

ДОНБАСЬКА ДЕРЖАВНА МАШИНОБУДІВНА АКАДЕМІЯ

*Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису*

ГАВРИЛЬЧЕНКО ЄВГЕН ЮРІЙОВИЧ

УДК 621.771.01

ДИСЕРТАЦІЯ

**УДОСКОНАЛЕННЯ ПРОЦЕСУ ПРАВКИ ГАРЯЧЕКАТАНИХ
ЛИСТІВ І КОНСТРУКТИВНИХ ПАРАМЕТРІВ
ЛИСТОПРАВИЛЬНИХ МАШИН ДЛЯ ЙОГО РЕАЛІЗАЦІЇ**

Спеціальність 05.03.05 "Процеси та машини обробки тиском"

Подається на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело
_____ (Є. Ю. Гаврильченко)

Науковий керівник:

д-р техн. наук, доцент

Грибков Едуард Петрович

Краматорськ – 2018

АНОТАЦІЯ

Гаврильченко Є. Ю. Удосконалення процесу правки гарячекатаних листів і конструктивних параметрів листопривильних машин для його реалізації. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук (доктора філософії) за спеціальністю 05.03.05 «Процеси та машини обробки тиском». – Донбаська державна машинобудівна академія, Краматорськ, 2018.

Дисертаційна робота присвячена актуальному науково-технічному завданню з розширення технологічних можливостей багатороликових привильних машин шляхом можливого згину робочих роликів для усунення дефекту хвилястості не тільки в повздовжньому, а і в поперечному напрямку за рахунок збільшення видів дефектів, що виправляються.

Метою роботи є підвищення якості продукції та розширення сортаменту багатороликових листопривильних машин за рахунок удосконалення технологій і обладнання процесів правки листів та розвитку методів їх розрахунку.

В наш час є актуальним питання відповідності якості української прокатної продукції вимогам сучасних європейських стандартів, а також забезпечення конкурентної вартості металопрокату для успішного просування цього сегмента промисловості на європейський ринок. Зазначене робить необхідним удосконалення відомих та освоєння нових прогресивних методів з автоматизованого розрахунку і проектування відповідних нових технологій і обладнання, серед яких особливе місце займають технології та обладнання процесів правки гарячекатаних листів, що забезпечують необхідні показники площинності і форми, розширення сортаменту і підвищення коефіцієнта виходу придатного.

Існуючі методи розрахунку процесів правки на ЛПМ не дозволяють визначити закономірності напружено-деформованого стану металу при виправленні нерівномірно розподілених по ширині дефектів площинності.

Відсутнє розуміння про мінімальну кількість роликів, які необхідно піддавати вигину в процесі правки нерівномірно розподілених по ширині дефектів площинності і величини вигину залежно від характеру і розмірів вихідного дефекту площинності.

Зазначене знижує інформативність, ступінь достовірності і обмежує діапазон можливого використання існуючих методів. Таким чином, актуальність теми роботи і її практична спрямованість визначаються необхідністю підвищення ефективності, розширення сортаменту і сфер використання процесів правки багаторазовим вигином, що здійснюються на основі розробки технологічних і конструктивних рекомендацій, які впливають з результатів теоретичних і експериментальних досліджень.

Відповідно до цього в даній роботі завдяки закладеному в чисельно-аналітичній моделі впливу перегинів листа на кожному з робочих роликів листоправильної машини зроблена оцінка ступеню ефективності застосовуваного технологічного процесу, а також розроблені рекомендації з його удосконалення.

На основі реалізації чисельно-аналітичної моделі встановлено вплив властивостей матеріалу, його геометричних характеристик, форми хвилі по крайках, а також налаштувань роликів на кінцеву відносну кривизну листа, а саме зі збільшенням товщини листів та зменшенням межі плинності матеріалу кінцева кривизна листів збільшується, що необхідно враховувати при проектуванні нового обладнання; зі збільшенням крайової хвилястості листів при одних і тих же налаштуваннях ЛПМ різниця в подовженні волокон посередині листа і його крайках збільшується, що підвищує ефективність процесу, проте кінцева кривизна листів також зростає, але з меншою інтенсивністю; зі збільшенням перекриття роликів кінцева кривизна листів змінюється нерівномірно з яскраво вираженими мінімумами функцій, що засвідчує про необхідність вирішення задач оптимізаційного плану з визначення перекриття роликів залежно від параметрів вихідного листа; зі збільшенням довжини хвилі крайової хвилястості листів різниця в подов-

женні волокон по середині і крайках листа зменшується, що свідчить про необхідність врахування, крім амплітуди хвилі, і цього параметра при визначенні налаштувань роликів.

При вирішенні задач в тривимірній площині для визначення величини згину робочих роликів при усуненні дефектів хвилястості листів ця модель непридатна внаслідок прийнятих припущень і може бути використана лише для критеріальної оцінки. Внаслідок цього була розроблена скінченно-елементна модель, що дозволяє визначити характер впливу величини перекриття та згину робочих роликів на хвилястість готового прокату. На прикладі результатів для листів товщиною 10 мм зі сталі 08кп з крайовою хвилястістю 4 мм показано, що при вигині робочих роликів на 1 мм крайова хвилястість зменшується на 30%, при вигині на 2 мм – на 75%, при вигині на 5 мм – на 87%. Дані результати підтверджують ефективність технології правки хвилястості на ЛПМ, а запропонована модель дозволяє розраховувати кінцеву хвилястість листів в залежності від налаштування робочих роликів.

З метою оцінки ступеня вірогідності отриманих математичних моделей, а також уточнення вихідних передумов для їхньої чисельної реалізації, експериментальні дослідження процесу холодної правки на ЛПМ з диференційованим додатком сили правки по ширині листа були проведені з використанням спеціально спроектованої експериментальної установки. Аналіз результатів експериментальних досліджень свідчить про якісну та кількісну відповідність результатів розрахункових досліджень і експериментів. При цьому погрішність розрахунків сили правки на третьому роликку не перевищила 15,3% при середньоквадратичному відхиленні 5,9%, а на 5-му роликку – 22,4 % при середньоквадратичному відхиленні 9,2%, погрішність розрахунків різниці довжин волокон по ширині заготовки для сталевих листів не перевищила 12,9%, а для свинцевих – 11,34%. Для виявлення більш повної картини були також проведені дослідження правки листів у роликах з бочкоподібною формою робочої поверхні, що дозволяє в

достатній мірі імітувати вигин по центру ролика. Встановлено, що при експериментальному дослідженні для випадку правки листа з максимальною вихідною амплітудою хвилі на крайці 4 мм після першого проходу амплітуда хвилі склала 3,3 мм, після другого – 2,7 мм, після третього – 1,8 мм зі середньоквадратичним відхиленням за результатами експериментів відповідно 0,12, 0,11 і 0,09 мм, при цьому погрішність результатів тривимірного моделювання у всіх випадках не перевищила 15 %, що свідчить про достатній ступінь вірогідності теоретичної моделі стосовно результуючих параметрів форми листа.

У процесі експериментальної правки в промислових умовах був визначений фактичний вплив коефіцієнта проникнення пластичної деформації на результуючу площинність листів. Встановлене, що для гарячої правки найбільш прийнятне значення цього коефіцієнту, який забезпечується положенням третього ролика – 2,5...4, у той час як для холодної правки – 4...6 залежно від вихідної кривизни листів. Також було встановлено, що для холодної правки листів з високим рівнем коробуватості потрібно два проходи (для одержання площинності понад вимоги ГОСТ). У цілому математична модель забезпечує налаштування ЛПМ, що дозволяє в результаті як гарячої, так і холодної правки одержувати якісний металопрокат з показниками площинності згідно з вимогами сучасних вітчизняних і закордонних стандартів.

На основі отриманих чисельних математичних моделей розроблені алгоритми і вирішені програмно задачі з автоматизованого проектування технологічних параметрів листопривальної машини, апробовані і впроваджені на діючому промисловому обладнанні та дозволяють в масштабі реального часу працювати в системі АСУ ТП ЛПМ. Від'ємною рисою цих алгоритмів є пошук раціонального для заданого сортаменту листів коефіцієнту проникнення пластичної деформації та визначення положення робочих роликів при їх індивідуальному налаштуванні.

На основі результатів реалізації тривимірної скінченно-елементної моделі процесу правки розроблені регресійні моделі з застосуванням методу планованого експерименту, що дозволило вирішити задачі оптимізаційного плану з впливу технологічних параметрів процесу правки з вигином робочих роликів на виправлення дефектів листів і в повздовжньому, і в поперечному напрямку. Встановлено, що хвилястість листа зменшується при збільшенні вигину та перекриття роликів, при цьому розрахунки показують, що при певній хвилястості одноразовим вигином роликів досягти необхідну хвилястість крайок згідно стандартам не є можливим. Найбільш значущим фактором при цьому є зменшення параметра W / h до рівня 0,25, який досягається, як правило, третім роликом та обмежується нормованим коефіцієнтом проникнення пластичної деформації. При цьому, як показують розрахунки, необхідний рівень площинності ($\Phi = 0,1 \dots 1,0$ мон) можна досягти вигином робочих роликів на рівні 1,5...2,0 мм.

На основі автоматизованого проектування технологічних режимів і конструктивних параметрів обладнання для реалізації процесів правки гарячекатаних листів розроблені практичні рекомендації, спрямовані на підвищення ефективності технологій шляхом зниження енергоємності процесу, зменшення металоємності обладнання та розширення сортаменту оброблюваних листів на листопробних машинах. З використанням розглянутих розрахункових результатів, отриманих в рамках даного дослідження, був зроблений вибір основних конструктивних параметрів вузла станин і верхньої поперечини ЛПМ стану 2850, що забезпечує при збереженні жорсткості зниження металоємності на 30...40%. Економія в грошовому вираженні від результатів роботи на даній ЛПМ при зміні зазначених конструктивних елементів склала 320 тис. грн.

Стосовно до умов реалізації різних технологічних схем процесу правки гарячекатаних листів уточнені вихідні дані на проектування та виконані проекти комплекту касет з можливістю вигину робочих роликів для листопробної машини агрегату поперечного різання конструкції НКМЗ.

Результати роботи у вигляді методик розрахунку, програмних засобів, а також відповідних рекомендацій з удосконалення технологічних режимів і конструктивних параметрів механічного обладнання машин для правки гарячекатаних листів використані на ряді металургійних підприємств і в навчальному процесі.

Ключові слова: правка, листоправильна машина, математичне моделювання, напружено-деформований стан, технології, обладнання, сортмент, якість, диференційний додаток сили по ширині листа.

ABSTRACT

Gavrilenko E. Yu. Improvement of the process of editing hot-rolled sheets and design parameters of sheet-straightening machines for its implementation. – Qualification work on the rights of a manuscript.

Thesis on Competition of a Scientific Degree of the Candidate of Engineering Sciences (PhD) on Specialty 05.03.05 – “Processes and Machines of plastic working”. – Donbas State Engineering Academy, Kramatorsk, 2018.

The thesis is devoted to the current scientific and technical assignment to expand the technological capabilities of multi-roll levelers by possibly bending the work rolls to eliminate the waviness defect not only in the longitudinal, but also in the transverse direction. The work is aimed at improving the efficiency of the process of editing hot-rolled sheets, which is associated with expanding the range of sheet-straightening machines, reducing their metal consumption, improving the quality of sheet metal products by increasing the types of defects, are corrected.

The aim of the work is to improve the quality of products and the expansion of the range of multi-roll levelers by improving the technologies and equipment of sheet leveling and the development of methods for their calculation.

Hot-rolled sheets occupy a significant part in the volume of Ukrainian exports, while in the near future this part will grow, which makes the question of the conformity of Ukrainian products to the requirements of modern European standards, as well as the provision of competitive cost of metal rolling for the successful promotion of this segment of industry to the European market. This makes necessary the improvement of the known and the development of new advanced methods for the automated calculation and design of relevant new technologies and equipment, among which a special place is taken by technologies and equipment for processes of hot-rolled sheets leveling, providing the necessary indicators of flatness and shape, expanding the range and increasing the output factor fit.

Existing methods of calculating the straightening process in levelers is not possible to determine patterns of stress-strain state of the metal in leveling unevenly distributed across the width flatness defects. There is no understanding of the minimum number of rollers to be bent in the process of leveling irregularly distributed widths of plane defects and bending values depending on the nature and size of the initial defect of flatness.

This reduces the informative value, the degree of reliability and limits the range of possible use of existing methods. Thus, the relevance of the topic of work and its practical orientation are determined by the need to increase efficiency, expand the range and areas of use of the process of leveling by repeated bending, carried out on the basis of the development of technological and constructive recommendations arising from the results of theoretical and experimental studies.

In accordance with this, this work focuses on a one-dimensional model of the leveling process, a distinctive feature of which is taking into account such factors as the continuity of the plot of rotation angles at the boundaries of the calculated sheet sections, the displacement of the contact point from the top of the roller horizontally and vertically, the influence of residual stresses, the possibility of transition concentrated contact in distributed and taking into account the hardening of the metal during the straightening. The method of the effect of the sheet bend on each of the working rollers of the leveler in the method allowed to evaluate the degree of efficiency of the applied technological process, as well as to develop recommendations for its improvement.

On the basis of the implementation of the developed numerical-analytical model, the influence of the material properties, its geometric characteristics, the shape of the wave along the edges and also the settings of the rollers on the final relative curvature of the sheet are determined, namely, with the increase in the thickness of the sheets and the decrease of the material fluid boundary, the final curvature of the sheets increases, which should be taken into account when designing of new equipment; with the increase of the boundary wavelength of the

sheets under the same settings of the leveler, the difference in elongation of the fibers in the middle of the sheet and its edges increases, which increases the efficiency of the process, but the final curvature of the sheets also increases but with less intensity; with increasing overlap of rollers, the final curvature of the sheets varies unevenly with the strong minimums of functions, which testifies to the need to solve the tasks of an optimization plan for determining the overlap of rollers depending on the parameters of the output sheet; with the increase in the wavelength of the edge wavelength of the sheets, the difference in the elongation of the fibers in the middle and the edges of the sheet decreases, which indicates the need to take into account also this parameter in determining the settings of the rollers in addition to the wave amplitude.

The developed numerical analytical model has a number of advantages; however, when solving problems in a three-dimensional plane, this model is not suitable to determine the value of the bending of rollers when removing wavelength defects of sheets due to assumptions and can only be used for the criterion assessment. As a result, a finite-element model was developed to determine the effect of the size of the overlapping and bending of rollers on the waviness of the finished rolling. As a result of the implementation of this model, we obtained results for sheets of 10 mm thick 08kp steel with an edge wavelength of 4 mm. It is shown that when bending the working rollers by 1 mm, the edge wavelength decreases by 30%, with bending by 2 mm – by 75%, with bending by 5 mm – by 87%. These results confirm the effectiveness of straightening in the levelers and the proposed model allows calculating the final undulation of sheets depending on the setting of working rollers.

In order to assess the reliability of mathematical models and to clarify the initial prerequisites for their numerical implementation, experimental studies of the cold leveling on the leveler with differentiated application of the power on the width of the sheet were carried out using a specially designed experimental unit. Analysis of experimental results indicates the qualitative and quantitative results calculated line of research and experiments. At the same time, the error

of the straightening force calculations on the third roll does not exceed 15.3% at a mean square deviation of 5.9%, and on the 5th roll – 22.4% at a mean square deviation of 9.2%, the error of calculating the difference in the length of the fibers in the width of the parent sheet for steel sheets did not exceed 12.9%, and for lead – 11.34%. In order to reveal a more complete picture, studies were also carried out to leveling sheets in rollers with a barrel-shaped working surface, which allows to sufficiently simulating the bend on the center of the roller. It was established that in the case of an experimental study, for a straightening of sheet edges with a maximum output amplitude of a wave at an edge of 4 mm after the first pass, the wave amplitude was 3.3 mm, after the second – 2.7 mm, after the third – 1.8 mm with the mean square deviation of the results experiments, respectively, 0.12, 0.11 and 0.09 mm, while the error of the results of three-dimensional modeling in all cases did not exceed 15%, which indicates a sufficient degree of probability of the theoretical model in relation to the resulting sheet shape parameters.

In the process of experimental leveling under industrial conditions, the actual influence of the coefficient of penetration of plastic deformation on the resulting plane of the sheets was determined. It is established that for the hot leveling the most acceptable value is 2.5 ... 4, whereas for the cold edit it is 4 ... 6 depending on the initial curvature of the sheets. It was also found that for cold straightening of sheets with high level of hardness, two passes are required (for obtaining the plane beyond the requirements of GOST). In general, the mathematical model provides adjustment of the leveler, which allows, as a result of both hot and cold leveling, to obtain high-quality metal rolling with the parameters of the plane in accordance with the requirements of modern domestic and foreign standards.

On the basis of the obtained numerical mathematical models, algorithms and solved software problems in the automated design of the technological parameters of the leveler, tested and implemented on existing industrial equipment and allow operating in the real-time in the automated process control systems of

the leveler. The advantage of these algorithms is to find coefficient for a given assortment of letters penetration ratio of plastic deformation and determining the position of the working rollers with their individual settings.

Based on the implementation of three-dimensional finite-element model leveling process developed regression models using the method of the planned experiment that helped to solve the problem of the optimization plan of technological parameters of the process of straightening bending work roller to correct defects of sheets in longitudinal and in the transverse direction. It was found that the sheet wavelength decreases with increasing bending and overlapping of rollers, while calculations show that with a certain wavelength, the single bending of the rollers to achieve the required wavelength of the edges in accordance with the standards is not possible. The most significant factor here is the reduction of the W / h parameter to the level of 0.25, which is usually achieved by the third roller and is limited to the normalized coefficient of plastic deformation penetration. However, calculations show that the required level of flatness ($F = 0.1 \dots 1.0 \text{ mon}$) can be achieved by bending rollers operating at 1.5 ... 2.0 mm.

