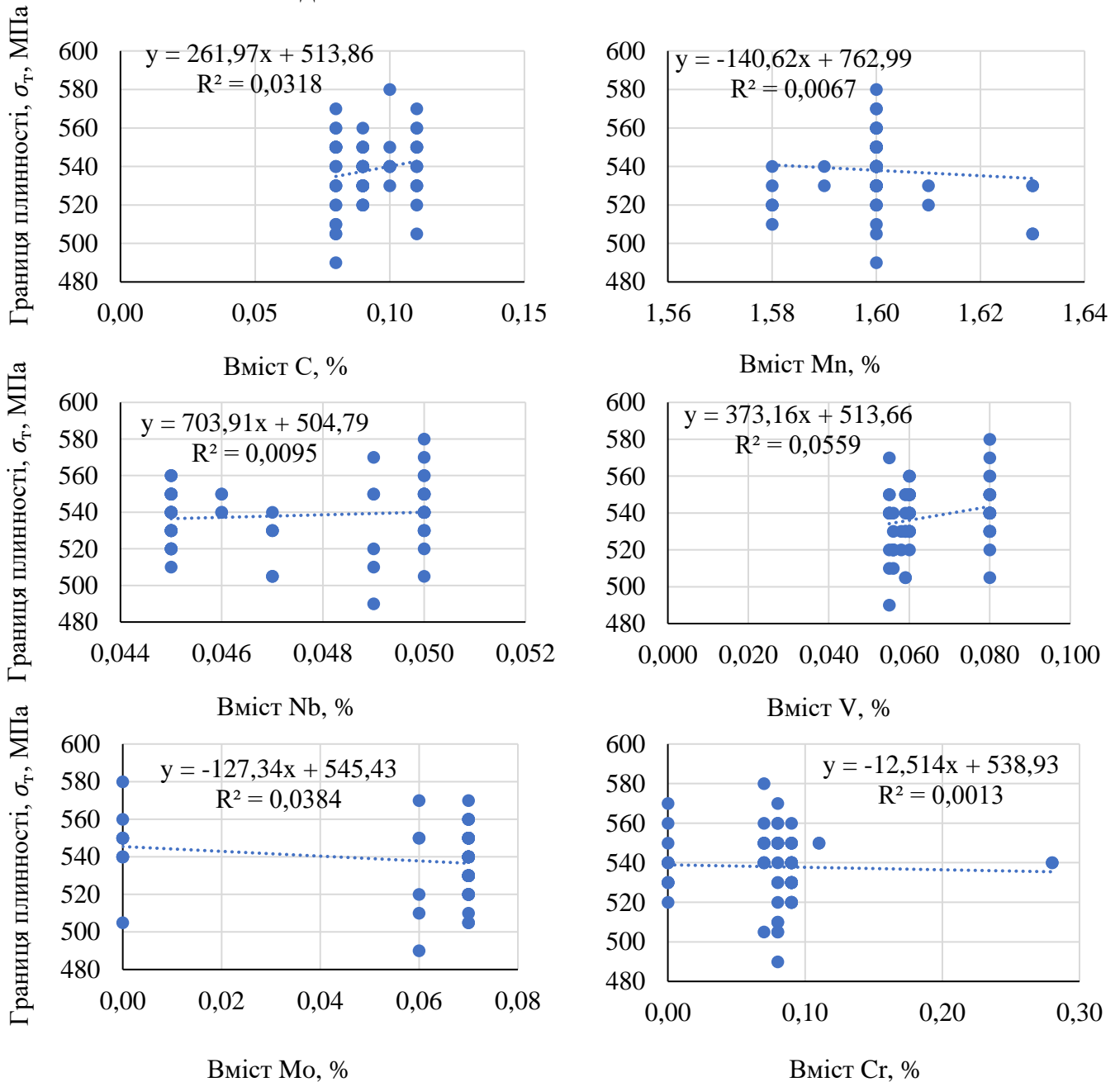
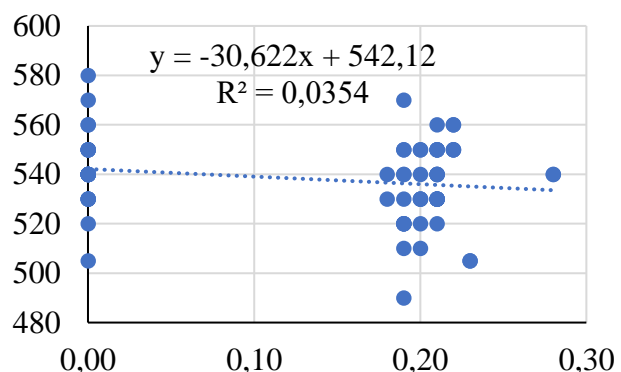
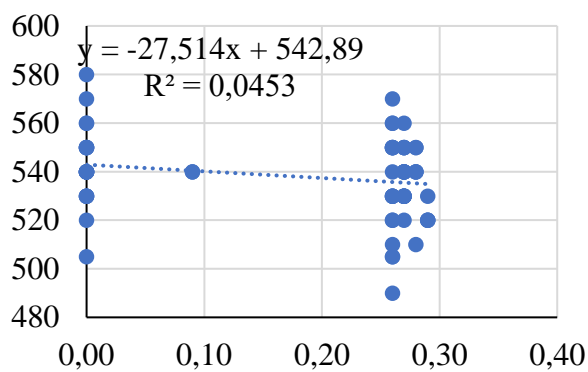
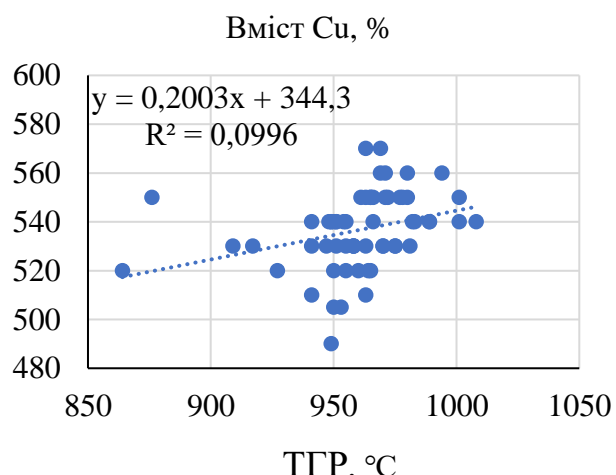
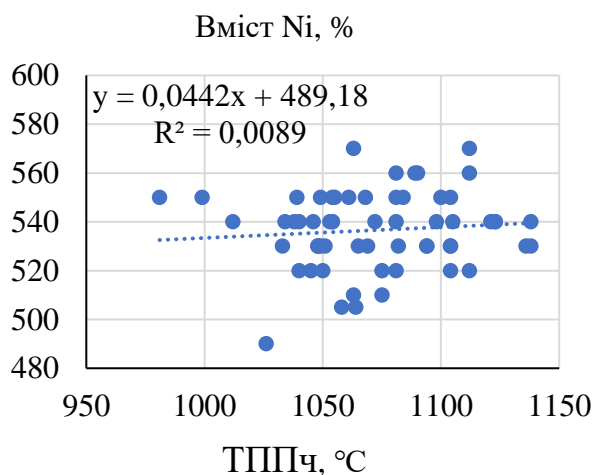
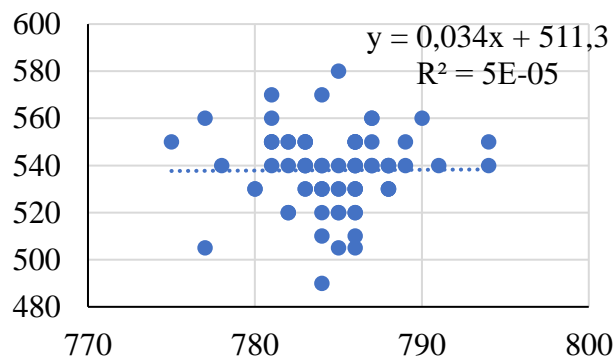
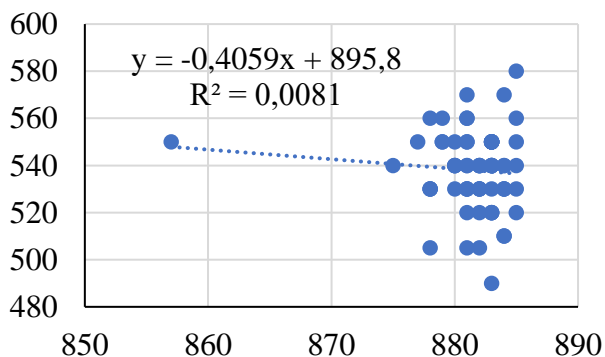
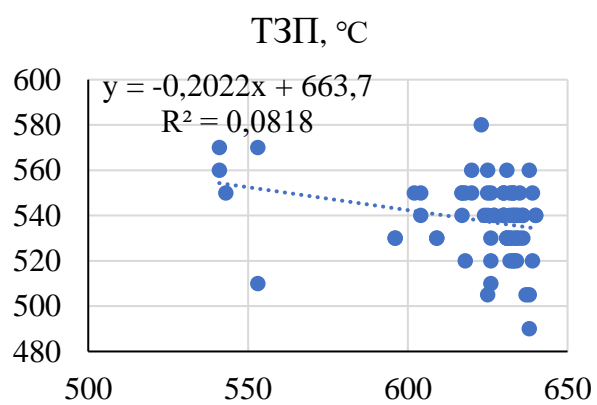
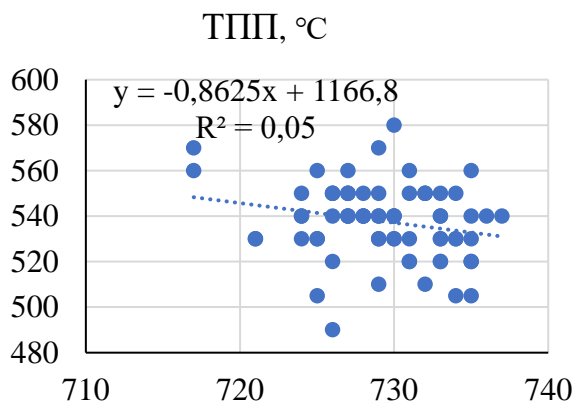