On the basis of computer-aided design of technological modes and design parameters of equipment for the implementation of processes for hot-rolled sheets, practical recommendations were developed aimed at improving the efficiency of technologies by reducing the energy intensity of the process, reducing the metal intensity of equipment and expanding the range of sheets in the levelers. Using the considered calculation results obtained in the framework of this study, we choose the main structural parameters of the bed and the upper cross-section of the 2850 mill leveler, which ensures, while maintaining the stiffness of reducing the metal content by 30 ... 40%. The savings in monetary terms from the results of work on this leveler at the change of these constructive elements amounted to 320 thousand UAH.

Regarding the conditions of implementation of various technological schemes of the hot-rolled sheet leveling, the initial data on the design have been specified and projects of the set of cassettes with the possibility of bending of

working rollers for the leveling of the transverse cutting unit of the NKMZ design have been completed.

The results of a calculation methodologies, software tools, and appropriate recommendations to improve the process design parameters and modes of mechanical equipment machines for straightening hot rolled sheets used in a number of steel plants in the educational process.

Keywords: levelling, leveler, mathematical modeling, deflected mode, technologies, facility, grades, quality, differential application of force across the width of sheet.

СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА

1. Straightening of Sheet with Correction of Waviness / A. V. Barabash, **E. Yu. Gavril'chenko**, E. P. Gribkov, O. E. Markov // Steel in Translation, 2014, Vol. 44, No. 12, pp. 916–920. DOI: 10.3103/S096709121412002X (зарубіжне видання, Scopus).
2. Грибков Э. П. Математическое моделирование профилирования ободьев колес / Э. П. Грибков, Е. Ю. Гаврильченко, Д. В. Мережко // Актуальные проблемы в машиностроении. – Новосибирск : НГТУ, 2016. – № 3. – С. 330–335 (зарубіжне видання).
3. Математическая модель технологических настроек ЛПМ ТЛС 2850 Ашинского металлургического завода для горячей и холодной правки листов / В. А. Федоринов, А. В. Барабаш, **Е. Ю. Гаврильченко** Э. П. Грибков // Обработка материалов давлением : сб. науч. тр. – Краматорск : ДГМА, 2014. – № 1 (38). – С. 48–53.
4. Грибков Э. П. Исследование процесса правки волнистости листов на листоправильных машинах / Э. П. Грибков, **Е. Ю. Гаврильченко** // Вісник Херсонського національного технічного університету. – 2017. – № 2 (61). – С. 35–44.
5. Грибков Э. П. Автоматизированное проектирование технологических настроек листоправильной машины / Э. П. Грибков, **Е. Ю. Гаврильченко** // Вісник Національного технічного університету "ХПІ". Серія : Інноваційні технології та обладнання обробки матеріалів у машинобудуванні та металургії. – 2017. – № 37 (1259). – С. 11-16.
6. Программное обеспечение для проектирования технологических параметров настройки многороликовых листоправильных машин / Э. П. Грибков, А. В. Завгородний, **Е. Ю. Гаврильченко**, А. С. Горбенко // Научный вестник Донбасской государственной машиностроительной академии [Электронный ресурс]. – Краматорск : ДГМА, 2015. – № 2 (17Е) . – С. 33–38.

7. Федоринов В. А. Конечно-элементное моделирование процесса правки волнистости на листоправильных машинах / В. А. Федоринов, **Е. Ю. Гаврильченко**, А. В. Завгородний // Обработка материалов давлением : сб. науч. тр. – Краматорск : ДГМА, 2015. – № 2 (41). – С. 63–68.

8. Добронос Ю. К. Напряженно-деформированное состояние рабочего ролика листоправильной машины при холодной правке с дифференцированным приложением силы по ширине листа / Ю. К. Добронос, **Е. Ю. Гаврильченко**, И. А. Матвеев // Обработка материалов давлением : сб. науч. тр. – Краматорск : ДГМА, 2016. – № 1 (42). – С. 203–206.

9. Грибков Э. П. Исследование влияния дискретности разбиения объема материала на точность расчета при конечно-элементном моделировании процесса правки толстых листов / Э. П. Грибков, **Е. Ю. Гаврильченко** // Научный вестник Донбасской государственной машиностроительной академии [Электронный ресурс]. – Краматорск : ДГМА, 2017. – № 2 (23Е). – С. 4–8.

10. Грибков Э. П. Экспериментальные исследования холодной правки на многороликовых листоправильных машинах / Э. П. Грибков, **Е. Ю. Гаврильченко** // X International Conference “Strategy of Quality in Industry and Education” June 6-13 2014, Varna, Bulgaria // International Scientific Journal Acta Universitatis Pontica Euxinus. Special Number. – pp. 53-57. – 978-617-518-288-8.

11. Гаврильченко Е. Ю. Математическая модель технологических настроек листоправильной машины для правки продольной и поперечной кривизны листов / **Е. Ю. Гаврильченко** // Материалы VI Международной научно-технической конференции «Ресурсосбережение и энергоэффективность процессов и оборудования обработки давлением в машиностроении и металлургии», 19-21 ноября, Харьков, 2014.– С. 28–30.

12. Пат. № 82635, Україна, МПК В21D 11/08, В21D 11/128 (2006.01). Спосіб центрування затравки в районі вертикальної тягнучої кліті і район вертикальної тягнучої кліті / **Гаврильченко Є. Ю.**, Гаврильченко О.О.,

Титаренко О. І., Євгиненко І. О., Смирнов В. Г. ; заявник та патентовласник Закрите акціонерне товариство "Новокраматорський машинобудівний завод". – № а200706726 ; заявл. 15.06.2007 ; опубл. 25.04.2008, Бюл. № 8.

13. Пат. № 70821, Україна, МПК В21D 1/02 (2006.01). Машина для виправлення сортового прокату / Алдохін Д. В., Євгиненко І. О., Гриценко С. А., Рева О. В., **Гаврильченко Є. Ю.**, Шестопалов А. В., Филиппських А. М., Бобуліч В. С., Сілін Р. Є., Івчик Р. С. ; заявник та патентовласник Публічне акціонерне товариство "Новокраматорський машинобудівний завод". – № u201114727 ; заявл. 12.12.2011 ; опубл. 25.06.2012, Бюл. № 12.

14. Пат. № 98560, Україна, МПК В21D 3/02 (2006.01). Листопривильна машина / Гриценко С. А., Євгиненко І. О., **Гаврильченко Є. Ю.**, А. Ф. Гончаренко, Послушник О. В. ; заявник та патентовласник Публічне акціонерне товариство "Новокраматорський машинобудівний завод". – № u201413602 ; заявл. 18.12.2014 ; опубл. 27.04.2015, Бюл. № 8.

15. Пат. № 119629, Україна, МПК В30В 3/00, В21D 5/00 (2006). Прес для правки товстих листів і плит / Гриценко С. А., Бердніков О. К., **Гаврильченко Є. Ю.**, Послушник О. В., Татаренков С. Л. ; заявник та патентовласник Публічне акціонерне товариство "Новокраматорський машинобудівний завод". – № u201704860 ; заявл. 19.05.2017 ; опубл. 25.09.2017, Бюл. № 18.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	21
РОЗДІЛ 1. ОГЛЯД ТЕХНОЛОГІЙ, ОБЛАДНАННЯ, МЕТОДІВ РОЗРАХУНКУ І ПЕРСПЕКТИВИ РОЗВИТКУ БАГАТОРОЛИКОВИХ ЛИСТОПРАВИЛЬНИХ МАШИН (АНАЛІЗ СТАНУ ПИТАННЯ).....	27
1.1 Дефекти форми листового металопрокату, фактори, що їх обумовлюють і способи усунення.....	27
1.2 Склад і конструктивні особливості обладнання для правки листів і штаб.....	35
1.3 Методи розрахунків процесів правки знакозмінним вигином на багатороликкових машинах.....	52
Висновки.....	64
РОЗДІЛ 2. ВИБІР НАПРЯМКІВ, МЕТОДІВ ТЕОРЕТИЧНИХ І ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ В ОБЛАСТІ ПРАВКИ ГАРЯЧЕКАТАНИХ ЛИСТІВ.....	65
2.1 Розширення сортаменту, підвищення якості та зниження собівартості готової металопродукції як основний напрямок в області наукових досліджень.....	65
2.2 Вибір методів теоретичних досліджень.....	66
2.3 Вибір методів експериментальних досліджень процесів правки гарячекатаних листів.....	76
Висновки.....	88

РОЗДІЛ 3 МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ЕНЕРГО-СИЛОВИХ І ГЕОМЕТРИЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ПРОЦЕСУ ПРАВКИ ГАРЯЧЕКАТАНИХ ЛИСТІВ	90
3.1 Математична модель з розрахунку енергосилових і геометричних параметрів процесів правки гарячекатаних листів	90
3.2 Скінченно-елементне моделювання процесу правки хвилястості на листоправильних машинах	113
Висновки	122
РОЗДІЛ 4 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСІВ ПРАВКИ ГАРЯЧЕКАТАНИХ ЛИСТІВ НА ЛИСТОПРАВІЛЬНИХ МАШИНАХ З ДИФЕРЕНЦІЙОВАНИМ ДОДАТКОМ СИЛИ ПРАВКИ ПО ШИРИНІ ПРОКАТУ	124
4.1 Експериментальні дослідження процесів правки на листоправильній машині з диференційованим додатком сили правки по ширині прокату	124
4.2 Промислова адаптація розробленої одномірної математичної моделі процесу правки на листоправильній машині товстолистового стану 2850 ПАТ «Ашинський металургійний завод»	143
Висновки	159
РОЗДІЛ 5 АВТОМАТИЗОВАНЕ ПРОЕКТУВАННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИХ НАЛАШТУВАНЬ ЛИСТОПРАВІЛЬНОЇ МАШИНИ З ДИФЕРЕНЦІЙОВАНИМ ДОДАТКОМ СИЛИ ПРАВКИ ПО ШИРИНІ ЛИСТІВ.....	161

5.1 Автоматизоване проектування технологічних налаштувань листоправильної машини на основі чисельно-аналітичної моделі процесу правки багаторазовим знакозмінним вигином	161
5.2 Автоматизоване проектування технологічних налаштувань листоправильної машини на основі регресійної моделі процесу правки багаторазовим знакозмінним вигином	174
5.3 Автоматизоване проектування налаштування вигинів робочих роликів	189
5.4 Автоматизоване проектування технологічних режимів та удосконалення конструктивних параметрів обладнання багатороликової листоправильної машини товстолистого стану 2850	192
Висновки	212
ВИСНОВКИ	215
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	218
ДОДАТКИ	240
Додаток А. Програмні засоби з автоматизованого розрахунку напружено-деформованого стану та енергосилових параметрів при реалізації процесу правки	241
Додаток Б. Програмні засоби з автоматизованого розрахунку напружено-деформованого стану та основних показників якості при реалізації процесів правки відносно товстих листів і штаб.	248
Додаток В. Принцип роботи, опис та обмеження програмного продукту Setlevelers.dll.	256

Додаток Г. Код програмного продукту Setlevelers.dll.	259
Додаток Д. Технологічні налаштування для вибіркового сор- таменту.	269
Додаток Е. Методика визначення коефіцієнтів регресії та статистичної обробки експериментальних даних планованого екс- перименту	274
Додаток Ж. Програмні засоби з розрахунку регресійної мо- делі	276
Додаток И. Програмні засоби з автоматизованого розрахунку показника форми листа та амплітуди хвилястості штаби.....	280
Додаток К. Акти використання результатів роботи на мета- лургійному та машинобудівному підприємствах.	282
Додаток Л. Акти використання результатів роботи у нав- чальному закладі	285

ВСТУП

Актуальність теми. Прокатна металопродукція традиційно займає провідне положення в товарній структурі українського експорту. У зарубіжні країни продається близько вісімдесяти відсотків виробленої в країні металопродукції. При цьому гарячекатані листи займають значну частку в цьому обсязі. Найближчим часом, згідно з курсом розвитку, який визначила для себе держава, частка Європи в торговому балансі буде рости, що, в свою чергу, кидає виклик вітчизняним виробникам гарячекатаних листів в плані відповідності якості української продукції вимогам сучасних європейських стандартів, а також забезпечення конкурентної вартості металопрокату для успішного просування цього сегмента промисловості на європейський ринок.

Зазначене робить необхідним вдосконалення відомих, а також освоєння нових прогресивних методів з автоматизованого розрахунку і проектування відповідних нових технологій і обладнання, серед яких особливе місце займають технології та обладнання процесів правки гарячекатаних листів знакозмінним вигином на багатороликових машинах, що забезпечують необхідні показники площинності і форми, розширення сортаменту і підвищення коефіцієнта виходу придатного даного виду металопродукції.

Існуючі методи розрахунку процесів правки багаторазовим знакозмінним вигином не дозволяють врахувати глибину проникнення і характер розподілу пластичної деформації по перерізу листа. Крім того, відомі методи не дозволяють визначити закономірності напружено-деформованого стану металу при виправленні нерівномірно розподілених по ширині дефектів площинності шляхом диференційованого застосування сил правки по ширині листа, що виправляється. Відсутнє розуміння про мінімальну кількість роликів, які необхідно піддавати вигину в процесі редагування нерівномірно розподілених по ширині дефектів площинності і величини вигину залежно від характеру і розмірів вихідного дефекту площинності.

Зазначене знижує інформативність, ступінь достовірності і обмежує діапазон можливого використання існуючих методів. Крім того, доцільним в цьому випадку є постановка і рішення задач оптимізаційного плану з подальшим виходом на створення відповідних систем автоматизованого проектування і систем автоматичного регулювання.

Таким чином, актуальність теми роботи і її практична спрямованість визначаються необхідністю підвищення ефективності, розширення сортаменту і сфер використання процесів правки багаторазовим вигином, що здійснюються на основі розробки технологічних і конструктивних рекомендацій, які впливають з результатів теоретичних і експериментальних досліджень.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Тема дисертації відповідає науковому напрямку «Створення нових і вдосконалення діючих технологій, обладнання та засобів автоматизації в прокатному виробництві» наукової школи Донбаської державної машинобудівної академії. Робота виконана в рамках держбюджетних науково-дослідних робіт відповідно до координаційних планів Міністерства освіти і науки України (№ держ. реєстрації 0113U003979, № держ. реєстрації 0116U005584), в яких автор брав участь як виконавець.

Ціль і завдання дослідження. Метою роботи є підвищення якості продукції та розширення сортаменту багатороликових листопрямильних машин за рахунок удосконалення технологій і обладнання процесів правки листів та розвитку методів їх розрахунку.

Для досягнення зазначеної мети в роботі були поставлені і вирішені такі основні задачі:

- провести аналіз існуючих способів правки листів, тенденцій удосконалення технологій та обладнання для виправлення листового металопрокату;
- уточнити та розширити математичні моделі напружено-деформованого стану при правці гарячекатаних листів;
- розробити математичні моделі з прогнозування площинності листового металопрокату при гарячій та холодній правці листів з дефектами хвилясто-

сті на листоправильних машинах з диференційованим додатком сили правки по ширині листів;

- дати експериментальну оцінку ступеня вірогідності розроблених математичних моделей процесів правки і уточнити вихідні передумови, необхідні для їхньої чисельної реалізації;
- проаналізувати характер впливу вихідних параметрів і розробити практичні рекомендації, спрямовані на удосконалення технологій і обладнання для правки гарячекатаних листів;
- сформулювати критерії, розробити практичні рекомендації та програмні засоби з автоматизованого проектування технологічних режимів налаштування устаткування для правки гарячекатаних листів.

Об'єкт дослідження. Технології та устаткування для правки гарячекатаних листів.

Предмет дослідження. Основні закономірності механізмів формування напружено-деформованого стану та основних показників якості гарячекатаних листів при реалізації процесів правки.

Методи досліджень. В основу теоретичних досліджень були покладені методи теорії пружності та пластичності, що включають методи чисельних ітераційних рішень одномірної умови безперервності геометричних параметрів пружної лінії листів при реалізації процесу правки. Критеріальна оцінка ступеня вірогідності отриманих чисельних одномірних математичних моделей виконана на основі скінченно-елементного підходу з використанням САЕ-систем. Постановку та рішення задач з автоматизованого проектування налаштування робочих роликів листоправильних машин виконано з використанням елементів теорії операцій. Методи експериментальних досліджень, виконаних у лабораторних умовах, включали фізичне моделювання процесів правки на лабораторній листоправильній машині $9 \times 100 \times 250$.

Експериментальні дослідження в промислових умовах були виконані на листоправильних машинах товстолистових станів провідних металургійних комбінатів. Обробку результатів експериментальних досліджень, отриманих з

використанням методів тензометрії, виміру геометричних параметрів і експертних оцінок виконували на основі елементів теорії імовірності та математичної статистики.

Наукова новизна отриманих результатів. Наукову новизну дисертаційної роботи складають наступні її основні результати і положення:

- вперше на основі тривимірного аналізу встановлено закономірності напружено-деформованого стану металу при правці нерівномірно розподілених по ширині дефектів площинності шляхом диференційованого додатка сил правки по ширині листа, що виправляється;

- вперше встановлено вплив конструктивних параметрів листоправильних машин з диференційованим додатком сили правки по ширині листів, зокрема кількості роликів, що згинаються, і величини їх вигину на площинність горячекатаних листів, що виправляються;

- уточнені закономірності проникнення пластичної деформації по висоті перерізу горячекатаних листів при правці на основі вдосконалення одномірної математичної моделі напружено-деформованого стану та результуючих показників площинності при правці горячекатаних листів на багатороликових машинах, що включає чисельні ітераційні рішення умов безперервності геометричних параметрів пружної лінії.