Рис. У.1. Відображення методології керування якістю в циклі PDCA

## Додаток У.2

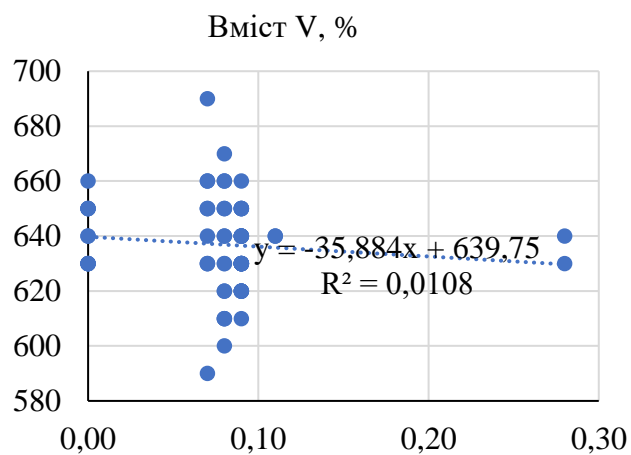
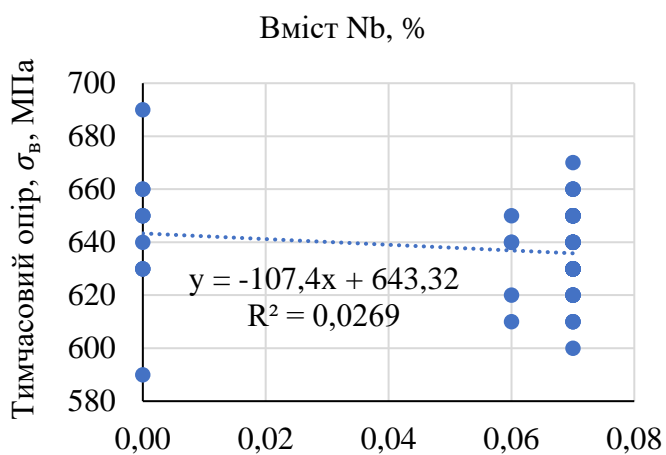
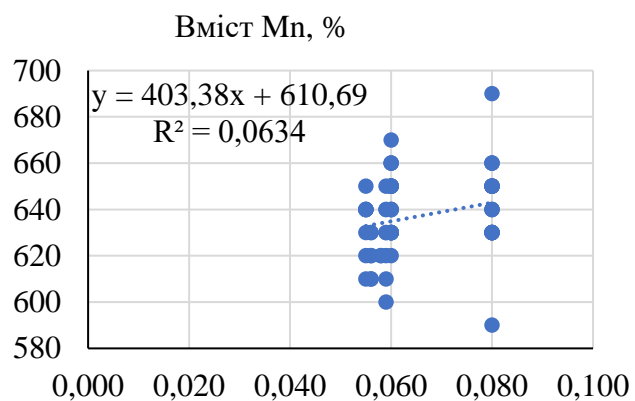
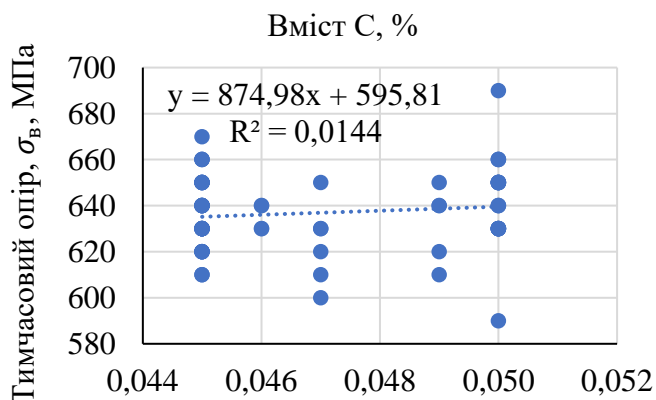
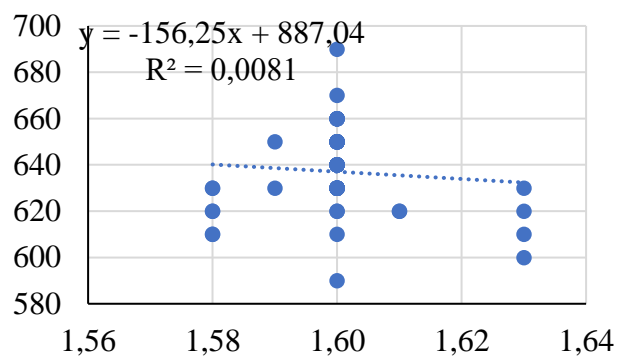
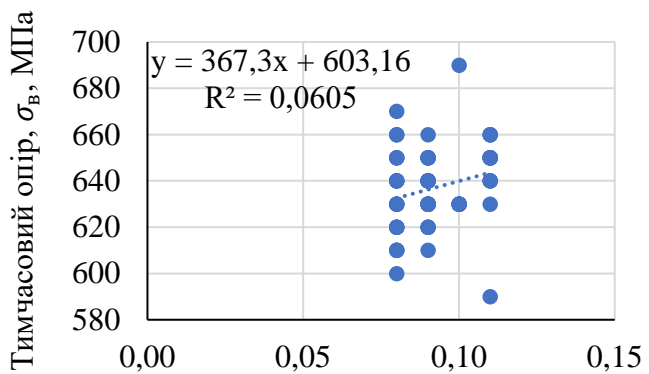
**Залежності між показниками та параметрами якості, що досліджуються при виробництві товстолистого прокату сталі марки К60, товщиною 14 мм, який вироблявся по режимах термомеханічної прокатки з прискореним охолодженням на стані 3600 «МК «АЗОВСТАЛЬ»**



Границя плинності,  $\sigma_T$ , МПаГраниця плинності,  $\sigma_T$ , МПаГраниця плинності,  $\sigma_T$ , МПаГраниця плинності,  $\sigma_T$ , МПа

TПІО, °C

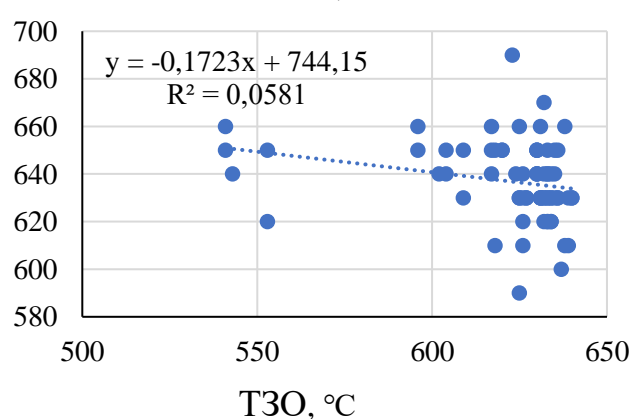
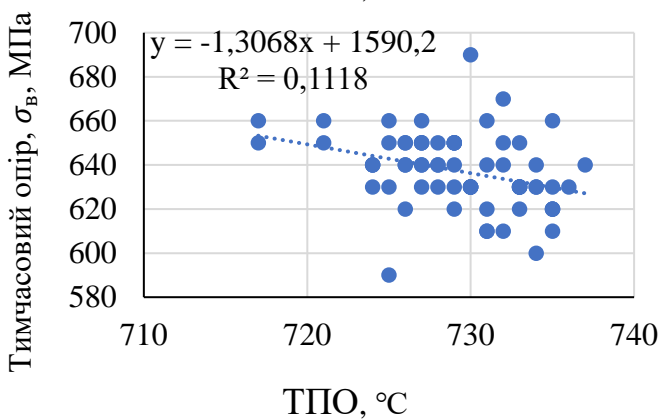
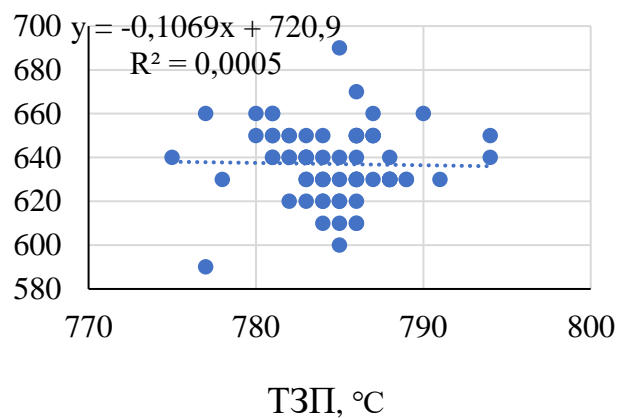
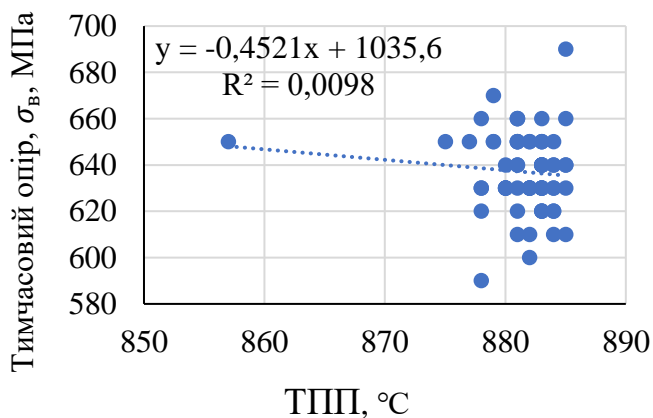
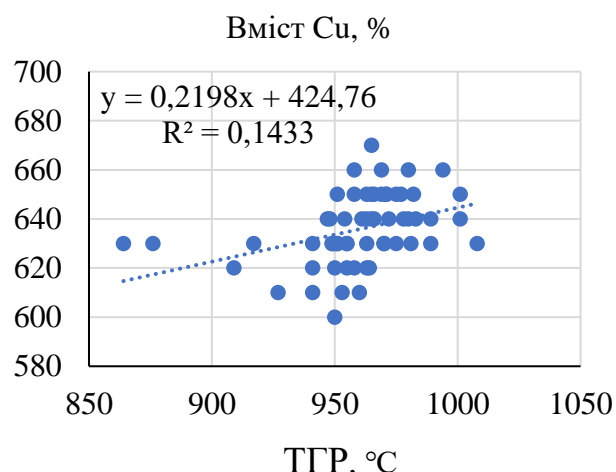
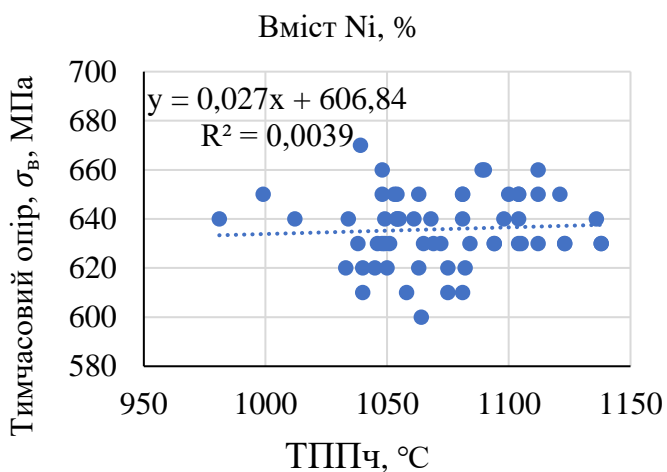
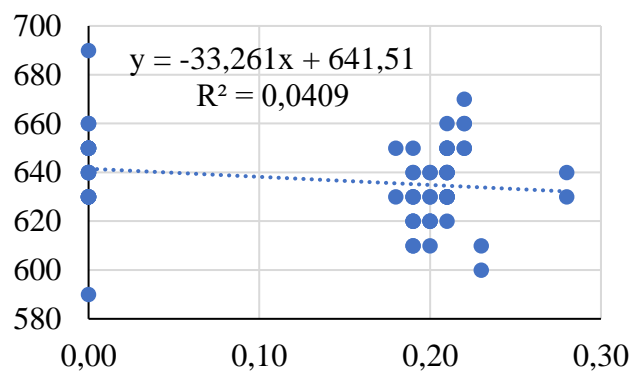
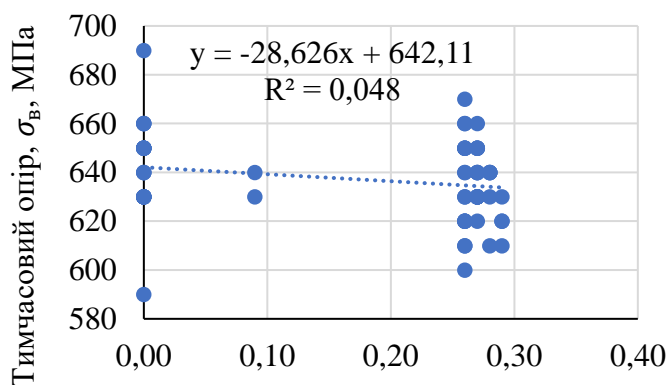
TЗПО, °C

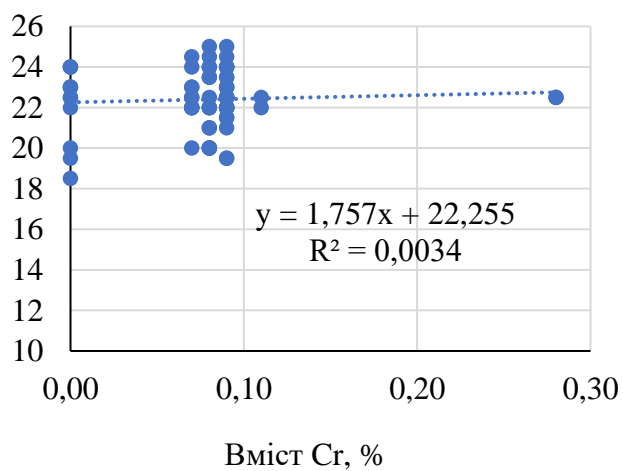
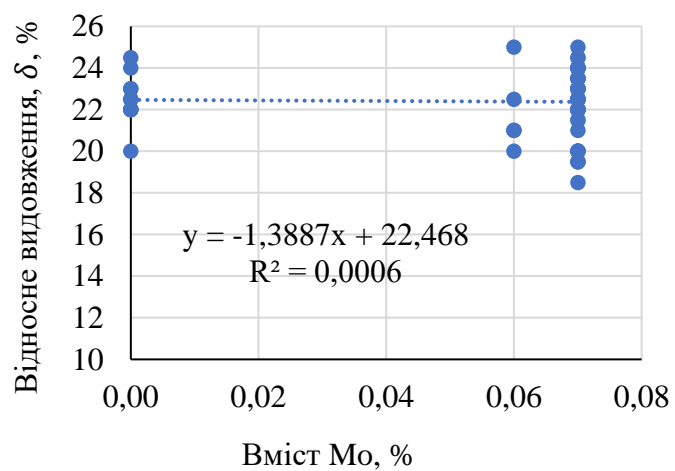
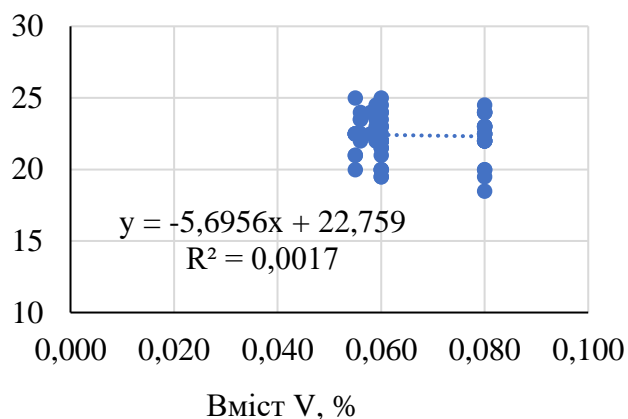
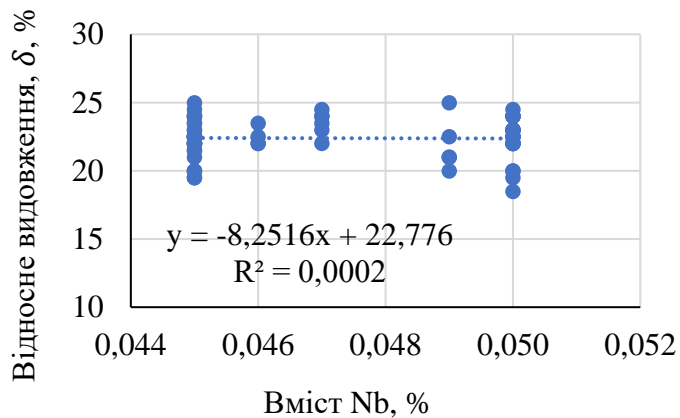
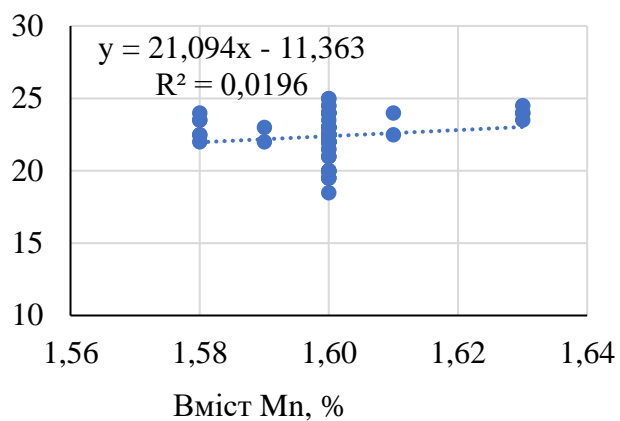
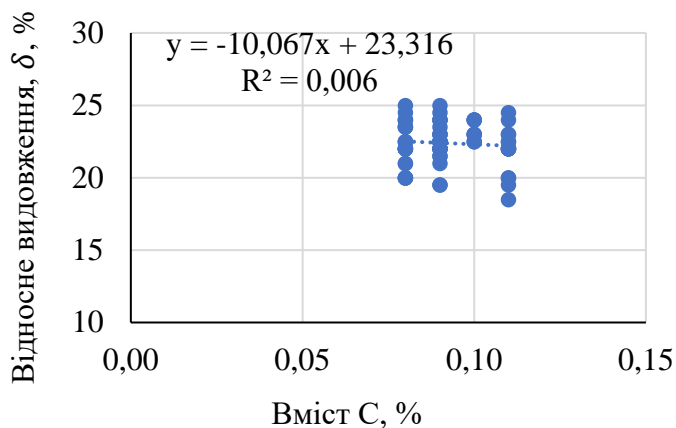