Практична цінність отриманих результатів. Практичну цінність дисертаційної роботи складають наступні її основні результати і положення:

- комплекс методик і відповідних до них програмних засобів з автоматизованого розрахунку та проектування технологій і устаткування процесів багаторазового знакозмінного вигину з диференційованим додатком сил по ширині листа, що забезпечує зниження трудомісткості відповідних проектно-конструкторських і проектно-технологічних робіт;

- практичні рекомендації з удосконалення технологічних режимів роботи, складу, основних конструктивних параметрів і налаштувань механічного устаткування листоправильних машин з можливістю диференційованого додатку сил по ширині листа, що забезпечують розширення сортаменту, підви-

щення якості та економію матеріальних ресурсів при виробництві гарячекатаних листів, чотири з яких визнано винаходами.

Результати дисертаційної роботи у вигляді технічних рішень, практичних рекомендацій і програмних продуктів використані на ПрАТ «Новоукраїнський машинобудівний завод» (НКМЗ) при створенні технологій, устаткування та систем автоматичного керування листоправильної машини товстолистового прокатного стану 2850 і касет для листоправильної машини агрегату поперечного різання конструкції НКМЗ. З урахуванням часткової участі автора економічний ефект від впровадження результатів роботи, отриманий за рахунок зниження трудомісткості проектних робіт, розширення сортаменту, підвищення якості та збільшення виходу придатної металопродукції, склав 320 тис. гривень.

Окремі положення дисертації використовуються на кафедрі «Автоматизовані металургійні машини та обладнання» Донбаської державної машинобудівної академії в рамках викладання ряду спеціальних дисциплін, а також при виконанні науково-дослідних робіт, курсових і дипломних проектів студентами та магістрами спеціальності «Галузеве машинобудування».

Особистий внесок здобувача. Автор самостійно поставив мету і задачі, виконав дослідження з уточнення вихідних даних, розробив математичне та програмне забезпечення з автоматизованого розрахунку та проектування процесів правки гарячекатаних листів, виконав аналіз результатів чисельної реалізації та сформулював практичні рекомендації. Автор взяв участь у розробці технічного проекту та створенні нових експериментальних установок: листоправильної машини $9 \times 100 \times 250$, оснащеної механізмом вигину правильного ролика, взяв участь у проведенні експериментальних досліджень різних технологічних схем процесів правки в лабораторних і промислових умовах. Узагальнив результати теоретичних і експериментальних досліджень, взяв участь в їх впровадженні у співавторстві. Внесок здобувача в роботах, опублікованих разом зі співавторами, представлений в анотаціях до списку опублікованих праць за темою дисертації.

Апробація результатів дисертації. Основні положення та результати дисертаційної роботи доповідалися та обговорювали на міжнародних, всеукраїнських і регіональних науково-технічних (НТК) і науково-практичних (НПК) конференціях, у тому числі: міжнародних НТК (МНТК) з проблем дослідження та удосконалення технологій та обладнання обробки тиском 2014-2017 рр. (м. Краматорськ, ДДМА); X міжнародна конференція «Стратегія якості в промисловості та освіті» (м. Варна, Болгарія, 2014); II МНПК «Актуальні проблеми в машинобудуванні» (м. Новосибірськ, Росія, 2016); VI МНТК «Ресурсозбереження та енергоефективність процесів та обладнання обробки тиском у машинобудуванні та металургії» (м. Харків, 2014); на НТК професорсько-викладацького складу ДДМА (м. Краматорськ, 2015-2017 рр.); науковому семінарі при спеціалізованій раді Д 12.105.01 ДДМА (2017 р.); на III міжнародній конференції молодих учених і фахівців «Металургія XXI століття» (м. Москва, 2007).

Публікації. Матеріали та основні положення дисертаційної роботи опубліковані в 10 статтях з наукової тематики, з них 5 статей у фахових виданнях, у тому числі 2 – в зарубіжних виданнях, що входять до наукометричних баз, зокрема 1 стаття – до бази Scopus, також отримано 1 патент України і 3 патенти України на корисну модель.

Результати представленої дисертаційної роботи були отримані при сприянні професорсько-викладацького состава, співробітників і аспірантів кафедри «Автоматизовані машини та обладнання» Донбаської державної машинобудівної академії, інженерно-технічних працівників ПрАТ «Новокраматорський машинобудівний завод» і ряду інших підприємств. Автор щиро вдячний за допомогу, зроблену при виконанні робіт, а також за корисні ради, консультації та зауваження, які були та будуть враховані.

РОЗДІЛ 1

ОГЛЯД ТЕХНОЛОГІЙ, ОБЛАДНАННЯ, МЕТОДІВ РОЗРАХУНКУ І ПЕРСПЕКТИВИ РОЗВИТКУ БАГАТОРОЛИКОВИХ ЛИСТОПРАВИЛЬНИХ МАШИН (АНАЛІЗ СТАНУ ПИТАННЯ)

1.1 Дефекти форми листового металопрокату, фактори, що їх обумовлюють і способи усунення

Дефекти, пов'язані з порушенням форми та площинності готового металопрокату, можна умовно розділити на три основні групи, а саме на викривлення поперечного перерізу, викривлення по довжині і його скрученість (рис. 1.1) [1].

Викривлення поперечного перерізу спостерігається на всіх сортових і трубних профілях: круглому, квадратному, кутовому, зетовому, смуговому або прямокутному, двотавровому, швелерах, рейках, квадратній заготовці та інших.

До викривлень по довжині відносять усі відхилення від прямолінійності в поздовжньому напрямку. На листах і смугах ці відхилення класифікуються хвилястістю або коробуватістю, якщо вони перебувають в одній з площин, перпендикулярних поверхні листа, і серповидністю, якщо ці відхилення розташовані в площині листа (рис. 1.2) [1, 2].

Викривленість металу не тільки в поздовжньому, але й у поперечному перерізі характеризується жолобчатістю. Такий дефект може бути віднесений як до викривлення по довжині, так і до викривлення поперечного перерізу.

Неплощинність листової сталі оцінюється амплітудою A на базовій довжині 1 м, яка вимірюється на плоскому столі лінійкою або за допомогою приладів при відсутності натягіння (рис. 1.3). Для контролю форми тонких високоякісних листів застосовують контрольні плити з вакуумними присосками.

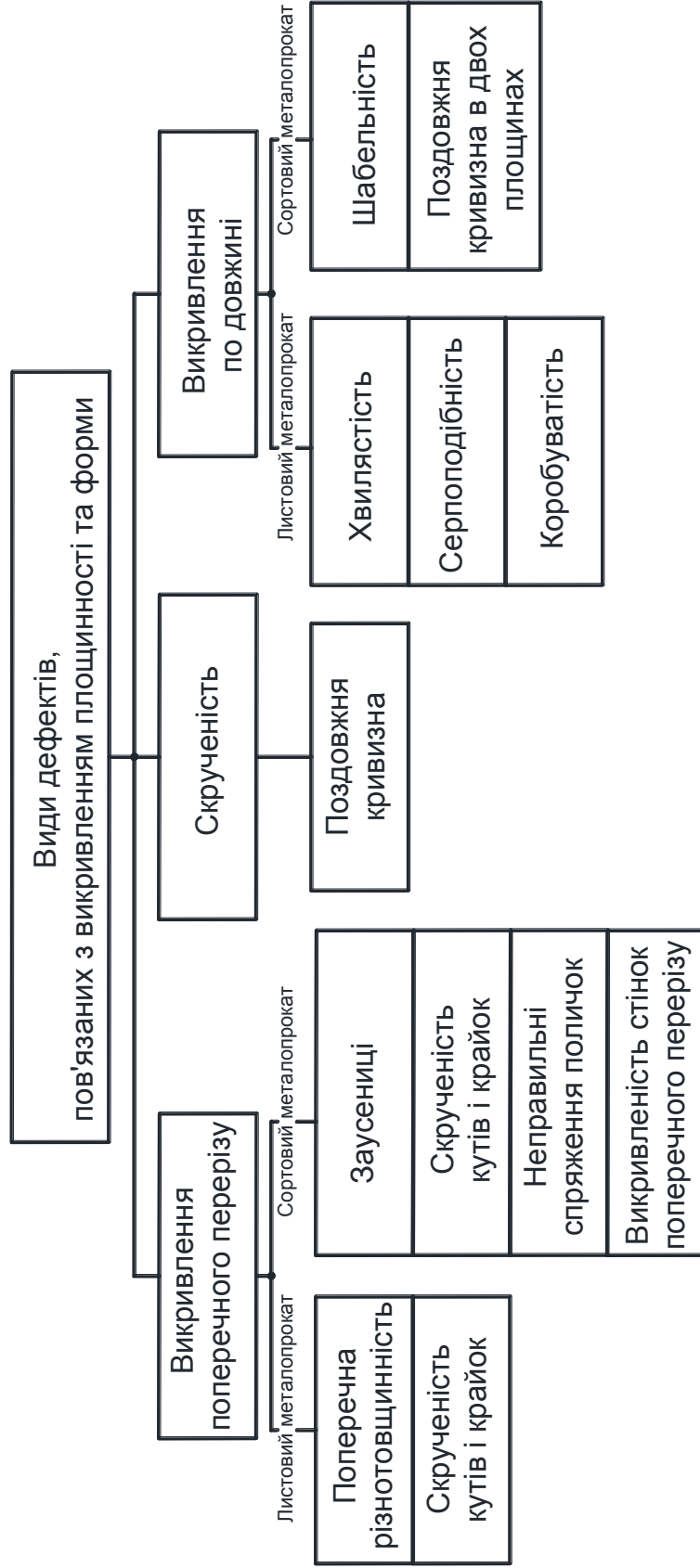
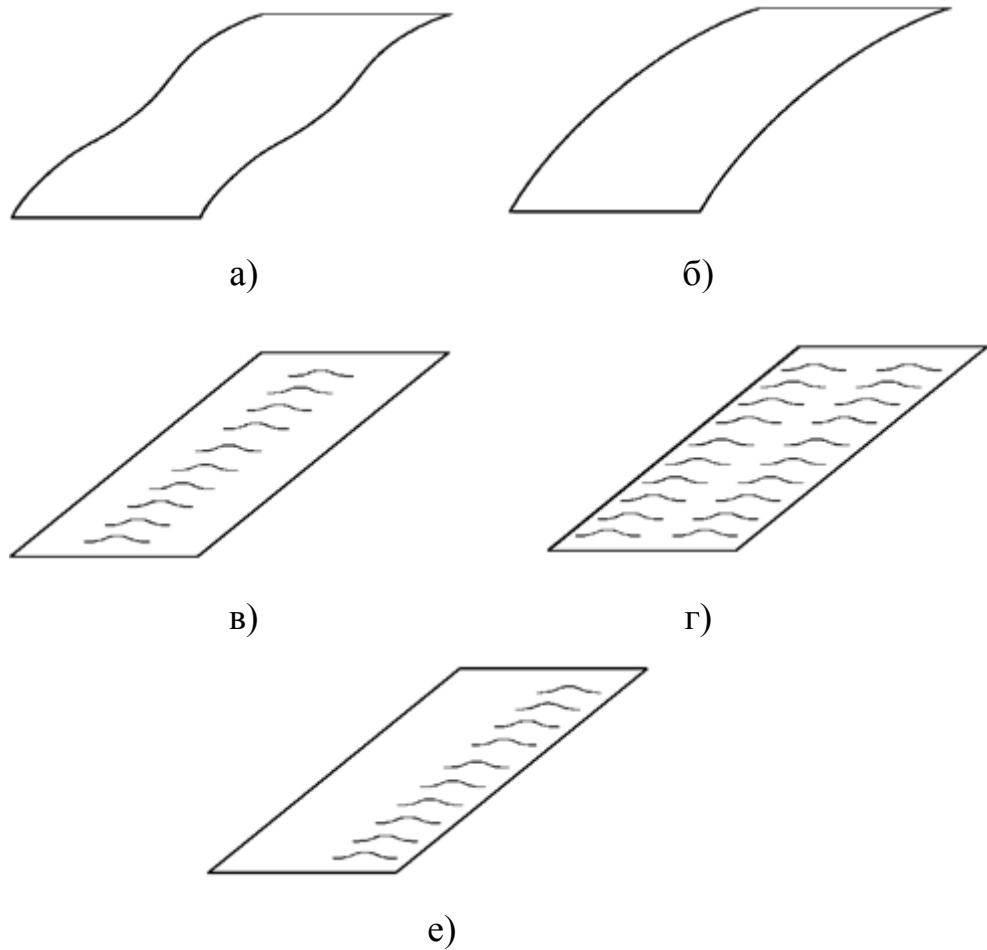


Рисунок 1.1 – Класифікація дефектів, пов'язаних з викривленням площинності та форм [1]



а – поздовжня кривизна; б – серповидність; в – коробуватість по центру;
 г – хвилястість по краях; д – хвилястість з одного краю

Рисунок 1.2 – Класифікація дефектів форми плоского металопрокату

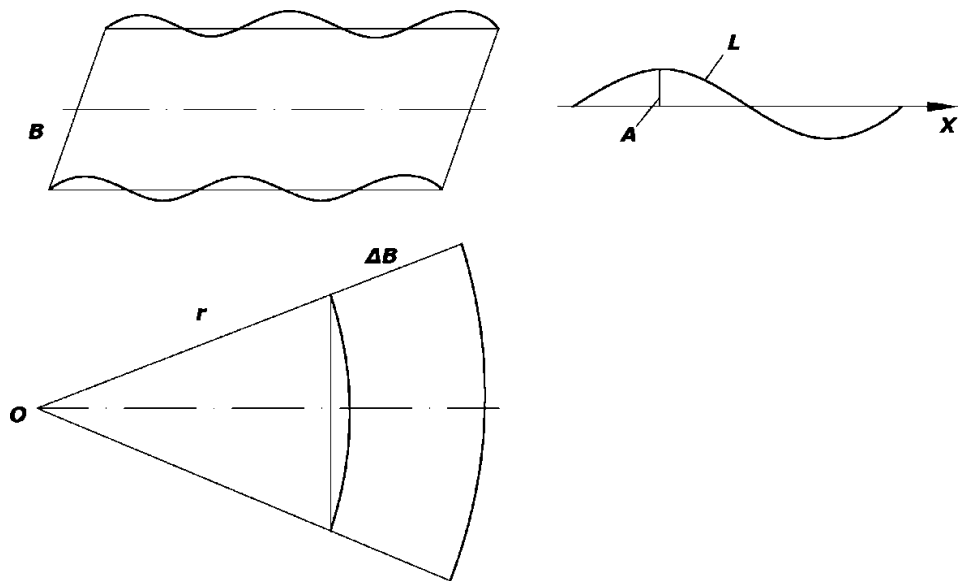


Рисунок 1.3 – Розрахункова схема до визначення параметрів дефектів
 площинності смуги

Кількісно форму Φ смуги визначають виразом [3]:

$$\Phi = \Delta l / (l_x b) \cdot 10^4, \quad (1.1)$$

де l_x – довжина ділянки смуги;

Δl – різниця довжин волокон по ширині смуги b .

Якщо величину Δl вимірювати на відрізку ширини смуги довжиною Δb , то параметр форми смуги рівний (див. рис. 1.3) [3]:

$$\Phi = \Delta l / (l_x \Delta b) = l_x / b. \quad (1.2)$$

Зміна параметра форми смуги чисельно дорівнює кривизні $1/r$ вирізаного елемента смуги. Параметр форми, що дорівнює одиниці, відповідає радіусу кривизни $r = 10^4$ м елемента шириною 1 м [3].

Класифікація різних видів дефектів площинності і їх оцінка наведена також у роботах [4...17]. Найбільш точні рішення для визначення кількісних характеристик дефектів отримані В.К. Пірсоном [3] шляхом апроксимації геометричних характеристик смуги синусоїдою, однак у зв'язку з використанням певних наближень застосування даних рішень при аналізі процесів правки утруднене, тому що приводить до завищення необхідної величини залишкового подовження.

Листи та смуги в рулонах шириною більше 500 мм розділяються на групи особливо високої площинності (ПО), високої (ПВ), поліпшеної (ПУ) і нормальної (ПН) площинності [2; 18].

Крім аналітичних методів кількісної оцінки показників площинності в літературі [19] пропонується статистичний аналіз ступеня площинності готового металопрокату, де за допомогою кореляційного та регресійного аналізу нормального розподілу випадкових величин відхилень від площинності пропонуються методи для керування точністю прокатки. Слід розрізняти прихо-

вану та видиму хвилястість. Прихована хвилястість спостерігається в безперервних станах холодної прокатки, де її не видно операторові через дію натяжінь. У цьому випадку вимір форми смуги заснований на вимірі непрямих параметрів хвилястості, а також питомих поздовжніх натяжінь по ширині смуги [2].

Площинність смуги – одна з найважливіших характеристик точності геометричних характеристик листової сталі та один з головних показників її технологічної придатності для наступної обробки в безперервних агрегатах цехів холодної прокатки та операцій листового штампування. Неплощинність і серповидність гарячекатаних штаб погіршують якість зварених швів, травмують штаби при змотуванні їх у рулон і розмотуванні на станах холодної прокатки. При холодній прокатці неплощинність утрудняє подачу смуги в стан і служить причиною обривів і утвору складок на смузі, що знижує довговічність робочих валків і зменшує продуктивність станів [4].