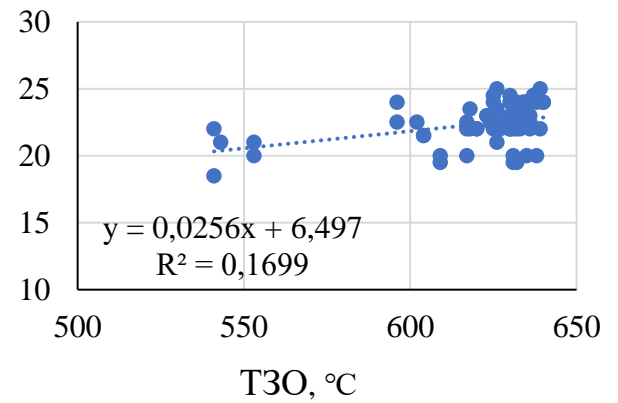
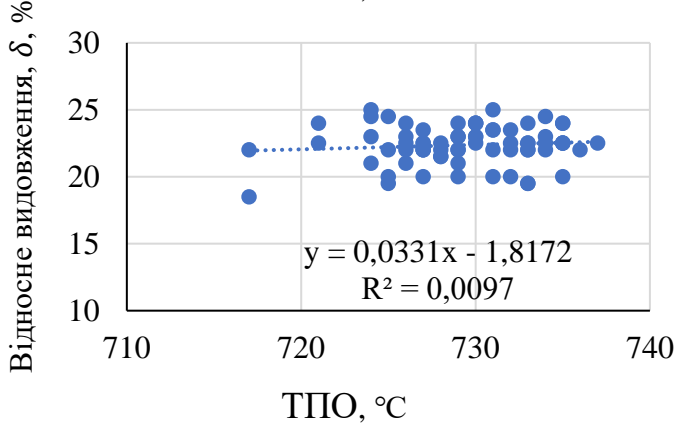
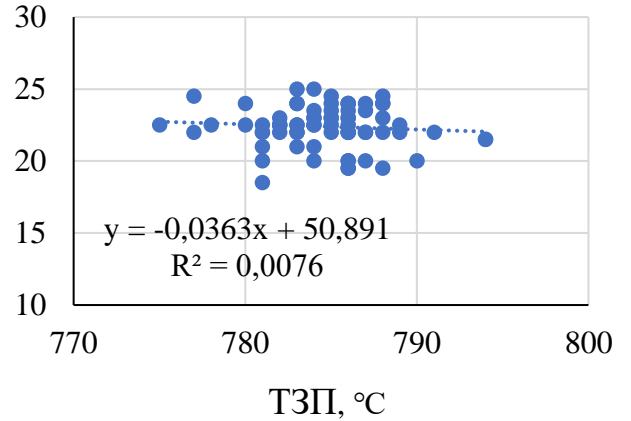
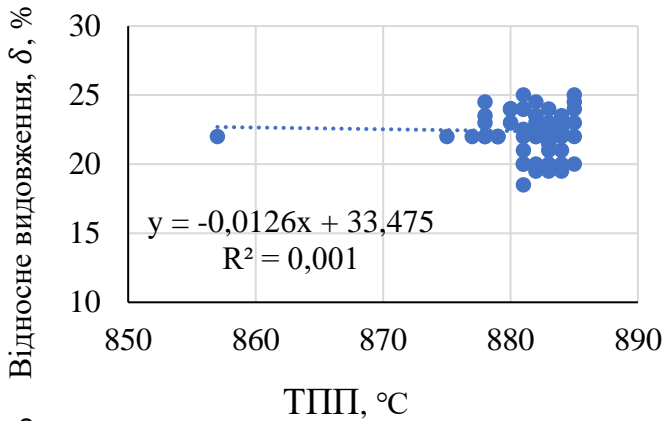
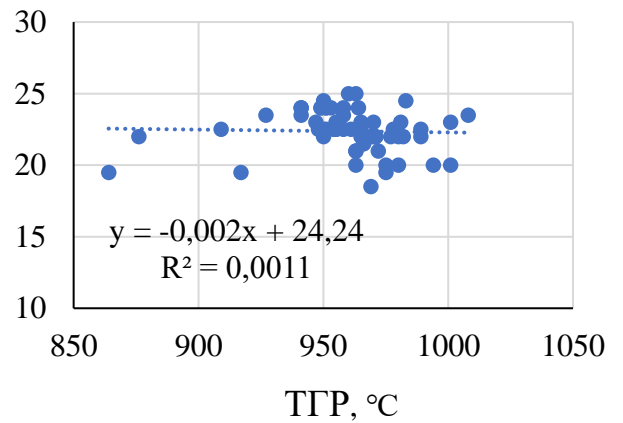
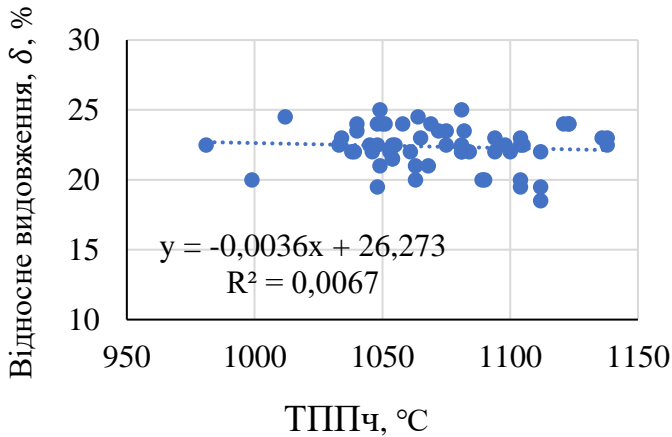
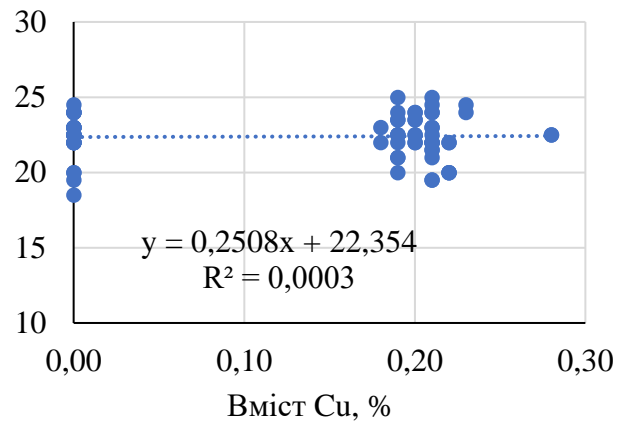
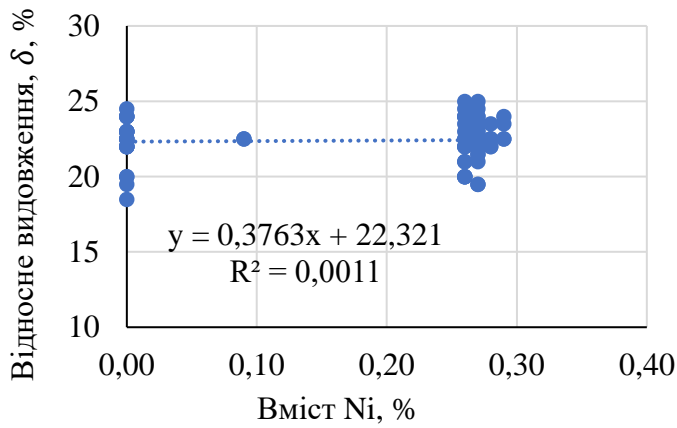
Вміст Mo, %

Вміст Cr, %









## Додаток Ф

### Методологія побудови технологічної стратегії

Побудова технологічної стратегії складається з наступних кроків:

1. Виконання ринкового аналізу, аналізу вимог Замовників, визначення цільового сортаменту, рівня якості, виробництво якого є метою компанії, ринків збуту, об'ємів. В цьому розділі стратегії по кожному виду продукції та/або групі сортаменту, який є цікавим для компанії, виконується оцінка ринків на яких присутні дані продукти, змінення тенденція до споживання, об'єми споживання, вимоги до якості, а також тенденції щодо використання нових продуктів та інші.

2. Оцінка поточного сортаменту, вимог, об'ємів виробництва. В цьому розділі виконується аналіз та робиться оцінка сортаменту, що виробляється, рівня якості який досягнуто, можливостей по об'ємах виробництва, порівняння з цільовим сортаментом по кожному об'єкту виробництва, цеху або типу продукції.

Наприклад, перелік сортаменту, що виробляється на стані 1700 обмежений маркою сталі S355JO згідно з вимогами EN 10025-2, та розмірами прокату від 2,5 мм до 9,0 мм, згідно з EN 10051. В цільовому сортаменті прокат зі сталі марки S355JO згідно з вимогами EN 10025-2 необхідно виробляти в розмірах від 1,5 мм до 12,0 мм та з допусками по розмірах  $\frac{1}{2}$  від вимог EN 10051. Також, стан 1700 повинен мати можливість виробляти прокат категорії міцності до S700MC, згідно з EN 10149-2. Порівняння існуючого та цільового сортаменту може бути наведено в будь-якому зручному для користування вигляді.

3. Оцінка поточних технічних можливостей існуючого устаткування, опрацювання пропозиції щодо проведення реконструкцій для виробництва цільового сортаменту та виконання необхідних об'ємів. Цей розділ тісно пов'язаний із системою якості, є найбільш трудомісткий та тим, що потребує великої кількості технологічних розрахунків, обробки статистичних даних по показниках якості, та проведення досліджень технологічних процесів.