Необхідно відзначити, що всі дефекти поперечного перерізу можуть супроводжуватися викривленнями по довжині та скрученістю. На широких тонких листах коробоватість завжди представлена разом з хвилястістю [20], часто з серповидністю та багатьма іншими з перерахованих вище дефектів. На вузьких смугах коробоватість майже не зустрічається, але хвилястість їх майже завжди супроводжується серповидністю [1].

Основною причиною, що викликає появу дефектів, пов'язаних з порушенням форми та розмірів одержуваних виробів, є нерівномірність витяжок. До причин, що її обумовлюють, відносять нерівномірність нагрівання або охолодження при гарячій або наступній термічній обробці, неоднорідність механічних властивостей оброблюваного матеріалу, нерівномірність подачі технологічного змащення, нерівномірне зношування або недостатньо точне позиціонування інструментів (валків, пуансонів, роликів, оправлень, проводок та ін.), помилки при настроюванні агрегату, а також відхилення в розмірах і формі заготовок на попередніх технологічних операціях [1; 21; 22].

Представлена класифікація дефектів є умовною, вона необхідна для вибору раціональних засобів їх виправлення. Оскільки в дійсності на одному виробі може зустрічатися одночасна комбінація декількох дефектів, то при визначенні технологічних режимів і конструктивних параметрів використовуваного механічного устаткування слід зупинитися на найбільш універсальних машинах для реалізації процесу виправлення.

Однією з основних вимог, що висувається до продукції листових станів гарячої прокатки, є підвищення рівнів і ступеню стабільності механічних властивостей матеріалу гарячекатаних листів, при одночасному збереженні вимог щодо забезпечення високої площинності [1] (табл. 1.1...1.3). Зокрема, згідно з основними положеннями ГОСТ 19903-74 [23], світових стандартів (Євронорма EN 10029:91 [24] і стандарту США ASTM A6/A6M-91 b [25]) основними вимогами, які впливають і обов'язково повинні враховуватися при розробці технологій і устаткування процесу правки штаб і листів є:

Таблиця 1.1 – Граничні відхилення від площинності гарячекатаних товстих листів

Стандарт	Товщина листа, мм	Вид площинності	Відхилення в мм на базі 1 м, не більш	Відхилення в мм на базі 2 м, не більш
1	2	3	4	5
ГОСТ 19903-74 для сталі з межою плинності до 700 МПа [23]	Будь-яка	Особливо	5	-
		Висока	8	-
		Поліпшена	10	-
		Нормальна	12	-
EN 10029:91, для сталі з межою плинності до 460 МПа (сталь L) [24]	3...8 при b < 2750	Підвищена, клас S	4	8
	3...8 при b > 2750		5	10
	8...250		3	6
	5...8	Нормальна, клас N	8	12
	8...15		7	11
	15...25		7	10
	25...40		6	9
	40...250		5	8

Продовження табл. 1.1

1	2	3	4	5
EN 10029:91, для сталі з межою плинності від 460 МПа до 700 МПа (сталь Н) [24]	Будь-яка	Підвищена, клас S	Узгодження при замовленні	
	5...8	Нормальна, клас N	11	15
	8...15		10	14
	15...25		10	13
	25...40		9	12
40...250		8	11	

Таблиця 1.2 – Граничні відхилення по ширині гарячекатаних товстих листів

Стандарт	Ширина прокату, мм	Товщина прокату, мм	Граничні відхилення по ширині прокату, мм
ГОСТ 19903-74 [23]	до 1500 понад 1500	Понад 3,9 до 16	+ 10 + 15
	усі ширини	понад 16 до 60 понад 60 до 100 понад 100 до 160	+25 +50 +75
EN 10029:91 [24]	Від 600 до 2000	Будь-яка	0...+20
	Від 2000 до 3000		0...+25
	Більш 3000		0...+30

Таблиця 1.3 – Граничні відхилення по товщині гарячекатаних товстих листів [79-81]

Для товщин листів, мм		Мінусовий допуск, мм				Плюсовий допуск, мм			
від	до	ГОСТ [23]	EN для класу А [24]	EN для класу В [24]	ASTM [25]	ГОСТ при різних ширин листів [23]	EN для класу А [24]	EN для класу В [24]	ASTM для різних ширин [25]
12	15	-0,8	-0,5	-0,3	-0,3	+0,2...1,4	+1,2	+1,4	+0,8...+1,8
15	25		-0,6				+1,3	+1,6	+0,2...+2,2
25	30	-0,9	-0,8			+0,2...+1,6	+1,4	+1,9	+1,0...+2,4
30	34	-1,0				+0,2...+1,7			+1,2...+2,6
34	40	-1,1				+0,3...+1,8			+1,3...+3,3
40	50	-1,2				-1,0			+0,4...+1,9

Продовження табл. 1.3

50	60	-1,3				+0,6...+1,9			+2,0...+4,0
60	70	-1,6				+0,7...+1,9			+2,5...+4,0
70	80	-2,2				+0,7...+1,9			+2,8...+4,0
80	90	-2,5				+0,8...+2,0			+3,0...+4,4
90	100	-2,7				+0,9...+2,1			+3,3...+4,4
100	115	-3,1				+1,1...+2,3			+3,5...+4,8
115	125	-3,5				+1,4...+2,6			+3,8...+5,2
125	140	-3,8				+1,6...+2,9			+4,0...+5,6
140	150	-4,2				+1,9...+3,1			+4,5...+5,6
150	160		-1,2				+2,4	+3,3	

– граничні відхилення від площинності готових листів після правки (табл. 1.1);

– граничні відхилення по ширині листів з обрізною крайкою (табл. 1.2);

– граничні відхилення по товщині прокату, що поступає на правку (табл. 1.3).

Гранична серповидність гарячекатаних листів, відповідно до рекомендацій [23], узгоджується між виготовлювачем і споживачем, але не повинна перевищувати 2 мм на 1 м довжини.

Відхилення від площинності, що наведені в таблиці 1.1 [23], поширюються на листи зі сталі з $\sigma_s < 700$ МПа. Для листів з $\sigma_s > 700$ МПа норми встановлюються в стандартах на загальні технічні вимоги або в технічних умовах. У стандарті ASTM A6/A6M-91b площинність виміряється по всій ширині листа або уздовж його довжини на базі 4000 мм, залежить від типу сталі (вуглецева або легувана), номінальної товщини та ширини листів [25]. Додатково виміряється хвилястість, яка залежить від товщини листів і числа хвиль на довжині 4000 мм (від 1-ї до 7-ми хвиль).

В Євронормі [24] допуски на товщину визначають клас листа, що випускається (А, В, С або D) і не залежать від ширини листів. Допуски на товщину для листів класів С і D у таблиці 2.3 не показані (у класі С мінусовий допуск дорівнює нулю, а в класі D мінусовий допуск рівний плюсовому по абсолютній вели-

чині). Додатково в нормативах [24] обмежується різниця між найбільшою та найменшою товщинами на конкретному листі, яка залежить від їхніх номінальних товщини та ширини.

Взагалі, виробники листів для економії металу намагаються працювати в мінусовому полі допусків (від «- Δ » до нуля), тому плюсовий допуск стає не актуальним.

Плюсовий допуск на товщину листів, у стандарті ASTM A6/A6M-91b [25] залежить від номінальних товщини та ширини листів і є більш широким, ніж допуски ГОСТ 19903-74. У той же час, мінусовий допуск у даному стандарті суттєво жорсткіше та складає 0,3 мм для будь-яких листів. Граничні відхилення по ширині листів у цьому випадку залежать від типу сталі, способу обрізки країв, товщини, ширини та довжини листів.

1.2 Склад і конструктивні особливості обладнання для правки листів і штаб

По технологічних ознаках все устаткування для правки листів і смуг підрозділяють на наступні основні групи: машини для правки вигином, розтягуванням, малими поверхневими деформаціями, а також різними комбінаціями перерахованих операцій – так звані комбіновані машини (рис. 1.4) [26].

Найбільш широке поширення для правки листів і штаб одержали багатороликові машини [26...31], правка в яких здійснюється багаторазовим знакозмінним вигином смуги між розташованими в шаховому порядку робочими роликками. При цьому в зовнішніх волокнах смуг виникають напруження, що сягають межі плинності. Ефективність правки металу на роликкових правильних машинах залежить від діаметра та кроку робочих роликів, їх кількості, швидкості правки та ін. Найбільше ефективно на цих машинах усувається хвилястість і поздовжня кривизна гарячекатаних листів і штаб.

У ряді випадків виправити штабу знакозмінним вигином на роликкових правильних машинах не вдається, особливо при товщині прокату до 1 мм і при

наявності нерівномірно розподілених по ширині дефектів площинності. У цих випадках використовують правку розтягуванням, сутність якої полягає в тому, що при розтягуванні листа деформація коротких волокон перевищує деформацію довгих, переходить в пластичну і відбувається вирівнювання волокон металу по довжині прокату.



Рисунок 1.4 – Класифікація обладнання для правки листового металопрокату [27]

Правка розтягуванням забезпечує високу якість правки листів і смуг з матеріалів, для яких відношення межі міцності до межі плинності перевищує 1,2 [32...36].

Правку листів розтягуванням виконують у гідравлічних розтяжних машинах з рухливими затискачами, що мають невисоку продуктивність. У наш час створені та перебувають у промисловій експлуатації високопродуктивні установки для безперервної правки розтягуванням тонких смуг [37-39].

Правку малими поверхневими деформаціями проводять шляхом дресирування у валках з регульованим профілем міжвалкового зазору. Форму між-

валкового зазору регулюють відповідно до характеру дефектів на смузі проти-згином, тепловим профілюванням або зміною положень секцій опорних роликів [32; 37; 38].

Комбінованими називаються способи, при яких в одній операції сполучають більш прости технологічні схеми правки. Серед комбінованих способів правки найпоширенішою є правка розтягуванням зі згином (див. рис. 1.4) [34; 40-45].

Правка в багатороликових машинах здійснюється шляхом переміщення прокату, що виправляється, між приводними обертовими роликами, розташованими з перекриттям у шаховому порядку [1; 18; 29; 30].

Застосовують два види налаштування роликів: уздовж (рис. 1.5) і поперек (рис. 1.6) осі правки [1].

Машини з груповим паралельним налаштуванням уздовж осі (див. рис. 1.5, а) застосовують для гарячої правки листів при відсутності підвищених вимог по прямолінійності.

Групове налаштування нахилом (див. рис. 1.5, б) використовують, переважно, при виправленні тонких листів і смуг у холодному стані, як і комбіноване налаштування з нахилом крайніх секцій роликів (див. рис. 1.5, д), яке, у порівнянні з попереднім, дозволяє забезпечувати більш високу сумарну деформацію, що розширює технологічні можливості машини [1; 27].

При комбінованому паралельному налаштуванні (див. рис. 1.5, в) полегшується задавання листів у машину і є можливість регулювати прогин листа, що сприяє стабільності результатів правки в порівнянні з груповим налаштуванням. Таке налаштування застосовують переважно для холодної та гарячої правки товстих листів.

Індивідуальне налаштування роликів (див. рис. 1.5, г) дає можливість регулювати вигин листа під кожним роликом. Його використовують на машинах з досить великим кроком роликів.

Паралельне поперечне налаштування роликів верхнього та нижнього ряду (див. рис. 1.6, а) розраховане на правку поздовжньої кривизни листа. Для правки інших дефектів, характерних для листів і смуг, зокрема, коробуватості,

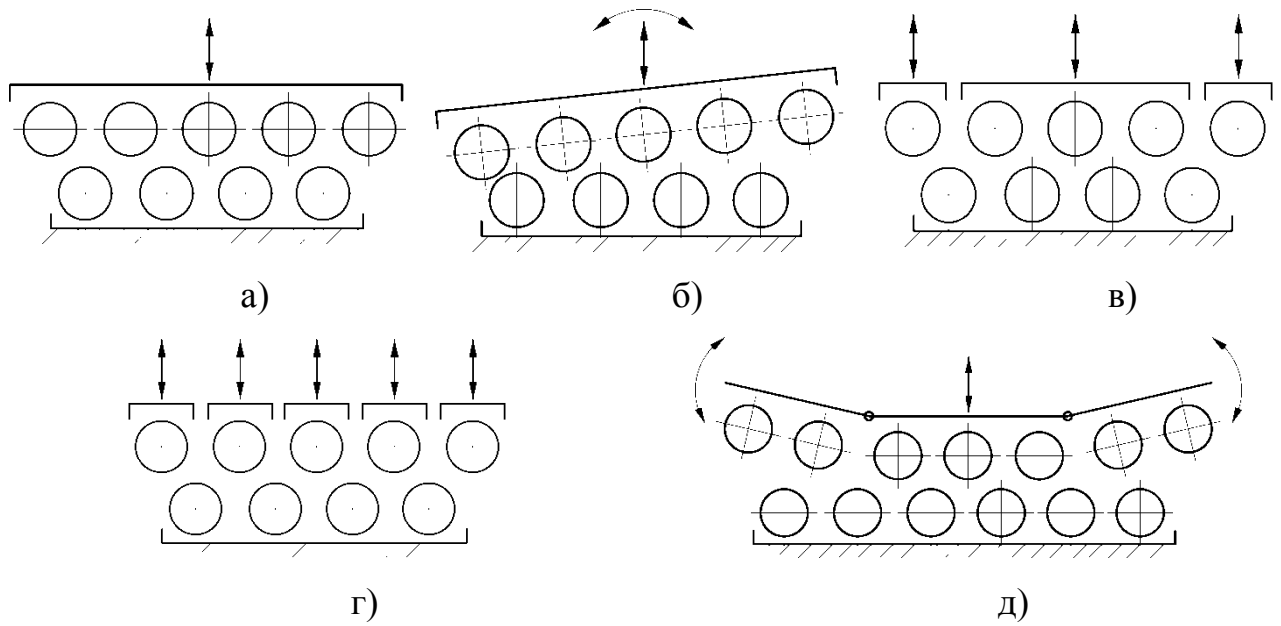


Рисунок 1.5 – Схема поздовжнього налаштування роликів: а – паралельне; б – похиле; в – групове з незалежним налаштуванням вхідного та вихідного роликів; г – індивідуальне; д – тризонне

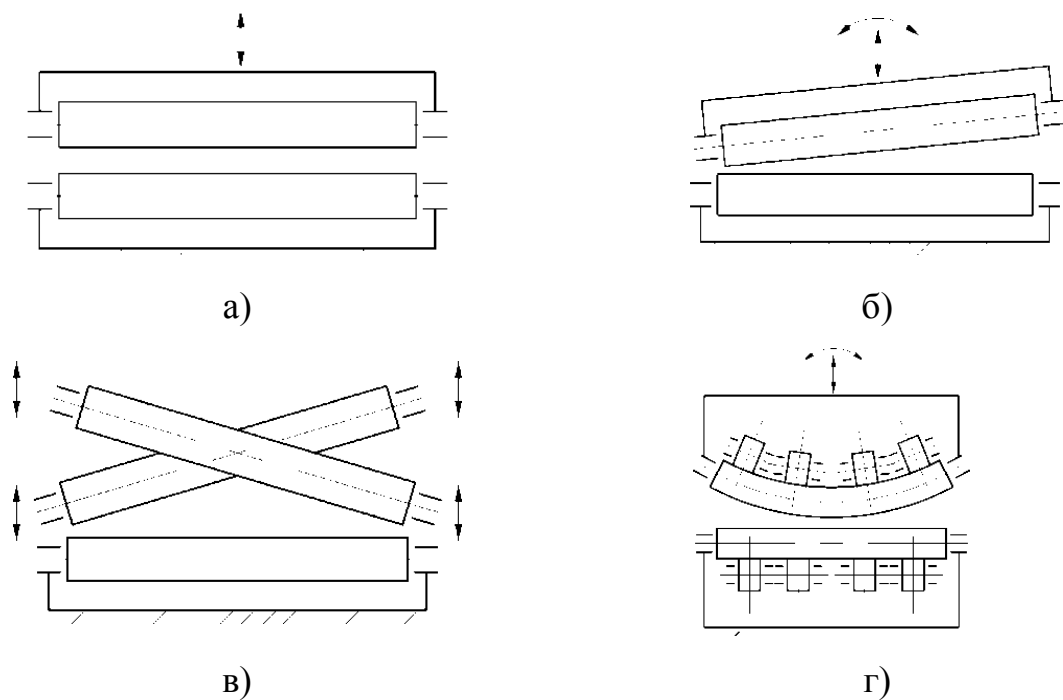


Рисунок 1.6 – Схема поперечного налаштування роликів:
а – паралельне; б – спільний поперечний нахил;
в – незалежний поперечний перехрест; г – прогин роликів

необхідно, щоб деформації вигину нерівномірно розподілялися по ширині [1; 27].

Груповий поворот роликів одного ряду відносно осі правки (див. рис. 1.6, б) або індивідуальний поворот кожного з роликів (див. рис. 1.6, в) створює неоднакові деформації по крайках смуги.

Більш широкі можливості для варіювання розподілом деформацій по ширині смуги дає вигин робочих роликів (див. рис. 1.6, г) У комбінації з поперечним поворотом таке налаштування дозволяє виправляти різні види коробуватості. Вигин робочих роликів здійснюють за допомогою декількох секцій опорних роликів, оснащених відповідними механізмами налаштування.

У даний час на металургійних комбінатах застосовуються різні методики налаштування листопробірних машин (ЛПМ) залежно від товщини та межі плинності металу, що виправляється.