Якісно підготувати цей розділ в межах компанії можливо тільки при наявності сформованої «Бази знань», або «Знань організації», відповідно до вимог п. 7.1.6 ISO 9001 [259].

Слід зазначити, що «База знань» це є досвід компанії, який отримано по різних напрямках її діяльності.

В даному розділі в якості частини загальної «Бази знань» розглядається актуальна інформація по продукції, що виробляється, рівень її якості, результати технічних та технологічних експериментів, які підтверджують подальше розширення можливостей устаткування та технології, або навпаки, неможливість їх розширення, бенчмаркінг сортаменту, стану та характеристик устаткування з аналогічними підприємствами з порівняльним аналізом та інші. «База знань» може бути сформованою у будь-якій зручній формі та повинна бути доступною для аналізу та прийняття відповідних керуючих рішень.

3.1 Статистична обробка показників якості продукції, що виробляється зараз. Порівняння оброблених даних з вимогами цільового сортаменту. Порівняння здійснюється між однаковим сортаментом, або аналогами.

Виконання цього аналізу дозволяє оцінити межі показників якості, які були отримані на існуючому устаткуванні, оцінити стабільність результатів, зробити висновки по можливостях отримання кращих результатів та рівню відповідності їх вимогам цільового сортаменту. Наприклад, при виробництві штаб зі сталі марки S355JO товщиною 3 мм отримані дані по границі плинності 380-440 МПа (згідно з EN 10025-2, границя плинності повинна бути  $\geq 355$  МПа). Такі результати дозволяють розглядати можливість виробництва прокату більш міцних категорій. Інший приклад, при виробництві того ж самого прокату зі сталі марки S355JO отримано толеранс по товщині в межах  $\pm 0,12$  мм (згідно з EN 10051 толеранс повинен бути не більший ніж  $\pm 0,23$  мм). На підставі такого результату можна зробити висновок про можливість отримання  $\frac{1}{2}$  від вимог до толерансу по товщині.

Таким чином можливо частково забезпечити вимоги цільового сортаменту та зменшити реконструктивні навантаження на Технологічну стратегію.

Також на підставі статистичних даних, або з використанням додаткових досліджень визначаються обмеження існуючого устаткування. Наприклад, при дослідному виробництві термомеханічного прокату в товщинах від 2,5 до 8,0 мм на стані 1700, по результатах металографічних досліджень встановлено, що при виробництві товщин 8,0 мм спостерігається нерівномірність прискореного охолодження, що є наслідком відсутності на існуючій установці колекторів нижнього охолодження. На підставі такого висновку може бути рішення по включенню в проект реконструкції установки прискореного охолодження, або модернізація існуючої з додаванням нижнього охолодження.

3.2 Формування вимог до технології та/або устаткування щодо забезпечення цільового сортаменту. По результатах порівняння показників якості продукції, що виробляється з цільовим сортаментом, визначається перелік технологічних змінень та/або додаткових технічних параметрів устаткування, необхідних для забезпечення показників якості цільового сортаменту. Як приклад, технологічними зміненнями можуть бути використання додаткових мікролегуючих елементів (Мо, В, Сг та інші), змінення технологічних потоків (попереднє редукування слябів), додаткова проміжна термообробка та інші. Як приклад, технічними параметрами можуть бути сила прокати для забезпечення обтиснення не менш ніж 20 %, забезпечення швидкості охолодження установки УКО не менш ніж 20 °С/с, забезпечення перепаду температури по довжині штаби перед прискореним охолодженням не більше ніж 20 °С, та інші.

3.3 Порівняльна оцінка та підготовка варіантів забезпечення технологією та/або існуючим устаткуванням вимог цільового сортаменту. Опис пропозицій щодо проведення реконструкцій устаткування для виробництва цільового сортаменту та об'ємів.

На підставі отриманих даних формується висновок про можливість виробництва частини цільового сортаменту, попередній перелік устаткування яке потрібно реконструювати із зазначенням основних його характеристик. Наприклад, для виробництва на стані 1700 штаб зі сталі марок до S700MC необхідна модернізація, або реконструкція існуючої установки для охолодження прокату перед змотуванням із забезпеченням швидкості охолодження не менше ніж 25 °C/с. Для виробництва прокату товщиною до 12 мм необхідна заміна існуючих моталок.

Для підготовки кроків 3.2 та 3.3 може бути використано математичні або аналітичні моделі технологічних процесів, якщо такі є адаптованими для відповідних умов виробництва.

4. Розрахунок реконструкційних заходів. Цей розділ готується у випадку, якщо для виробництва цільового сортаменту, покращення якості або підвищення об'ємів виробництва необхідно провести реконструкцію. Підставою для підготовки цього розділу є дані, які підготовлено по кроках 1-3 Технологічної стратегії.

4.1 Підготовка технічних завдань та отримання техніко-комерційних пропозиції від потенціальних виконавців реконструкційних заходів;

4.2 Розрахунок основних показників об'єктів які планується реконструювати, оцінка ефективності проекту, встановлення строків;

4.3 Розрахунок строкових об'ємів інвестицій;

5. Підготовка строкових технічних даних по показниках виробництва, питомим витратам сировини, ресурсів, металу, забезпеченням виробництва ресурсами, сировиною з урахуванням реконструкційних заходів.

6. Оцінка строкового змінення фінансових показників компанії на підставі розрахованих технічних даних та інвестиційних даних.

Кроки 5, 6 є результуючими при підготовці Технологічної стратегії.

Вихідні розрахунки повинні робитися з максимальною деталізацією, тобто враховувати змінення кожної позиції сортаменту на кінцевий результат.

Слід зазначити, що проведення реконструкцій не є обов'язковим та основним етапом при підготовці технологічної стратегії.

При підготовці документу може бути враховані пропозиції щодо можливостей кооперації всередині компанії для досягнення загальної мети. Наприклад, використання в якості заготовки продукції яка вироблена на іншому підприємстві компанії, або додаткова обробка поверхні прокату в умовах іншого виробництва та інші.

Підготовка остаточного документу може проводитись у декілька ітерацій з перерахуванням та уточненням показників та строків.

При підготовці Технологічної стратегії по компанії в цілому, документ повинен охоплювати всі етапи основного виробництва (при необхідності можуть додаватися розрахунки по допоміжних виробництвах, якщо вони впливають на основні процеси). Технологічна стратегія також може готуватися по окремих виробництвах.

В технологічну стратегію входять тільки результати розрахунків по крокам 1-6. Самі розрахунки можуть бути у додатках.

Технологічна стратегія також є елементом системи якості, яка дозволяє безперервно аналізувати та вдосконалювати виробництво загалом, а також керувати ризиками. Як і всі документи Системи якості, Технологічна стратегія підпорядкована циклу PDCA, рис. Ф.1.



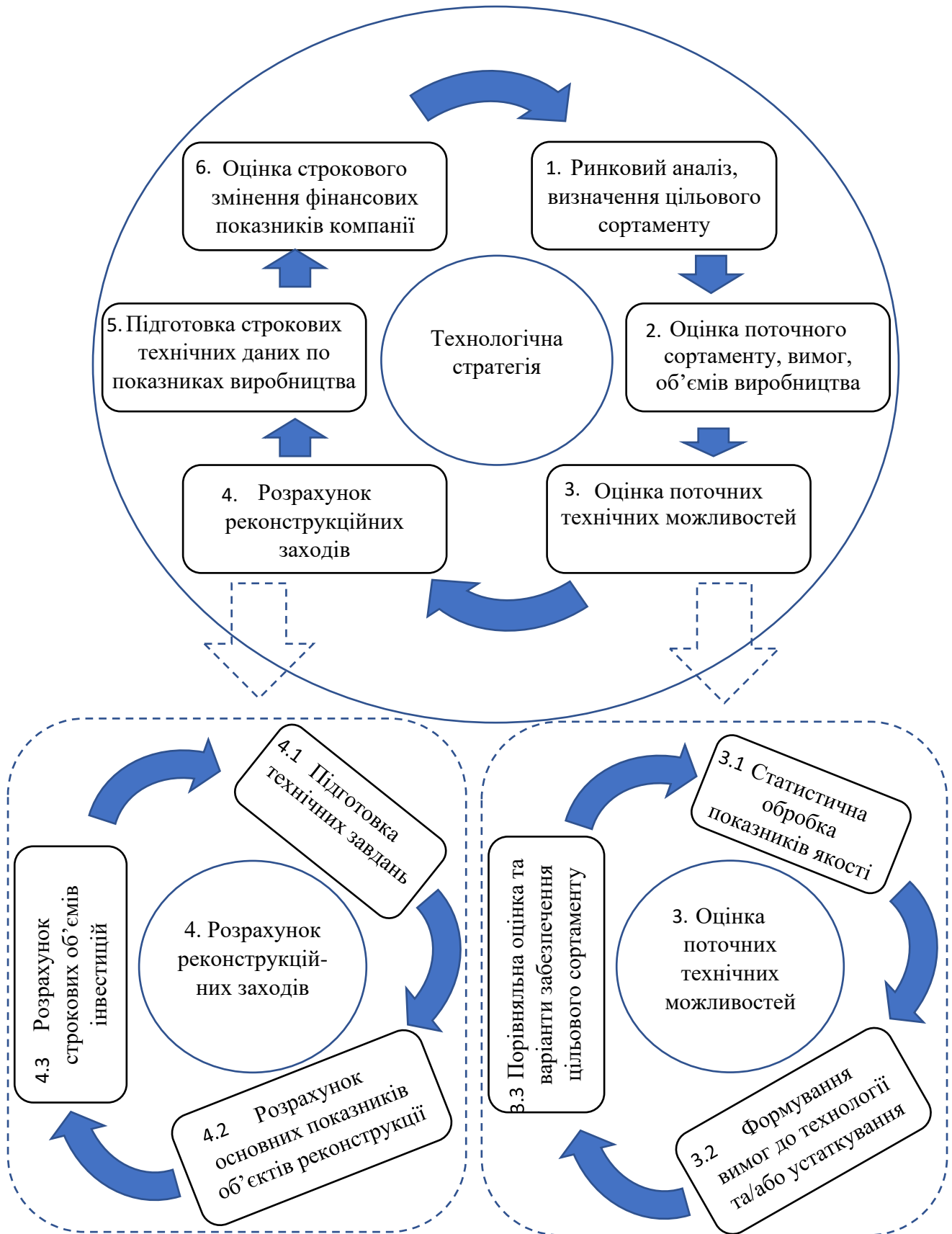
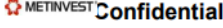



Рис. Ф.1. Кроки побудови Технологічної стратегії зображені в циклі PDCA

Додаток X

Принциповий дизайн проекту модернізації стану 1700 «ММК ІМЕНІ ІЛІЧА», погоджений з «Primetals»



PJSC "Ilyich Iron Steel Works of Mariupol"  
Modernization roughing mill HSM 1700





Primetals Technologies Austria GmbH  
Hot Strip Mill  
CE EN ESP

---

Basic Engineering

**Ilyich 1,700-mm Hot Strip Mill**  
Layout and Equipment Data after Upgrade





Product Properties Характеристики продукта	Slab/Сляб	Strip/ Полоса	Coil Data (max.) Данные рулона (макс.)	
Thickness / Толщина	170 - 250 mm / мм	1.2 - 8 mm / мм	Weight / Вес	27 t / т
Width / Ширина	900 - 1600 mm / мм	900 - 1600 mm / мм	Spec. Weight / Удел. Вес	18 kg/mm <sup>2</sup> / кг/мм
Length / Production Длина / Объем выпуска	5.04 - 10.5 m / м	2.5 Мпу / млн тонн/год	Outside Ø Наруж.диам.	1900 mm / мм

Steel Grades/ Марки стали	
Low Carbon, Structural, HSLA Cold Rolling Grades Низкоуглеродистые, конструкционные, ВПНП марки для ХП	

Roughing Mill/Черновой стан					
Roll Dimensions [mm] / Размеры валков [мм]	Mill Stand Force [kN] / Усилие в прокатной клетке [кН]	Motor Power [kW] / Мощность двигателя [кВт]	Motor Speed [rpm] / Скорость двигателя [об/мин]	Gear Ratio / Передаточное число	Speed [m/s] / Скорость [м/с]
R1 WR Ø 1020 / 900 x 1750 BUR Ø 1450 / 1250 x 1700	25000	4000	600	23.92 : 1	1.18
E2 ER Ø 1100 / 1000	5000	2 x 1000	0 - 400 / 1400	12.2 : 1	8.01
R2 WR Ø 1160 / 1040 x 1750 BUR Ø 1476 / 1326 x 1760	42000	2 x 7000	0 - 55 / 110	1 : 1	5.99

Reheating Furnaces/Нагревательные печи	
Capacity (max. slab length) [ph] Производительность (макс. длина слэба) [т/ч]	1 x 350

Finishing Mill/Чистовой стан					
Roll Dimensions [mm] / Размеры валков [мм]	Mill Stand Force [kN] / Усилие в прокатной клетке [кН]	Motor Power [kW] / Мощность двигателя [кВт]	Motor Speed [rpm] / Скорость двигателя [об/мин]	Gear Ratio / Передаточное число	Speed [m/s] / Скорость [м/с]
F5 Ø 675 / 615 x 1800	33000	7100	0 - 200 / 400	4.5 : 1	2.86
F6 Ø 675 / 615 x 1800	33000	7100	0 - 160 / 400	3.125 : 1	4.12
F7 Ø 675 / 615 x 1800	33000	7100	0 - 100 / 250	1 : 1	8.05
F8 Ø 705 / 655 x 2000	26400	7100	0 - 100 / 250	1 : 1	8.57
F9 Ø 705 / 655 x 2000	26400	7100	0 - 160 / 400	1 : 1	13.72
F10 Ø 705 / 655 x 2000	26400	7100	0 - 160 / 400	1 : 1	13.72
BUR F5-F7 Ø 1325 / 1225 x 1700	WRS F8-F10	+/-150 mm / мм	WRB F5-F7	0 - 1750 kN / кН	
BUR F8-F10 Ø 1325 / 1225 x 1750			WRB F8-F10	0 - 1750 kN / кН	

Crop Shear / Обрезные ножницы - existing / существующий	
Strip Cooling System / Система ламинарного охлаждения полосы - existing / существующий	
Downcoilers / моталки - existing / существующий	

WR Рабочий валок	BUR Опорный валок	ER Вертикальный валок	WRS Смещение раб.валков
WRB Изгиб раб.валков			

Table 1: Main technical data of the hot strip mill after upgrade

PT No:

Rev: 00 Page: 5/461

File: 1.1\_1.3\_1.5\_1.6\_1.7\_2.2\_6.9\_6.14\_9.1\_9.2\_9.3\_Technology\_rev00\_ru.docx

Printed: 2017-11-13 13:45

The content of this document is the property of Primetals Technologies. It is not to be distributed, copied, or used for any purpose without the prior written consent of Primetals Technologies. The use of this document for any other purpose is strictly prohibited. The information contained herein is confidential and its use is limited to the intended purpose. It is not to be disseminated and shall be protected.

Вся информация, содержащаяся в данном документе, является собственностью компании Приметалс Текнолоджис. Она не должна распространяться, копироваться или использоваться для каких-либо целей без предварительного письменного согласия Приметалс Текнолоджис. Любое использование данного документа для любых других целей строго запрещено. Информация, содержащаяся в данном документе, является конфиденциальной и ее использование ограничено только intended purpose. Она не должна распространяться и должна быть защищена.

## Додаток Ц

## Загальна технологія синхронізації, що запроваджена на «ММК ІМЕНІ ІЛІЧА»

ПАО «МАРИУПОЛЬСКИЙ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИЙ КОМБИНАТ ИМ. ИЛЬИЧА»

51/906  
07-04-2016

ТЗ-ЦММК-33/16-2-Пр1-1ккккк

УТВЕРЖДАЮ:  
Директор по технологиям и качеству  
К.Е. Писмарев  
2016г.

И.о. начальника УП..... Козловцеву С.В.  
Начальнику ЛПЦ-1700..... Норке Н.С.  
Начальнику УпрКК ..... Анисимову Г.В.  
Начальнику участка ОТК ЛПЦ-1700..... Попову А.А.  
Начальнику технического отдела ..... Фентисову И.Н.

**ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ**  
ТЗ - ЦММК - 33 /16-2-Пр 1

На отработку технологии прокатки транзитом редуцированных слябов с клетью № 01 и синхронизации прокатки раската в клетях №01 и №1.

Срок действия с 7.04.2016г по 5.04.2017г.

**Цель ТЗ:** отработка технологии прокатки металла транзитом с использованием клетки №01 и синхронизация клеток №01 и №1 при обратном редуцировании слябов толщиной 250мм с нагревом в модернизированной методической печи.

**Основание ТЗ:** п.1.2 Программы мероприятий по снижению расхода природного газа в нагревательных печах ЛПЦ-1700.

Задействованы: ЛПЦ-1700, участок УКК при ЛПЦ-1700, УА, ЦММК (прокатная лаборатория №1, ЛМТ), ТУ.

И.о. начальника УП..... Козловцев С.В.  
Начальнику ЛПЦ-1700..... Норке Н.С.  
Начальнику участка УКК ЛПЦ-1700..... Попову А.А.

1. Планировать производство проката в ЛПЦ-1700: из непрерывнолитых слябов толщиной 250 мм с разливкой на МНЛЗ №1 и 2, шириной 1310 мм (в перспективе опробовать шириной 1550 мм), длиной 6000-6200 мм в соответствии с текущими заказами для проката транзитом.
2. Марочный и размерный сортамент, производимый транзитом из редуцированных слябов, приведен в таблице №1.

**Обжимное отделение ЛПЦ-1700.**

3. Нагрев непрерывнолитых слябов с размером сечения 250x1310мм в методической печи № 5 осуществлять в соответствии с приложением А.

В процессе выполнения ТЗ режимы нагрева могут корректироваться по согласованию с ЦЛМК.