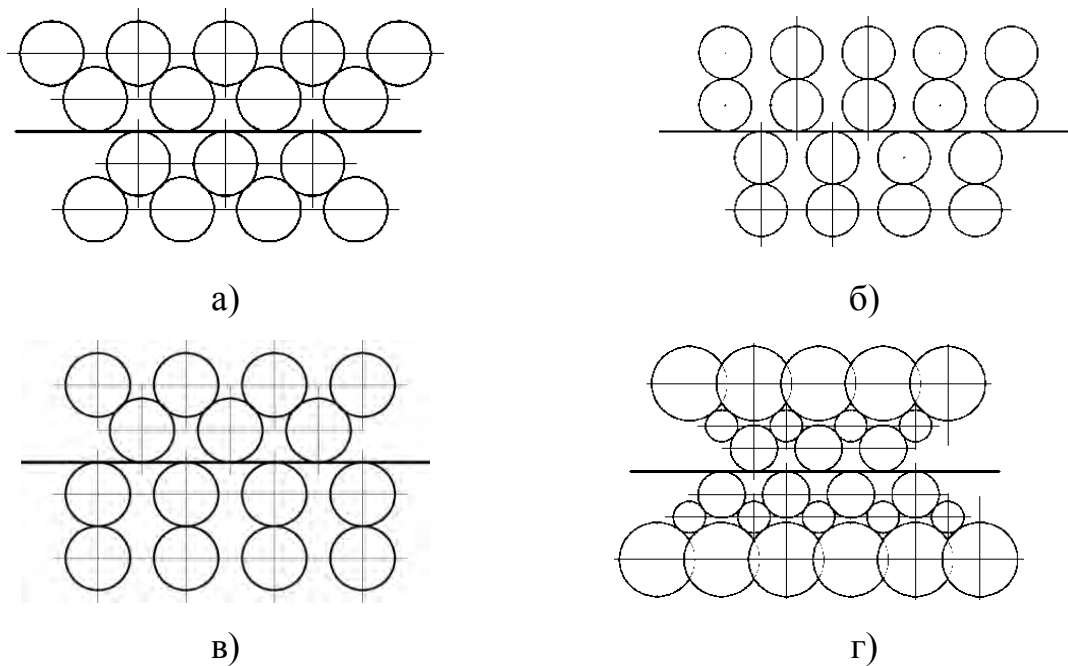
У машинах для правки листів великої ширини з метою забезпечення міцності робочого ролика і його підшипникових опор робочу кліть оснащують опорними роликами, схеми установки яких наведено на рисунку 1.7/

Уздовж осей робочих роликів, як правило, встановлюють кілька рядів опорних роликів. Один робочий ролик може мати один, два, три та більше опорних, причому в останньому випадку опорні ролики виконані у вигляді дисків, їх число може перевищувати 10.

Шахове розташування опорних роликів відносно робочих (див. рис. 1.7, а) найпоширеніше, тому що забезпечує сприйняття як вертикальних, так і горизонтальних навантажень, що діють на робочі ролики. Машини з шаховим розташуванням опорних роликів застосовують зазвичай для холодної правки листів, що не мають окалини [1; 27].

Попарне (опозитне) розташування опорних і робочих роликів (див. рис. 1.7, б) застосовують, переважно, у машинах гарячої правки, завдяки чому забезпечується вільне видалення окалини.

Змішане розташування опорних і робочих роликів (див. рис. 1.7, в) використовують у машинах для холодної правки листів з окалиною.



а – шахове; б – опозитне; в – змішана; г – із проміжними роликами

Рисунок 1.7 – Схеми розташування опорних роликів

Наявність проміжних роликів (див. рис. 1.7, г) виключає на поверхні робочих роликів сліди контакту з опорними роликами, які відбиваються на листі, що обробляється.

Багатороликові правильні машини для правки листового металопрокату відрізняються великою різноманітністю конструктивних рішень. Для правки товстих листів застосовують правильні машини з числом робочих роликів 7-11. Для правки тонких листів і смуг число робочих роликів становить 17 і більше [1; 26; 27; 29].

По конструкції вузла станин розрізняють машини станинного та колонного типу. У машинах станинного типу робочі та опорні ролики в траверсах, аналогічно прокатній кліті, розташовуються у вікнах станин. У листопробильних машинах зі станиною колонного типу роль станини виконують чотири колони, на яких розміщені траверси з роликівими вузлами [30].

Паралельне або похиле налаштування роликів здійснюється, як правило, переміщенням верхніх траверс за допомогою натискних механізмів. У старих

машинах використовуються електромеханічні, а в сучасних – переважно гідравлічні механізми установки. Незважаючи на широке поширення та постійне вдосконалення, електромеханічні натискні пристрої мають наступні недоліки: незадовільна відтворюваність, низька точність, надмірна інерційність, складності комбінації з автоматизованою системою керування технологічним процесом, а також відсутність запобіжних функцій при перевантаженнях. Гідравлічні механізми установки роликів цих недоліків позбавлені [26; 27; 46-50].

Для індивідуального налаштування використовуються додаткові механізми установки роликів.

На рисунках 1.8, 1.9 представлена конструкція листопрямильної машини станинного типу з паралельним налаштуванням робочих роликів електромеханічним натискним механізмом з можливістю індивідуального налаштування вхідного та вихідного роликів [27]. Кожний робочий ролик має два опорні, загальне розташування опорних роликів попарне.

Такий тип машин до 80-х років минулого століття був найпоширеніший для попередньої правки відносно товстих листів у гарячому стані [29-30].

У машинах з похилими налаштуваннями найбільшу деформацію матеріалу дають перші по ходу ролики. Далі, у міру переміщення листа, прогин його зменшується та в останніх роликів кривизна виправляється. Незважаючи на те, що рівень залишкових внутрішніх напружень у цьому випадку в порівнянні з описаними раніше технологіями суттєво нижче, машини з похилими налаштуваннями мають істотний недолік, а саме, відсутність можливості зміни взаємного положення роликів відносно траверси [30].

Якість правки залежить також від кількості перегинів листа в правильній машині та від ступеня деформації штаби при реалізації кожного з них [1; 51; 52].

На рисунку 1.10 показана 17-роликів листопрямильна машина з похилим налаштуванням роликів 1-4×1700 колонного типу для правки тонких листів (1...4 мм) шириною до 1500 мм і довжиною 2...4 м [29]. У машині передбачено 17 робочих роликів (9 у верхньому ряді та 8 у нижньому) діаметром

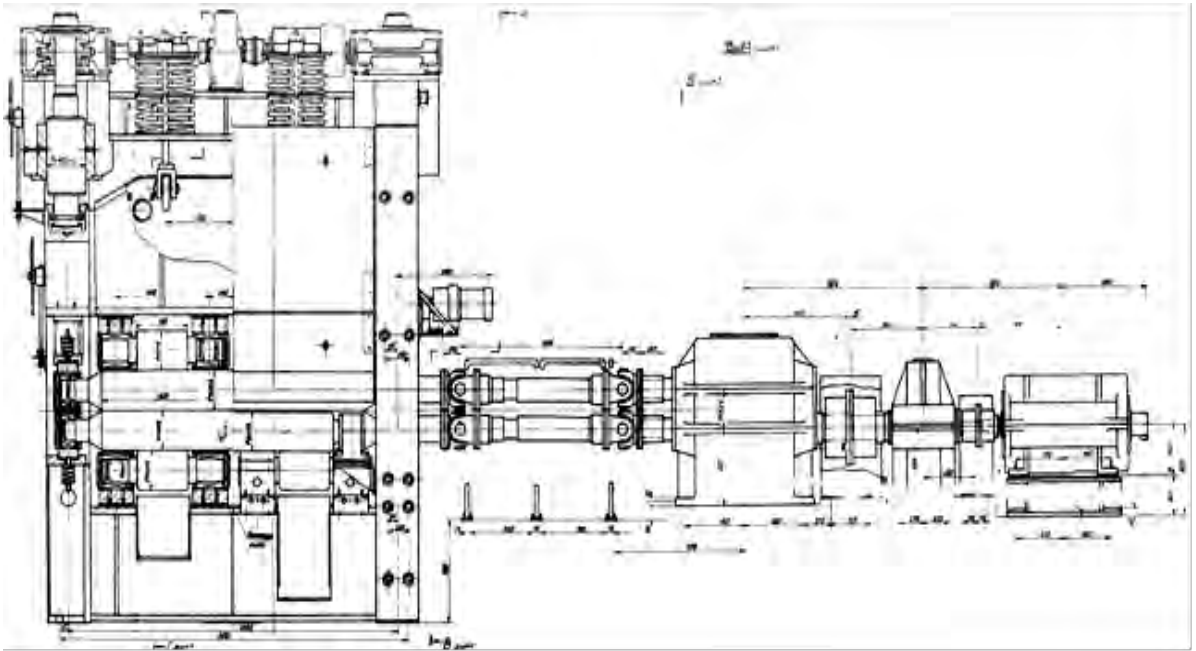


Рисунок 1.8 – Конструкція машини листоправильної $9 \times 300 \times 2800$, вид по головній лінії кліті [29]

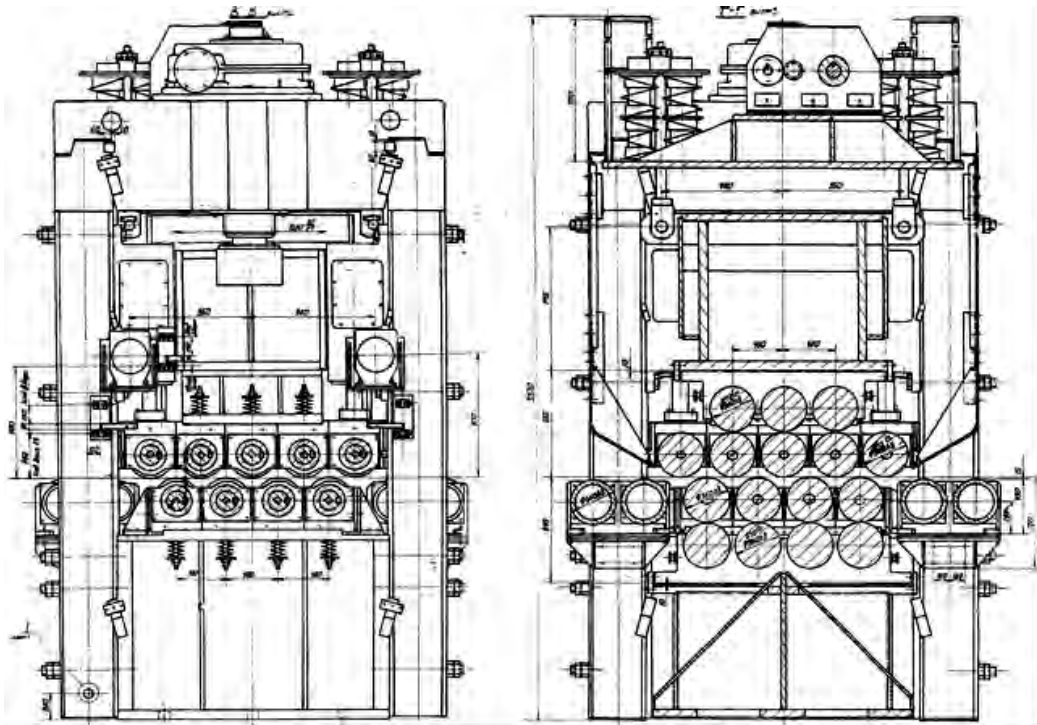


Рисунок 1.9 – Конструкція 9-роlikової листоправильної машини $9 \times 300 \times 2800$, вид з боку обслуговування та переріз по роliках [29]

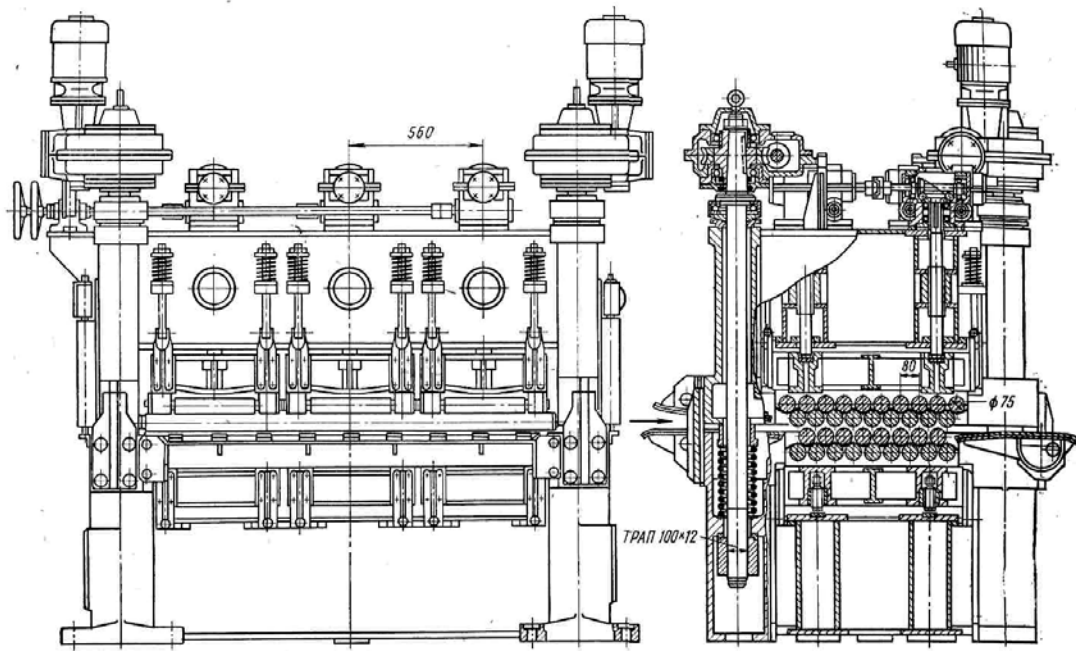


Рисунок 1.10 – Конструкція 17-роликової листоправильної машини [29]

75 мм (довжина бочки 1700 мм, крок роликів 80 мм). У цій конструкції опорні ролики розташовані в шаховому порядку відносно робочих.

Таке розташування слід вважати більш раціональним для машин, у яких діаметр робочих роликів невеликий, тому що при цьому досягається більша стійкість робочих роликів у горизонтальній площині. Опорні ролики (57 шт.) розташовані в три ряди по довжині бочки робочих роликів, розташування опорних роликів шахове; діаметр опорних роликів 75 мм, довжина бочки 350 мм. Опускання верхньої траверси та натиск роликів на лист здійснюються чотирма натискними гвинтами, кожний з яких приводиться від окремого електродвигуна. Підйом верхньої траверси здійснюється чотирма пружинами, розташованими внизу в станині. Індивідуальний привод кожного гвинта дає можливість змінювати нахил траверси у двох напрямках, що необхідно для підвищення точності правки окремих листів. Крім того, для підвищення точності правки передбачена можливість попереднього місцевого прогину робочих роликів, причому для кожного ряду опорних роликів передбачене окреме регулювання. Для цього опорні ролики кожного одного окремого ряду встановлені в окремій

траверсі, яка може переміщатися натискними гвинтами з ручним приводом штурвалів. Регулювання нахилу всієї верхньої траверси та підтискання кожного ряду опорних роликів дозволяє правити окремі листи з різною хвилястістю, а також місцеву коробуватість, що є перевагою конструкції цієї машини.

Одним з істотних недоліків описаних традиційних листопробірних машин є можливість реалізації технологічного процесу в обмеженому діапазоні товщин [27; 46-48].

Відомі конструктивні рішення, при реалізації яких машина оснащується двома групами роликів різного діаметра та кроку, змонтованими на загальній рухомій траверсі. Така машина може правити тонкий метал першою групою роликів (меншого діаметра), а більш товстий метал – другою групою, що має більший діаметр і крок [1; 46-48]. Оскільки машина не має індивідуально регульованих роликів, така конструкція здатна реалізувати похиле технологічне налаштування.

Для того, щоб збільшити кількість роликів, що передають листу найбільші деформації вигину та поліпшити задавання листа, американська фірма «Sutton» запропонувала машину з подвійним кутовим налаштуванням (рис. 1.11) [52]. Робочі ролики цієї машини розташовуються в трьох зонах. Схему розташування роликів і розподіл кривизни по зонах правки показано на рисунку 1.12.

Такі машини застосовують для прецизійної правки листів і смуг з чорних і кольорових металів товщиною від 0,025 до 20 мм [52].