Таблица №1

	Марки стали	Размеры проката, мм
Транзитный марочный и размерный сортамент для опробования технологии обратного редуцирования	08кп/пс, DC01, DX51D, DD11-14, SAE1008, CS Тип В, Ст1-3 кп/пс, S185-S235JR, S37-2, А36, 10кп/пс, 15кп/пс и их аналоги	3,5-8,0x1270-1320
Перспективный марочный и размерный сортамент после внедрения технологии обратного редуцирования	08кп/пс, DC01, DX51D, DD11-14, SAE1008, CS Тип В, Ст1-3 кп/пс, S185-S235JR, S37-2, А36, 10кп/пс, 15кп/пс и их аналоги	3,0-3,4x1250-1320 5,5-8,0x1450-1520
Не транзитный марочный и размерный сортамент	08кп/пс, DC01, DX51D, DD11-14, SAE1008, CS Тип В, 10кп/пс, 15кп/пс	1,8-1,9 x 1000-1150 2,0-2,2 x 1000-1330 2,3-2,4 x 1000-1380 2,5-2,7 x 1000-1430 2,8-2,9 x 1000-1450 3,0- 3,4x1000-1240 3,0- 3,4x1330-1480 3,5- 8,0x1000-1240 3,5- 5,4x1330-1500 5,4 - 8,0x1330-1450
	Ст1-3 кп/пс, S185-S235JR, S37-2, А36, и их аналоги	2,0-2,2x1000 - 1180 2,3 -2,4x1000 - 1230 2,0- 2,7x1000 - 1330 3,0- 3,4x1000 - 1240 3,5- 8,0x1000 - 1240 3,5- 3,7x1320 - 1430 3,8- 3,9x1320 - 1480 4,0- 5,4x1000 - 1320 4,0- 5,4x1450 - 1520
	S355JR(JO,J2,JOH), S275JR(J2,JO), S355M, S355MC, S44-52, P245NB, P265NB, P355GH, S320GD, S350GD, Ст3Гпс/сп, 09Г2С, 10ХСНД, 10ХНДП, судосталь марка А-В и их аналоги	2,0-2,2 x 1000-1060 2,3-2,4 x 1000-1120 2,5-2,7 x 1000-1160 2,8-2,9 x 1000-1200 3,0-3,4 x 1000-1250 3,5-3,7 x 1000-1310 3,8-3,9 x 1000-1400 4,0-8,0 x 1000-1500
	20-45кп/пс/сп, Ст4-5кп/пс/сп	2,0-2,4 x 1000 2,5-2,8 x 1000-1060 3,0-3,2 x 1000-1200 3,5-3,9 x 1000-1250 4,0-4,5x1000-1430 4,6-8,0x1000-1540

4. Выдачу слябов производить по одному. После выдачи сляба дальнейшая выдача из печи №5 прекращается. Возобновляется выдача из методической печи №5 по команде оператора нагревательных печей тонколистового отделения ЛПЦ-1700.

5. Перед передачей слябов на редуцирование от печи №5 сменный мастер отделения по производству слябов обязан проверить состояние рольгангов, особенно перед и после ножниц. При этом:

- не допускаются свободно вращающиеся (без привода) и заклиненные ролики;
- не допускаются отдельные ролики, образующая которых (по визуальной оценке) выше или ниже установки остальных роликов рольгангов;
- уровень нижнего суппорта ножниц по отношению к рольгангам перед и за ножницами должен составлять -20 - -30 мм., для обеспечения свободного

- прохождения слябов толщиной 250 мм между суппортами ножниц.
6. В случае обнаружения отклонения от указанных требований выдача слябов из печи №5 откладывается до их устранения.
  7. Суппорта ножниц перед передачей сляба к обжимной клети должны быть разведены полностью («0 – положение» эксцентрикового вала ножниц), исключая забур сляба под ножницами.
  8. Редуцирование осуществляется по режимам, приведенным в приложении Б. В случае сброса слябов на склад допускается увеличивать количество проглаживающих проходов в сравнении с указанным количеством по таблицам приложения Б. После второго пропуска осуществить кантовку сляба для удаления печной окалины.
  9. Температура окончания прокатки при передаче раската транзитом должна быть не менее 1100 °С.
  10. С целью увеличения температуры прокатки, а также исключения подстуживания поверхности раскатов, допускается отключение подачи воды системы охлаждения верхнего вала начиная с 3-го прохода до окончания прокатки. После окончания прокатки раската подача воды для охлаждения верхнего вала возобновляется.
  11. Резчик на ПУ-5 передний конец раската обрезает (торцует) до полного удаления искаженной части, задний конец не обрезается. Раскат передается полностью в тонколистовое отделение ЛПЦ-1700 транзитом.

#### Тонколистовое отделение ЛПЦ-1700.

12. Прокатку редуцированных слябов производить транзитом на имеющиеся заказы по ТИ 227-П.ГЛ-21-2014 со следующими корректировками:
  - весь переданный раскат с обжимного отделения одновременно обжимается в клетях №01 и 1;
  - скорость опережения металла после клети №01 должна быть равна скорости отставания металла перед клетью №1, для этого клети черновой группы настраивать в соответствии с приложением В;
  - толщина подката после клети №4а в пределах 30-35 мм;
  - в процессе прокатки в обязательном порядке использовать теплосберегающую установку (ТСУ);
  - порезку на два раската производить на ножницах перед чистовой группой;
  - пауза между прокатом первого и второго раската в чистовой группе должна быть минимальной, в случае длительного ожидания второго раската, он возвращается и находится под ТСУ.

Начальник ЦЛМК

А.Г. Курпе

Начальник технического отдела

И. Н. Фентисов

Согласовано:

Начальник ЛПЦ-1700

Н.С. Норка

Исполнители:

Васильченко С.Е., 3-22-51

Изотов Б.В., 6-45-01

*Васильченко С.Е.*

*И. Н. Фентисов*

*Н.С. Норка*

Приложение А

Режим нагрева слывов толщиной 250 мм в методической печи №5 с назначением слывов после редуцирования на "травзит"

Марка стали	Температура по зонам, °С						Тип посада	Температура посада, °С	Минимальное время нагрева (от начала посада металла до выдачи) в НП №5 при calorificity смешанного газа 1350-1450 ккал/м <sup>3</sup> , час/мин	
	Томильная		1 сварочн за		2 сварочн за					нижнего обло газа
	Зона	металл	Зона	металл	Зона	металл				
<p><b>Низкоуглеродистые всежелезные раскисленные:</b> Ст-1, Ст-2, Ст-3 по ДСТУ 2651-2005 /ГОСТ 380-2005; 08, 10, 15, 20, 08Ю(А), 10Ю(А), 15Ю(А), 20Ю(А) по ГОСТ 1050-88, ГОСТ 4043-71, ГОСТ 9045-93, А36 по ASTM A36; SA E 1006, SA E 1008, SA E 1010 по ASTM A568; S185, S235 по EN 10025-2:2004 и их аналоги по DIN 17100, 0011-14 по EN 10111:2008, DX 510 по EN 10327:2004, EN 10346-2009, DC03 по EN 10130:2006</p>							Холодный посад	0-100 101-200 201-300 301-400 401-500 501-600	3:45 3:40 3:35 3:30 3:20 3:15	

Примечания:

1. В период нагрева, после достижения температуры металла в 1 сварочной зоне значительная выдержка в течение 30 минут при этой температуре. Общедл продолжительность нагрева слывов в 1 сварочной и томильной зонах должна быть не менее 2:15 час/мин.
2. Давление смешанного газа в период нагрева слывов должно быть 16,0-18,0 МПа.

## Приложение Б

Таблица Б.1 - Режимы обжатий непрерывнолитых заготовок размерами 250 x 1550 x 6000...6200 мм на катаные слэбы сечением 145 x 1330-1350 и 140 x 1360-1370мм.

№ прохода	Раствор горизонтальных валков, мм	Обжатие Δh, мм	Настройка вертикальных валков, мм						№ прохода	Раствор горизонтальных валков, мм	Обжатие Δh, мм	Настройка вертикальных валков, мм			
			Значение раствора	Изменение раствора	Значение раствора	Изменение раствора	Значение раствора	Изменение раствора				Значение раствора	Изменение раствора	Значение раствора	Изменение раствора
1	240	14	1540	35	1540	35	1540	35	1	240	14	1530	45	1530	45
2	230	10	1520	20	1520	20	1520	20	2	230	10	1510	20	1510	20
3	220	10	1490	30	1490	30	1490	30	3	210	20	1470	40	1470	40
4	210	10	1470	20	1470	20	1470	20	4	200	10	1450	20	1450	20
5	200	10	1440	30	1440	30	1440	30	5	170	30	1410	40	1420	30
6	190	10	1420	20	1420	20	1420	20	6	160	10	1400	10	1410	10
7	160	30	1390	30	1390	30	1390	30	7	150	10	1375	25	1385	25
8	160	0	1370	20	1380	10	1380	10	8	142	8	1380	-5	1390	-5
9	147	13	1345	25	1355	25	1365	15	9	142	0	1375	5	1385	5
10	147	0	1350	-5	1360	-5	1370	-5	10	142	0	1380	-5	1390	-5
11	147	0	1345	5	1355	5	1365	5							
12	147	0	1350	-5	1360	-5	1370	-5							
Ширина слэбов, мм			1330		1340		1350		Ширина слэбов, мм			1360		1370	

Таблица Б.2 - Режимы обжатий непрерывнолитых заготовок размерами 250 x 1550 x 6000...6200 мм на катаные слэбы сечением 140 x 1390-1410 мм.

№ прохода	Раствор горизонтальных валков, мм	Обжатие Δh, мм	Настройка вертикальных валков, мм		№ прохода	Раствор горизонтальных валков, мм	Обжатие Δh, мм	Настройка вертикальных валков, мм			
			Значение раствора	Изменение раствора				Значение раствора	Изменение раствора	Значение раствора	Изменение раствора
1	240	14	1530	45	1	230	24	1530	45	1540	35
2	230	10	1510	20	2	210	20	1510	20	1520	20
3	210	20	1480	30	3	190	20	1470	40	1480	40
4	200	10	1470	10	4	170	20	1450	20	1460	20
5	170	30	1440	30	5	150	20	1415	35	1425	35
6	160	10	1430	10	6	142	8	1420	-5	1430	-5
7	150	10	1405	25	7	142	0	1415	5	1425	5
8	142	8	1410	-5	8	142	0	1420	-5	1430	-5
9	142	0	1405	5							
10	142	0	1410	-5							
Ширина слэбов,			1390		Ширина слэбов,			1400		1410	

Таблица Б.3 - Режимы обжатий непрерывнолитых заготовок размерами 1250 x 1550 x 6000...6200 мм на катаные слябы сечением 140 x 1420 мм и 135x1430-1440мм.