На рисунку 1.13 показаний загальний вид листопробірної машини стану 2300/1700 ПАТ «Челябінський металургійний комбінат». Машина має 11 робочих пробірних роликів діаметром 280 мм, розташованих з кроком 300 мм. Залежно від товщини листів може бути реалізовано дві схеми налаштування, а саме, одинадцятироликівна схема – для правки тонких листів і п'ятироликівна – для правки відносно товстих і середніх по товщині листів. Завдяки наявності механізму горизонтального зсуву нижньої касети в напрямку

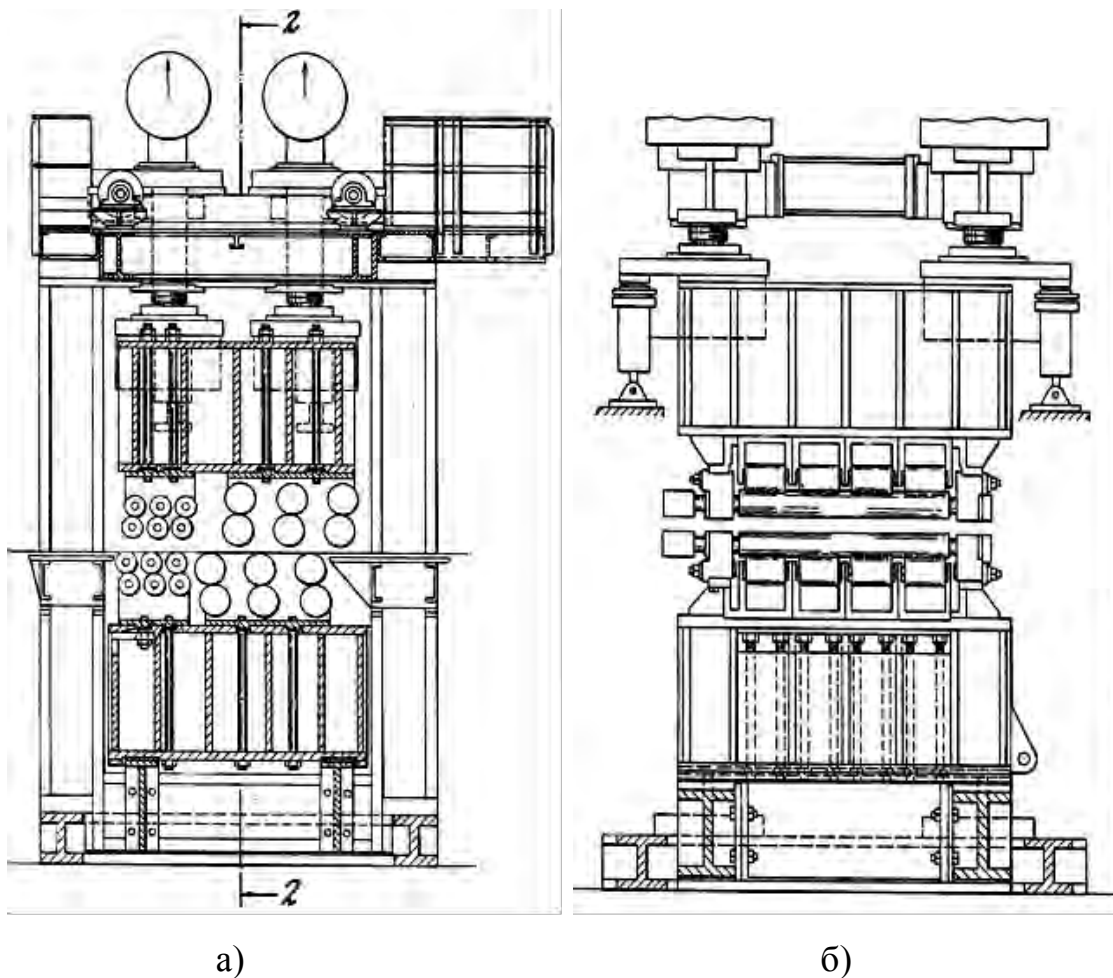


Рисунок 1.11 – Конструкція листопрямуючої машини [52]:

а – загальний вигляд; б – поздовжній розріз по роликах

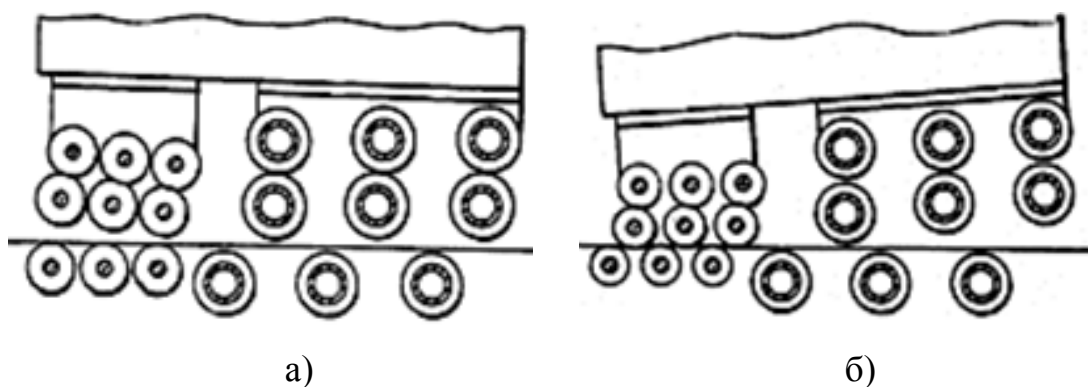


Рисунок 1.12 – Налаштування листопрямуючої машини [52]:

а – схема правки товстого листа; б – схема правки тонкого листа

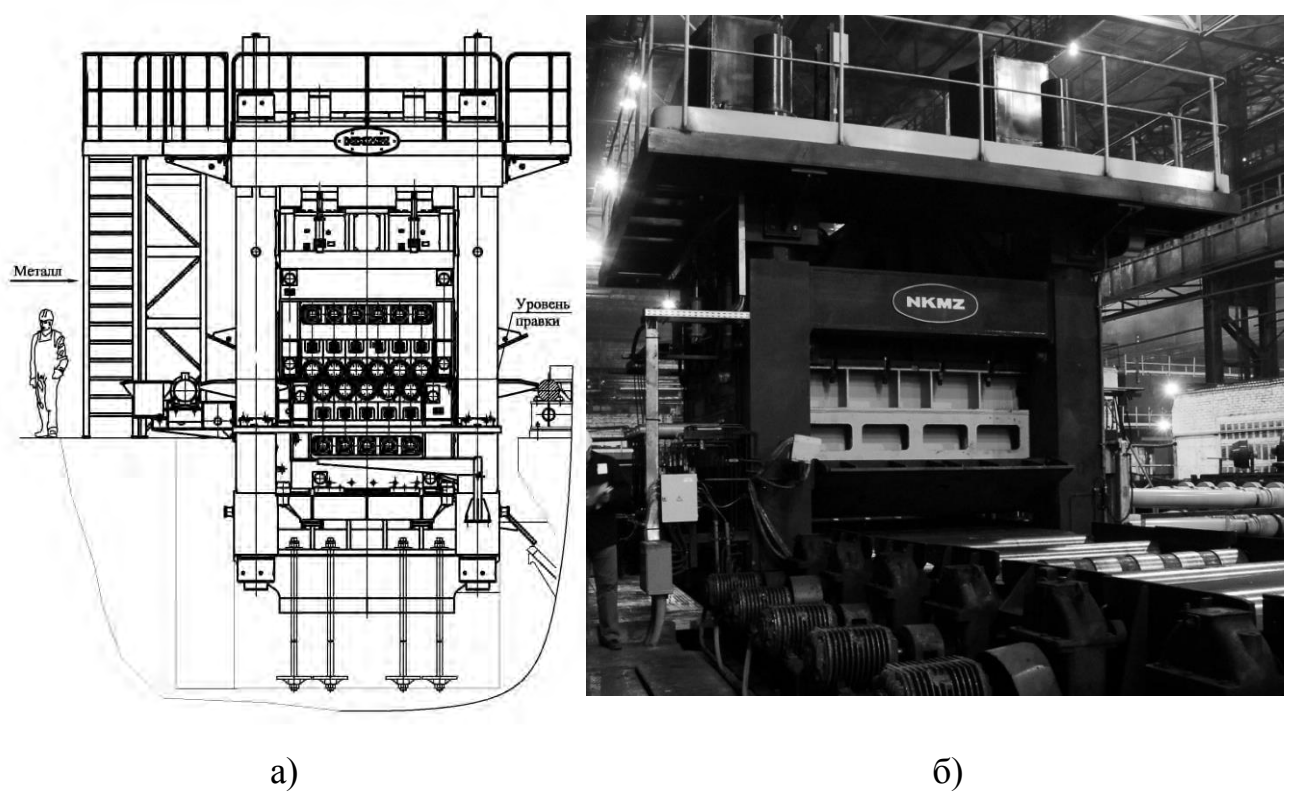


Рисунок 1.13. Конструкція ЛПМ стану 2300/1700 ПАТ «Челябінський металургійний комбінат»: а – загальний вигляд машини; б – фото в лінії стану

проходження оброблюваного металу, а також наявності механізмів індивідуального налаштування вертикальних положень правильних роликів, створена можливість мобільного переналагодження машини з 11-роlikової схеми правки на 5-роlikову, що дозволяє збільшити радіус вигину листів і тим самим розширити діапазон товщин металопрокату, що обробляється, а також створити ефективні технологічні параметри вигину, що, у свою чергу, підвищує якість одержуваної готової металопродукції.

На рисунку 1.14, а показана 9-роlikова ЛПМ колонного типу фірми Danieli для правки товстих листів, що оснащена гідравлічними натискними механізмами та гідравлічними приводами індивідуальних налаштувань кожного з робочих роликів [53]. Асинхронна робота передньої та задньої по ходу правки пари натискних гідроциліндрів дозволяє здійснювати поздовжнє похиле налаштування роликів, а правої та лівої по ходу правки пари – поперечне.

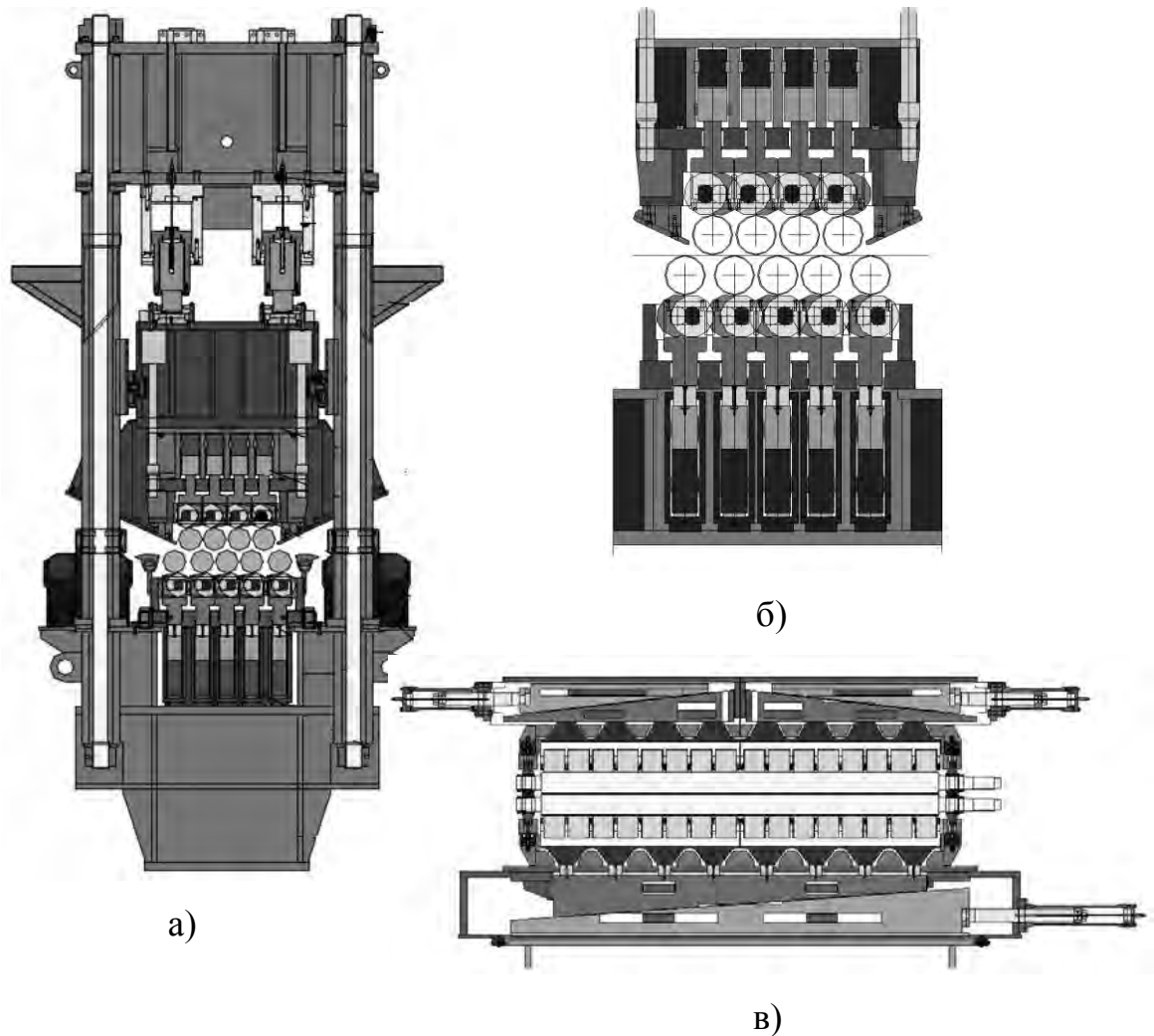


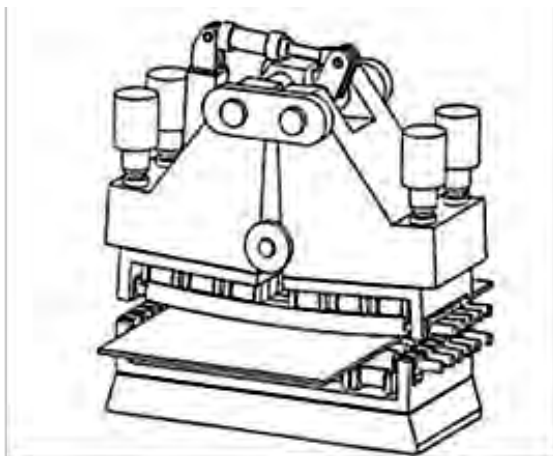
Рисунок 1.14 – Конструкція 9-роlikової листоправильної машини фірми Danieli для холодної правки товстих листів: а – загальний вид машини; б, в – вузол роликів із клиновими механізмами індивідуального налаштування

Кожний робочий ролик опирається на вісім пар опорних дисків, установлених зі зсувом у різні боки від його осі (див. рис. 1.14, б). У ЛПМ є можливість індивідуального налаштування кожного ролика за допомогою клинових пар, установлених над касетами верхніх і під касетами нижніх опорних дисків, які приводяться кожна від індивідуального гідроциліндра (див. рис. 1.14, б, в). Причому над верхніми роликами встановлені по два клини з зустрічним нахилом, що дозволяє здійснювати індивідуальне поперечне похиле налаштування роликів.

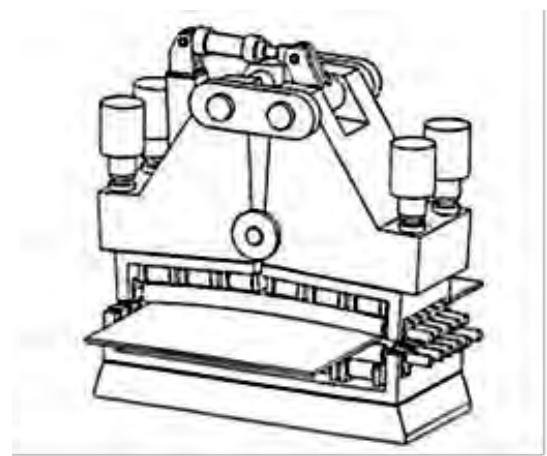
Одним з сучасних напрямків у розвитку процесів правки листового прокату є усунення дефектів площинності, нерівномірно розподілених по ширині листів. У світовій практиці ця задача вирішується вигином одного або декількох робочих роликів по довжині бочки за допомогою існуючих або додаткових механізмів (див. рис. 1.6, г).

Принципова можливість таких налаштувань є в конструкціях ЛПМ з індивідуальним налаштуванням опорних роликів (див. рис. 1.11, 1.12). Однак діапазон регулювання таких конструкцій досить обмежений.

У наш час на багатьох листопробірних машинах знайшла застосування конструкція фірми SMS DEMAG з «ламкою» верхньою траверсою, схема якої представлена на рисунку 1.15 [54]. Основною перевагою описуваної конструкції є можливість поздовжнього вигину правильних роликів для правки як центральної, так і кромочної хвилястості.



а)



б)

Рисунок 1.15 – Конструкція листопробірної машини фірми SMS DEMAG [54]:
а – вигин роликів для правки центральної хвилястості; б – вигин роликів для
правки кромочної хвилястості

До недоліків цієї конструкції слід віднести низьку навантажувальну здатність даної схеми, тому що найбільш навантаженим елементом є вісь, навколо якої відбувається поворот частин верхньої траверси.

У ряді випадків застосовуються механізми примусового вигину робочого ролика, дискретно розташовані по довжині бочки. На рисунку 1.16 показана конструкція 11-роlikової правильної машини фірми Fagor Arrasate (Іспанія) з механізмом вигину нижніх робочих роликів у вигляді п'яти рухливих упорів, розміщених під касетами опорних роликів-дисків [55].

Аналогічна схема (рис. 1.17) з використанням гідроциліндрів вигину робочого ролика наведена в роботі [56].

Характер настроювань роликів залежно від виду дефекту, що виправляється (табл. 1.4) наведений у роботі [57].

У комбінації з розвиненими системами керування, візуалізації та діагностики, розглянуті ЛПМ дозволяють вирішувати питання підвищення якості листового металопрокату на сучасному рівні.

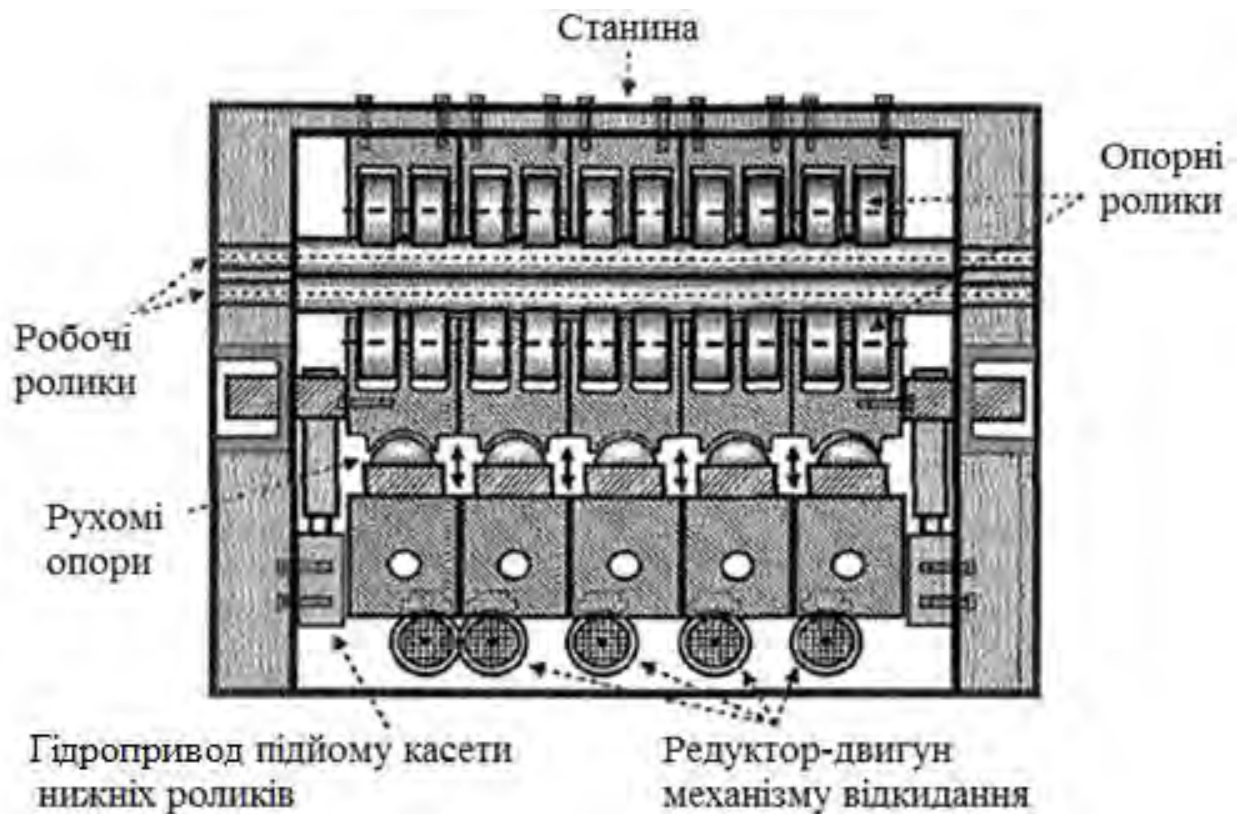


Рисунок 1.16 – Роликівий вузол 11-роlikової листопрямуючої машини фірми Fagor Arrasate [55]

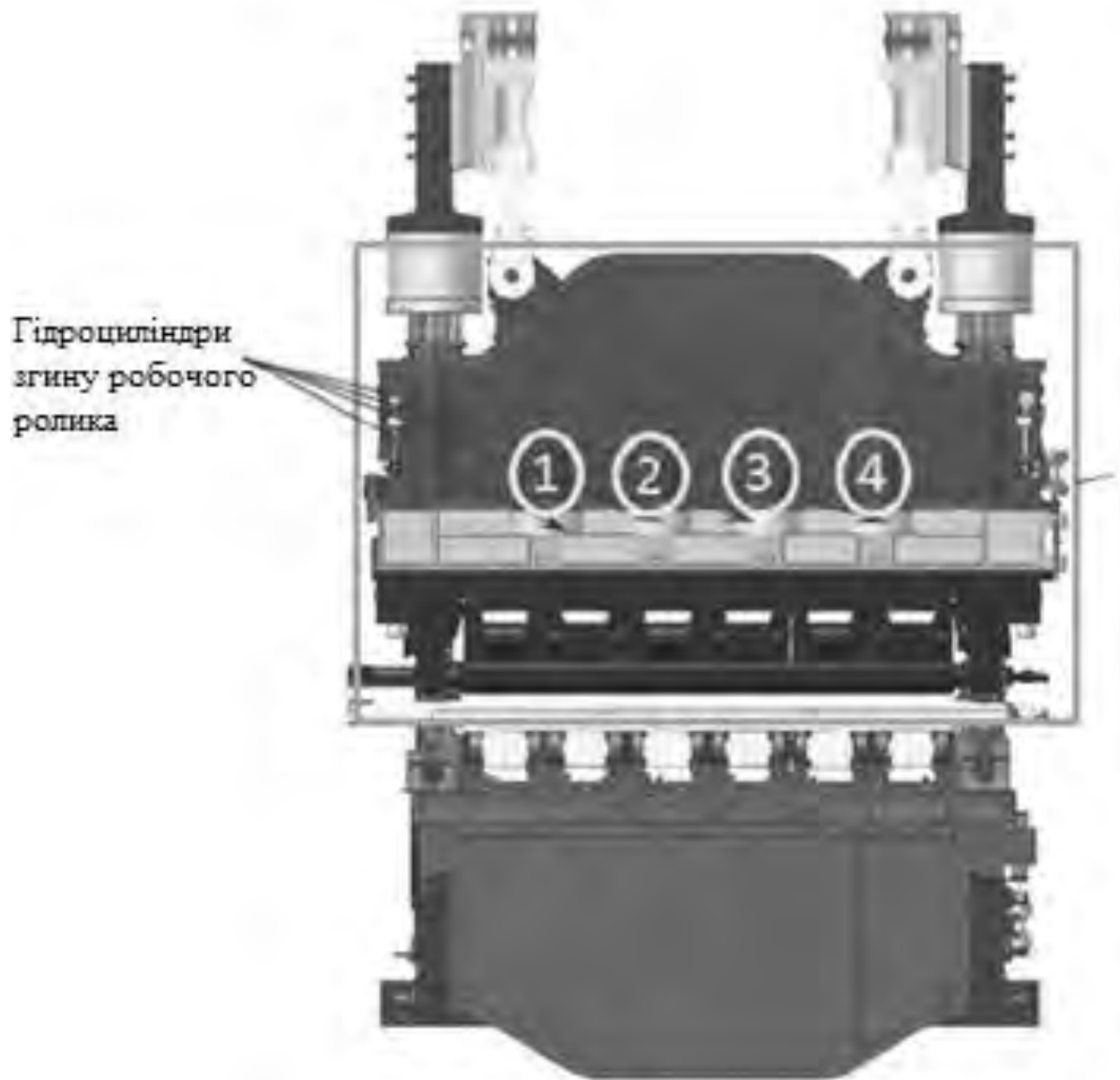
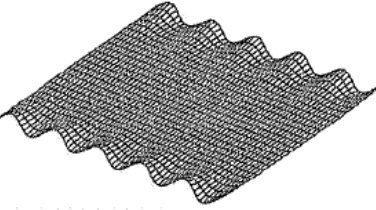
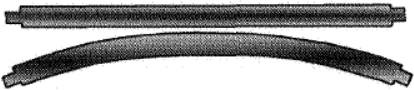
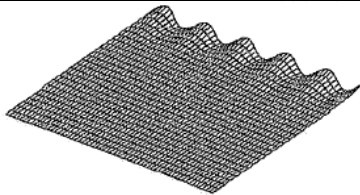

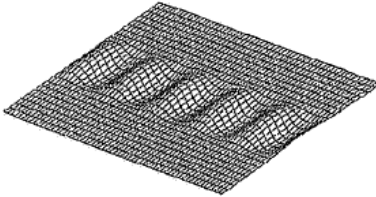
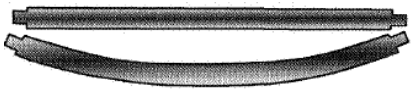
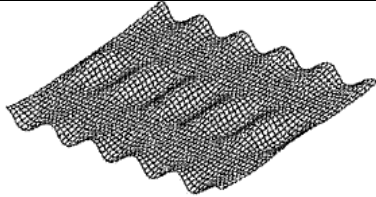
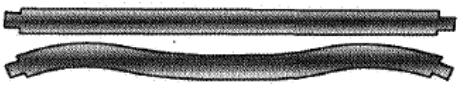
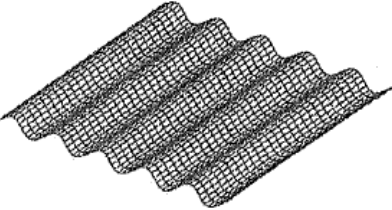
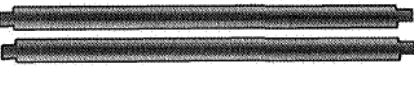


Рисунок 1.17 – Механізм вигину робочого ролика гідравлічними циліндрами [56]

Таблиця 1.4 – Види налаштувань робочого ролика залежно від дефекту площинності, що виправляється [57]

Дефект площинності	Вид дефекту	Налаштування роликів
Двостороння хвилястість крайок		
Однобічна хвилястість крайки		
Коробуватість		
Коробуватість з хвилястістю крайок		
Хвилястість по ширині		

1.3 Методи розрахунків процесів правки знаковмінним вигином на багатороликових машинах

В перелік задач, що вирішуються методами розрахунків правки знаковмінним вигином на багатороликових машинах, входить оцінка напружено-деформованого стану листів при правці, що визначає енергосилові параметри правильних машин, оцінка залишкових напружень і деформацій, що визначають якість правки, а також вплив на них конструктивних параметрів і налаштувань правильних машин.

З розвитком автоматизації виробничих процесів, включаючи процеси правки прокату та розширення можливостей теоретичних досліджень з використанням ЕОМ, виникла необхідність у створенні математичних моделей, що адекватно відображають процес правки з урахуванням максимально можливого числа факторів. Досить затребувані математичні моделі, які використовуються в автоматизованих системах керування правильних машин у режимі реального часу.

У наш час розроблена досить велика кількість математичних моделей для розрахунків напружено-деформованого стану металу при реалізації різних технологічних схем процесу правки.

За результатами низки теоретичних і експериментальних досліджень [6; 13; 14; 58] залежно від співвідношення кроку роликів t і товщини металу, що виправляється, h усі процеси правки можуть бути поділені на правку відносно товстих $t/h < 10$ і відносно тонких $t/h \geq 10$ листів і смуг. При цьому з погляду напружено-деформованого стану (НДС) у першому випадку домінуючим є вплив зсувних напружень, а в другому – вплив зовнішнього тертя на контактних поверхнях робочих роликів [58].

Серед аналітичних інженерних моделей найбільше поширення одержали різного роду рішення рівняння пружної лінії з використанням розрахункової схеми металу, що виправляється, у вигляді статично невизначеної багатопорної балки [1; 17; 32; 49; 52; 57; 59-64]. Проектувальні методи розрахунків

дозволяють концептуально вибрати основні конструктивні параметри технології та обладнання правильних машин [1; 26; 27; 32; 52; 57].

Основними конструктивними параметрами багатороликкових листопральних машин є крок t , діаметр d і кількість роликів n . Для орієнтовного визначення можливих найменшого та найбільшого кроку роликів машини, при якому можлива правка та реалізована конструкція ЛПМ, О. І. Целіковим і А. А. Корольовим були запропоновані залежності [25; 30]:

$$t_{\min} \approx 0,43\sqrt{E/\sigma_s}; \quad t_{\max} \approx 0,33E/\sigma_s, \quad (1.3)$$

а О. З. Слонім і А. Л. Сонін у роботі [1] приводять для початкового визначення кроку залежності:

$$t_{\min} = 0,58h\sqrt{E\sigma_s}; \quad t_{\max} = 0,35hE/\sigma_s, \quad (1.4)$$

для перевірки за умовою передачі моменту правки та міцності ролика залежності:

$$t_{\min} = \sqrt[3]{25,6Bh^2}; \quad t_{\max} = 8fr_y/k_{\text{ост}2}, \quad (1.5)$$

де r_y – межовий пружний радіус вигину листа товщиною h ;

$k_{\text{ост}2}$ – коефіцієнт відносної деформації під другим роликом.

Діаметр правильних роликів зазвичай визначається залежністю [1; 27]:

$$d = (0,90\dots 0,95)t, \quad (1.6)$$

а необхідне для якісної правки листів число правильних роликів залежністю [27]:

$$n = \frac{\varepsilon d}{14,1h(13,1f - 0,39)}, \quad (1.7)$$

де $\varepsilon \leq 6 - 8\%$ – відносна деформація листа, необхідна для усунення його коробуватості.

Відносну деформацію при правці можна прийняти як [57]:

$$\varepsilon = 1/2r, \quad (1.8)$$

де $1/r$ – сумарна кривизна скривлення та пружного пружинення.

Швидкість деформації при правці дорівнює:

$$U = \varepsilon V / t_b, \quad (1.9)$$

де V – швидкість правки;

t_b – час деформації.

Разом з тим, незалежно від умов реалізації процесів правки, необхідно коректно оцінювати граничні умови, основними з яких є розподіли механічних властивостей деформуємих матеріалів, а також розподіли умов контактного тертя та геометричних параметрів осередку деформації.

Для опису механічних властивостей при гарячій деформації серед ряду аналітичних залежностей, представлених у вітчизняній літературі [65-71], найбільше поширення одержали аналітична залежність Л. В. Андреюка з урахуванням опору деформації σ_s залежно від її ступеня ε , швидкості U і температури t [70]:

$$\sigma_s = \sigma_{s0} U^a (10\varepsilon)^b (t/1000)^c, \quad (1.10)$$

де σ_{s0} , a , b , c – емпіричні коефіцієнти;

і залежність Л. В. Андреюка – Тюленева [71], що враховує також хімічний склад оброблюваних сталей.

В світовій практиці також найпоширенішими аналітичними описами механічних властивостей є описи на основі залежності σ_s Misaka [72], у яких також враховані температурно-швидкісні, деформаційні умови та хімічний склад сталей.

Для холоднодеформованих матеріалів використовують аналітичні описи у вигляді ступеневих або поліноміальних залежностей [65; 73; 74]:

$$\sigma_s = \sigma_{s0} + A\varepsilon^n; \quad (1.11)$$

$$\sigma_s = \sigma_{s0} + a_1\varepsilon + a_2\varepsilon^2 + a_3\varepsilon^3, \quad (1.12)$$

де σ_{s0} – напруження плинності даного металу або сплаву у вихідному, тобто, у відпаленому стані;

A, n, a_1, a_2, a_3 коефіцієнти регресії та ступеневий показник, що характеризують інтенсивність деформаційного зміцнення металу.

Разом з тим, зазначені залежності охоплюють хоча й досить істотне, але все-таки обмежене коло матеріалів. Крім того, деформаційні показники, що входять до них, відносяться до великих деформацій, отриманих при прокатці, і не можуть використовуватися безпосередньо для процесів виправлення, тобто відноситись до вихідних даних. У цих умовах, особливо для математичних моделей в АСУ ЛПМ у промислових умовах, найбільш достовірні результати можна одержати експериментально на основі експрес-аналізу реальних матеріалів [75].

Умови зовнішнього тертя при правці, залежно від ефективності технологічних змащень, що використовуються, шорсткостей контактних поверхонь і ряду інших факторів, розглянуті в роботах [76–81]. При цьому для аналітичного опису умов тертя використовують, переважно, умову Амонтона-Кулона, згідно з якою величина дотичних напружень τ на контактних поверхнях може бути визначена як $\tau = pf$, де p і f – відповідні значення нормальних контактних напружень і коефіцієнта зовнішнього тертя.

Що стосується методів розрахунків безпосередньо напружено-деформованого стану металу при реалізації різних технологічних схем процесу правки, то існує досить велика кількість математичних моделей, що відрізняються по постановці, математичному апарату і, як наслідок, за обсягами і ступенем вірогідності інформації, що надається. Умовно, дані математичні моделі можуть бути підрозділені на інженерні алгоритмічні комбінації, що представляють собою закінчені аналітичні залежності, та чисельні, що припускають обов'язкове використання відповідних обчислювальних засобів [1; 57; 63; 73; 74].

Досить широко використовуються аналітичні рішення, отримані А.С. Остринським на основі розвитку методик О.І. Целікова та А.А. Корольова, побудовані на аналогічних принципах [57]. Розрахункову схему та прийнятну схему розподілу кривизни листа в цих рішеннях, а також епюру згинальних моментів наведено на рисунку 1.17.

У зв'язку з тим, що процес правки розглядається як пружно-пластичний вигин балки поперечного перерізу $B \times h$, одним з основних понять розглянутих методик є коефіцієнт проникнення пластичної деформації $k = h / 2z_0$, де

$$z_0 = \frac{\sigma_s}{E(1/r_0 + 1/r)} \quad (\text{рис. 1.18, 1.19}) [57].$$

Для визначення згинальних моментів під кожним з роликів вважають, що розподіл k при вигині листа між роликами ЛПМ носить цілком певний і відомий характер, при цьому фактичне налаштування листопрямильної машини не враховується.