№ прохода	Раствор горизонтальных валков, мм	Обжатие Δh, мм	Настройка вертикальных валков, мм		№ прохода	Раствор горизонтальных валков, мм	Обжатие Δh, мм	Настройка вертикальных валков, мм			
			Значение раствора	Изменение раствора				Значение раствора	Изменение раствора	Значение раствора	Изменение раствора
1	230	24	1540	35	1	230	24	1540	35	1540	35
2	210	20	1520	20	2	210	20	1520	20	1520	20
3	190	20	1490	30	3	190	20	1490	30	1490	30
4	170	20	1470	20	4	170	20	1470	20	1480	10
5	150	20	1435	35	5	150	20	1445	25	1455	25
6	142	8	1440	-5	6	137	13	1450	-5	1460	-5
7	142	0	1435	5	7	137	0	1445	5	1455	5
8	142	0	1440	-5	8	137	0	1450	-5	1460	-5
Ширина слябов, мм			1420		Ширина слябов, мм			1430		1440	

Таблица Б.4 - Режимы обжатий непрерывнолитых заготовок размерами 250 x 1550 x 6000...6200 мм на катаные слябы сечением 135 x 1460-1480 мм.

№ прохода	Раствор горизонтальных валков, мм	Обжатие Δh, мм	Настройка вертикальных валков, мм					
			Значение раствора	Изменение раствора	Значение раствора	Изменение раствора	Значение раствора	Изменение раствора
1	230	24	1530	45	1530	45	1530	45
2	200	20	1510	20	1510	20	1510	20
3	180	20	1475	35	1485	25	1495	15
4	150	20	1480	-5	1490	-5	1500	-5
5	137	20	1475	5	1485	5	1495	5
6	137	8	1480	-5	1490	-5	1500	-5
Ширина слябов, мм			1460		1470		1480	





## Приложение В

Таблица В.1 - Режимы обжатий черновой группы при транзитной прокатке редуцированных слэбов.

Толщина сляба, мм	Клетки черновой группы																	
	01			1			2			3			4			4а		
	h, мм	$\Delta h$ , мм	W не более, мВт	h, мм	$\Delta h$ , мм	W не более, мВт	h, мм	$\Delta h$ , мм	W не более, мВт	h, мм	$\Delta h$ , мм	W не более, мВт	h, мм	$\Delta h$ , мм	W не более, мВт	h, мм	$\Delta h$ , мм	W не более, мВт
140	135	5	3,0	105	30	6	71	34	6,5	54	17	5	44	10	4,0	35	9	4,0

Примечание. Указанные режимы могут корректироваться при согласовании с ЦИМК для осуществления синхронизации клетей при нахождении раската в валах клетей №01 и №1, а так же предотвращения раската одновременно в валах клетей №2 и 3.

## Додаток Ч



ПРАТ «ММК ІМ. ІЛЛІЧА»  
 вул. Левченка, 1  
 м. Маріуполь, 87504,  
 Донецька обл., Україна  
<https://ilyichsteel.metinvestholding.com>  
 Тел.: + 38 0629 56 40 09  
 Факс: + 38 0629 56 49 52  
 E-mail: office.mmk@metinvestholding.com

12.10.2020 № \_\_\_\_\_

На № \_\_\_\_\_

## ДОВІДКА

Цією довідкою підтверджується, що Курпе Олександр Геннадійович брав активну участь у розробці та впровадженні на ММК «ІМЕНІ ІЛЛІЧА» наступних технологій:

- технологія термомеханічної прокатки гарячекатаних рулонів на стані 1700 зі сталі марки S355MC товщиною 6 мм згідно з вимогами стандарту EN 10149-2;
- технологія термомеханічної прокатки гарячекатаних рулонів на стані 1700 зі сталі марки S460MC товщиною 2,5 мм згідно з вимогами стандарту EN 10149-2;
- технологія термомеханічної прокатки гарячекатаних рулонів на стані 1700 зі сталі марки В товщиною 4,7 мм та 5,7 мм згідно з вимогами стандарту API-5L;
- технологія термомеханічної прокатки гарячекатаних рулонів на стані 1700 зі сталі марки X52M товщиною 8 мм згідно з вимогами стандарту API-5L.

Перелічені технології дозволили освоїти виробництво нового сортаменту та виконати замовлення споживачів.

Очікуваний економічний ефект від виробництва нового сортаменту складає 1,75 млн. грн/рік за рівнем цін на 2020 р.

Розрахунок економічного ефекту не наводиться, тому що містить елементи комерційної таємниці.

Довідка призначена для спеціалізованої вченої ради та не може бути підставою для висунення фінансових вимог.

Директор з технології і якості  
 ПРАТ «ММК ІМ.ІЛЛІЧА»



Є.В. Дунаєв



## Додаток Ш

ЗАТВЕРДЖУЮ

Перший проректор  
державного вищого  
навчального закладу  
«Приазовський державний  
технічний університет»

В.М. Євченко

« 25 » вересня 2020 р.

## ДОВІДКА


про використання результатів докторської дисертації Курпе Олександра Геннадійовича, яка присвячена дослідженню розвитку наукових основ термомеханічної прокатки плоскої металопродукції з отриманням підвищеного рівня механічних властивостей (спеціальність 05.03.05 – процеси та машини обробки тиском)

Комісія у складі декану металургійного факультету, к.т.н., доцента Л.І. Тарасюка та викладачів кафедри «Обробка металів тиском» («ОМТ») – завідуючого кафедрою, д.т.н., професора В.В. Кухаря і к.т.н., доцента А.Г. Присяжного, встановила, що програмні засоби, результати теоретичних та експериментальних досліджень, які містить докторська дисертація Курпе О.Г., використовуються в навчальному процесі ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет» у наступному вигляді:

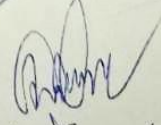
- методики комплексної статистичної та аналітичної обробки технологічних показників виробництва та результатів механічних випробувань прокату при оцінці стану технології, технічних можливостей устаткування та засвоєння нового сортаменту прокату;
- результатів теоретичного аналізу та математичного моделювання методом елементарних теплових балансів змінення температурного поля смуги що охолоджується в процесі прокатки;
- методики експериментальних досліджень властивостей свинцю та підходів по встановленню взаємозв'язку і умов використання отриманих результатів для розрахунку силових характеристик марок сталей-аналогів;
- методики оцінки нерівномірності деформації на стадії чорнової прокатки за допомогою методу скінчено-елементного моделювання та аналітичним шляхом;
- ряду технологічних та реконструкційних рішень, пов'язаних з розробкою та вдосконаленням устаткування і технології виробництва товстолистового та рулонного прокату способом термомеханічної прокатки з використанням різноманітного складу основного устаткування.

Вказані результати використані в лекційному матеріалі наступних дисциплін кафедри ОМТ: «Напрями розвитку процесів ОМТ», «Процеси та машини обробки тиском», «Проектування цехів». Також результати роботи використані здобувачами вищої освіти, що навчаються спеціальністю 136 «Металургія» освітньої програми «Обробка металів тиском», при виконанні магістерських робіт.


Декан металургійного факультету,  
к.т.н., доцент

 Л.І. Тарасюк

Завідуючий кафедрою ОМТ,  
д.т.н., професор

 В.В. Кухар

Доцент кафедри ОМТ, к.т.н.

 А.Г. Присяжний

## Додаток Ю

ЗАТВЕРДЖУЮ  
 Проректор з наукової роботи  
 Державного вищого навчального закладу  
 «Приазовський державний  
 технічний університет»


  
 І.А. Ленцов

« 23 » 09 2020 р.

## АКТ ПРО ВИКОРИСТАННЯ

розробок дисертаційної роботи  
 старшого викладача кафедри «Обробка металів тиском»  
**Курпе Олександра Геннадійовича**  
 у науково-дослідних роботах  
 ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет»

Матеріали докторської дисертаційної роботи старшого викладача кафедри «Обробки металів тиском» Державного вищого навчального закладу «Приазовський державний технічний університет» (ДВНЗ «ПДТУ») Курпе О.Г., а саме:

- уточнені закономірності зміни площі зерна аустеніту та істинного опору деформації сталі категорії міцності Х65 від термомеханічних умов прокатки;

- уточнені методики розрахунку термомеханічних режимів прокатки на листопрокатних станах із прогнозуванням механічних властивостей плоского прокату, що унаслідуються;

- запропонований метод визначення величин обтиснень, що забезпечують рівномірність проникнення еквівалентного напруження та еквівалентної деформації в центральну частину заготовки на рівні 90 % від максимальних значень;

- аналітичний метод визначення зміни температури металу у CoilBox та у пічних моталках стану Стеккеля,

були використані у ДВНЗ «ПДТУ» при виконанні держбюджетних науково-дослідних робіт, передбачених планами Міністерства освіти і науки України в період 2017-2020 рр.:

- № 0117U002269 «Розвиток наукових і технологічних основ виробництва металопродукції підвищеної якості з листа та композитів спеціального призначення» (2017-2019 рр.);

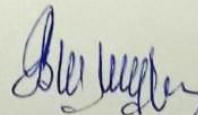
- № 0118U006912 «Розвиток теорії, дослідження та вдосконалення процесів пластичного деформування матеріалів» (2018-2019 р.);

- № 0120U102154 «Превентивне керування якістю металопродукції з листа та композитів для захисту спеціальної та броньованої техніки» (2020 р.).

У вказаних роботах Курпе О.Г. брав участь в якості виконавця.

Довідка призначена для надання в спеціалізовану вчену раду Д 12.105.01 Донбаської державної машинобудівної академії.

Начальник науково-дослідної частини,  
к.т.н., доцент



В.В. Шишкін