Так, наприклад, при паралельному настроюванні роликів даний коефіцієнт приймають рівним 0,67 під кожним з роликів. Далі в методиці А.С. Остринського [57] використовується залежність для визначення моментів правки (див. рис. 1.17,в):

$$M_i = \frac{\sigma_s^2 B h R}{2E} (1/k_i + k_i / 3 - 1), \quad (1.13)$$

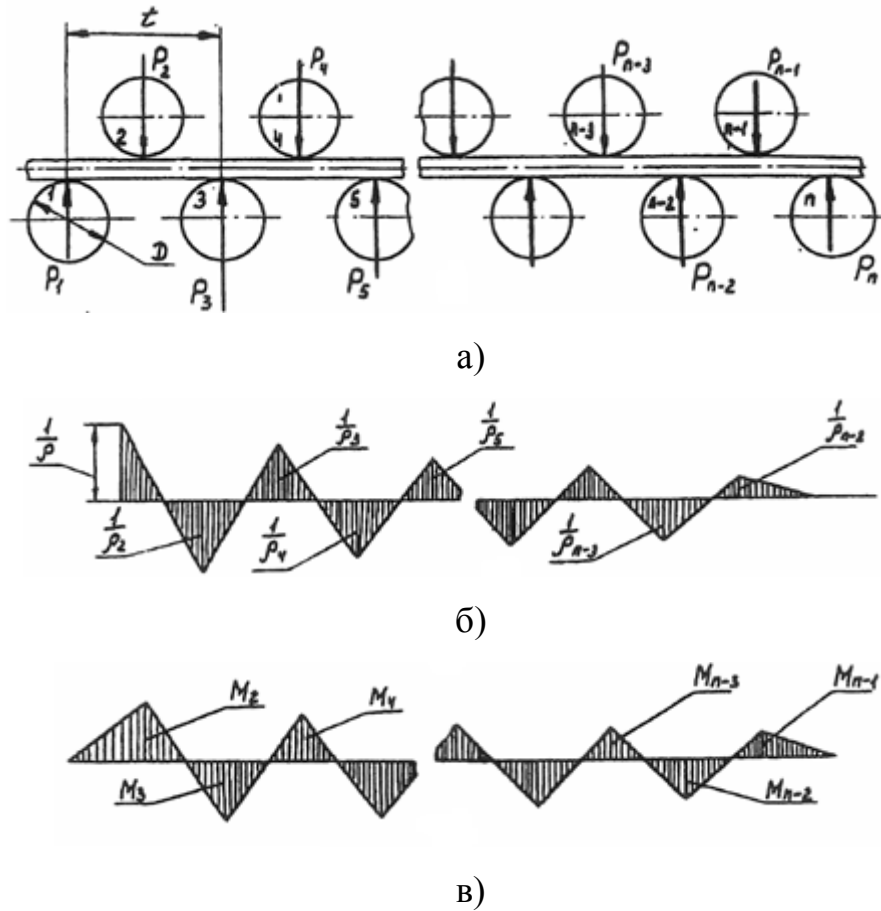


Рисунок 1.17 – Розрахункова схема процесу правки на багатороликовій правильній машині [57]: а – схема розташування роликів і діючих сил; б – прийнятий розподіл кривизни по довжині листа; в – епюра згинальних моментів по довжині листа

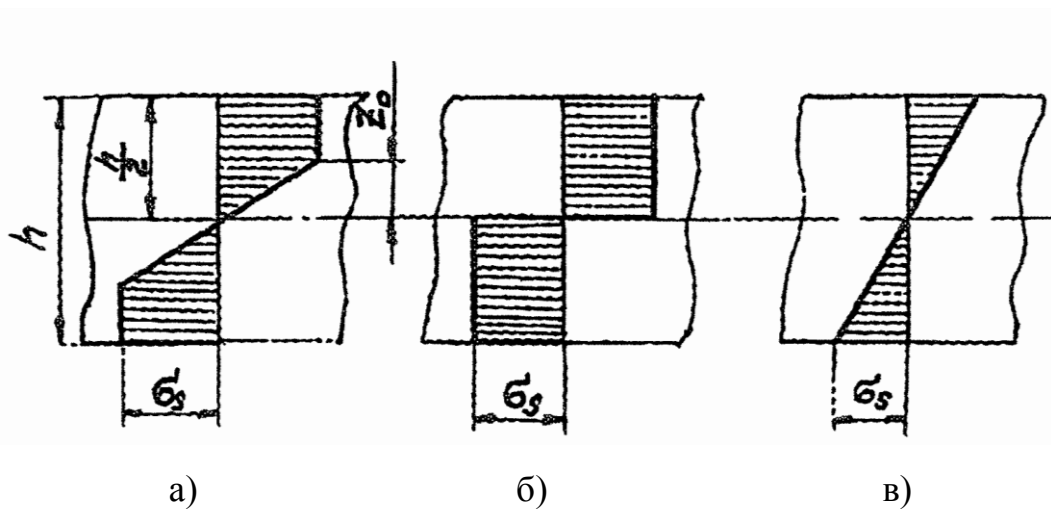


Рисунок 1.18 – Епюри розподілу напружень по товщині листа при пружно-пластичному (а), пластичному (б) та пружному (в) вигині

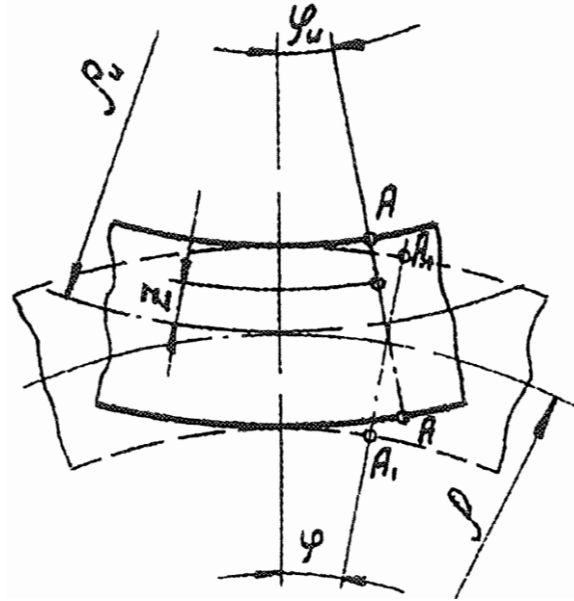


Рисунок 1.19 – Схема до визначення коефіцієнта k

де R – радіус правильного ролика;

$k_i = \frac{2\sigma_s}{Eh} \frac{1}{\frac{1}{\rho_{(i-1)}} + \frac{1}{\rho_i}}$ – коефіцієнт пружної деформації, що визначає від-

носні розміри пружного ядра;

$\frac{1}{\rho_{(i-1)}}$ – кривизна листа в перерізі, що проходить по осі ролика $(i-1)$ і

спрямована в протилежний бік кривизни $\frac{1}{\rho_i}$.

Корольов А.А. пропонує залежність виду [30]:

$$M_i = \frac{\sigma_s^2}{4E} bhd(k_i^2 / 1 - k_i). \quad (1.14)$$

Для сили правки, що діє на кожний з роликів, використовується вираз виду [28; 30]:

$$P_i = 2(M_{i+1} + 2M_i + M_{i-1})/t. \quad (1.15)$$

У даний час розвиток аналітичних методів розрахунків процесів правки йде в напрямку подальшого уточнення рішень за рахунок урахування ряду факторів і особливостей процесу.

Так, у роботі [82] враховані зміцнення та порядок додатку зовнішніх навантажень, які можуть як перевищувати межу плинності оброблюваного матеріалу, так і не досягати її.

Методика розрахунків видовження смуги, що враховує зміцнення, була запропонована в роботах [83; 84]. При цьому для кожної зони пружного та пластичного навантаження (розвантаження) прийнята окрема математична залежність між деформацією та напруженням. У роботі [84] при рішенні задачі для визначення механічних властивостей матеріалу смуги при правці прийнята діаграма розтягування з пружною зоною та пластичною зоною зі зміцненням. Методика графічної побудови епюри напружень при переході від кривизни середнього шару смуги з відомим розподілом напружень до остаточної кривизни наведена в роботах [85; 86].

Теоретичні основи методики розрахунків силових і геометричних параметрів процесу багаторазового пружно-пластичного вигину смуги з урахуванням зміцнення розроблені в НДІВажМаш УЗВМ [87; 88]. За межею пружності поведінка матеріалу моделюється лінійним законом зміцнення з урахуванням принципу Мазінга. У випадку вигину авторами досить строго враховується історія деформування. Дана методика дозволяє одержувати досить точні результати тільки в граничному випадку, близькому до чистого пластичного вигину, тому що перехід до розтягування з вигином здійснюється приблизно, за допомогою відповідного коефіцієнта.

До однієї з найбільш повних за колом вирішених питань слід віднести роботу японських авторів [89], що опирається на теоретичні дослідження, представлені в роботах [90; 91]. Автором роботи [90] пропонується методика розрахунків подовження смуги на основі додавання площ епюр напружень у

поздовжньому напрямку від розтягування та від вигину. Робота [91] зводиться до графічних побудов на основі наведеного рівняння поведінки матеріалу, що зміцнюється, в умовах плоского напруженого та деформованого станів.

Врахування пластичної та пружної зони проводиться в роботі [92], причому метал, що деформується, розглядається як навантажена балка з трапецієподібною схемою виправлення. В області пластичних деформацій врахування зміцнення матеріалу проводиться лінійним або степеневим законами [93-95]. Робиться висновок про необхідність урахування ефекту Баушингера при розрахунках збільшення натягіння. Розрахунок першого циклу навантаження проводиться аналітично, інших – чисельно.

Дані методики, поряд з відносною простотою, мінімальною трудомісткістю та максимальною швидкістю чисельної реалізації, переважно спрямовані на визначення енергосилових параметрів процесу, залишаючи осторонь моделювання геометричної форми металу, що виправляється, величину та характер розподілу залишкових напружень. У перерахованих роботах авторами були запропоновані аналітичні залежності, основними недоліками яких є неможливість урахування впливу залишкових напружень від попереднього циклу навантаження на картину напружень у наступному циклі, а також формування залишкової кривизни, неможливість прогнозувати локальні характеристики напружено-деформованого стану металу при реалізації процесу правки, відсутність урахування впливу початкових показників якості готового металопродукту на величину залишкових дефектів.

Зазначені недоліки розроблених інженерних методів розрахунків можуть бути усунуті за рахунок використання чисельних рішень. Використання чисельних методів дозволяє зробити більш коректне урахування усього комплексу граничних умов осередку деформації при реалізації процесу правки, а також значно підвищити інформативність результатів чисельної реалізації розроблених програмних засобів.

Завдяки вищевикладеному з удосконаленням обчислювальної техніки був здійснений інтенсивний розвиток різноманітних математичних моделей

процесів обробки тиском. З погляду кількості геометричних координат, уздовж яких враховується зміна умов пластичного деформування, дані математичні моделі можуть бути підрозділені на одномірні, двомірні та тривимірні. Розроблений також і клас імітаційних математичних моделей, що враховують додатково зміну умов реалізації процесів обробки тиском у часі [52; 87; 96-101].

Зокрема, математична модель процесу правки відносно товстих листів, що розроблена в ДДМА та УкрНДІметалургмаші, заснована на рішенні рівняння пружної лінії металу між робочими роликками, виходячи з припущення про заміну багатоопорної балки послідовним кінцевим числом двохопорних балок з накладенням відповідних обмежень (рис. 1.20) [87]. Використовувані в цьому випадку залежності представлено в таблиці 1.5, а їх відмінною рисою є можливість безпосереднього прогнозування не тільки сили P_j і моментів M_j правки, а і результуючої поздовжньої кривизни χ_i .

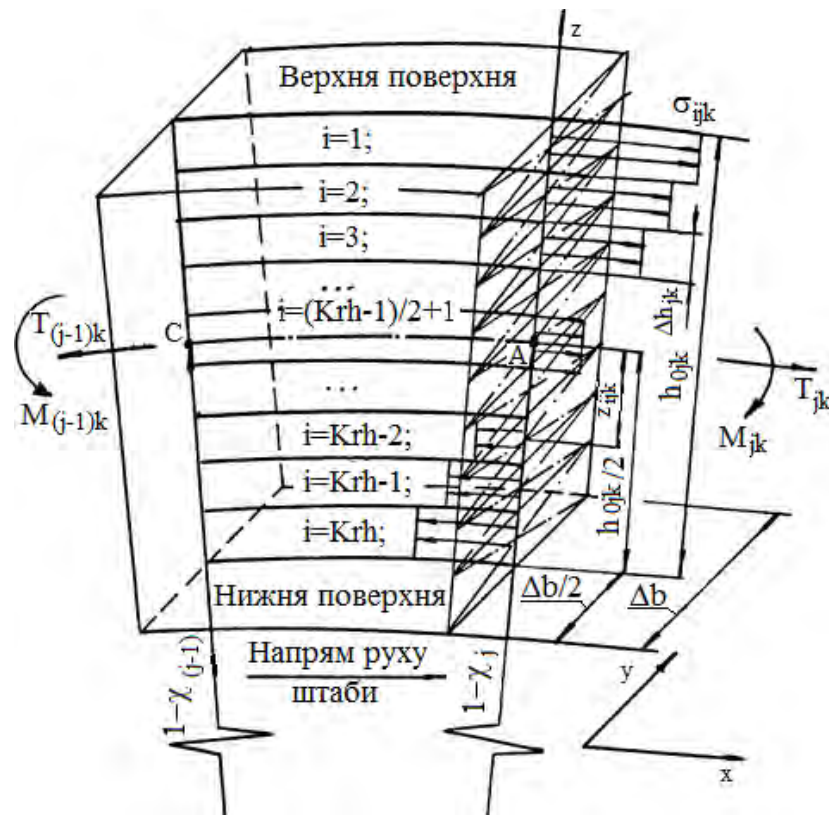


Рисунок 1.20 – Розрахункова схема елементарного об'єму металу при реалізації методики УкрНДІметалургмаш – ДДМА

Таблиця 1.5 – Аналітичні залежності математичної моделі процесу правки на багатороликових правильних машинах ДДМА- УкрНДІметалургмаш [87]

c	$c \geq \varphi(k_{\min})$	$1 \leq c \leq \varphi(k_{\min})$	$0 \leq c \leq 1$	$c \leq 0$
k_i	k_{\min}	$\varphi^{-1}(c)$	1	
χ_i	$\left(\frac{1}{k_i} - \frac{3 - k_i^2}{2} \right) \cdot \xi - \chi_{i-1}$			
P_i	$\frac{3 - k_i^2}{2} \frac{4\sigma_s B h^2}{3t}$		$c \frac{4\sigma_s B h^2}{3t}$	0
M_i	$\left[\frac{1}{k_i} + \frac{k_i}{3} - 1 - \frac{(3 - k_i^2)^2}{12} \right] \cdot \frac{\sigma_s^2 B h d}{4E}$			
$c = \frac{24\omega_i}{\xi t^2} + \frac{3\chi_{i-1}}{2\xi}; k_{\min} = \frac{\xi}{2/d + \chi_{i-1}}$				

Подальшим розвитком розглянутого теоретичного рішення є математична модель процесу правки на багатороликових машинах, розроблена спільно ДДМА з ПрАТ «НКМЗ» [102; 103]. При розробці даної математичної моделі в основу були покладені наступні основні допущення:

- задача є геометрично лінійна, як у випадку балки, внаслідок чого квадратом похідної в точній формулі кривизни для вигнутої поздовжньої осі можна зневажити;
- використаний кусочно-лінійний опис епюри згинальних моментів, а напрямки реакцій робочих роликів прийнятим вертикальним;
- для опису залежності між кривизною та згинальним моментом при знакозмінному вигині використана модель Мазінга.

У даній постановці задачі її рішення опирається на геометричні координати робочих роликів правильної машини поряд з геометричними характеристиками та показниками механічних властивостей матеріалу оброблюваного листа, при цьому така характеристика ефективності умов реалізації технологі-

чного режиму правки, як коефіцієнт проникнення, є розрахунковою та визначається на основі розв'язку пружної лінії листа. У рамках даного рішення був використаний ітераційний метод цілеспрямованого перебору варіантів з наступним визначенням діючих на правильні ролики сил крутних моментів і результуючої кривизни одержуваних листів.

До основних недоліків перерахованих робіт слід віднести припущення про досягнення кривизною штаби кривизни робочих роликів, що дозволило звести постановку задачі до одномірної, однак привело до істотного завищення одержуваних енергосилових параметрів; врахування далеко не всіх технологічних параметрів реалізованого процесу, наприклад, перекриттів і кроків між роликами; неможливість прогнозування більш складного характеру дефектів площинності, а також автоматизованого проектування технологічних режимів роботи механічного устаткування машин для правки з урахуванням вихідних і результуючих показників якості оброблюваного металопрокату. Більшість цих недоліків були усунені в роботах вчених ДДМА [104; 105], однак в них також задачу правки було вирішено в одномірній постановці, що не дає можливості їх використання для моделювання виправлення поперечної хвилястості.

Найбільш строгими по постановці та у той же час найбільш інформативними серед чисельних рішень є двох- і тривимірні математичні моделі, засновані на використанні варіаційних методів [106-108], методу скінченних (МСЕ) [109-112] або методу граничних елементів [113].

У даний час найбільше поширення одержали математичні моделі, засновані на використанні методу скінченних елементів [109-112]. Розроблено ряд пакетів програм, що реалізують зазначений метод як для дослідження процесів пластичної деформації, так і для розрахунків напружено-деформованого стану деталей і вузлів машин. До перших відносяться САЕ-пакети, серед яких найбільше поширення одержали DEFORM, QFORM, ABAQUS [109; 114-116]. Найпоширенішим для розрахунків устаткування є програмний продукт SolidWorks Simulation [122]. Стосовно до процесу правки знакозмінним виги-

ном скінченно-елементні моделі наведені в роботах [118-125]. У той же час низка питань, таких, як правка нерівномірно розподілених по ширині дефектів площинності, для яких використання МСЕ представляється найбільш раціональним, залишається невирішеним.

Разом з тим, висока трудомісткість та істотні витрати машинного часу на одну реалізацію при розв'язку багатоітераційних і різноманітних задач, пов'язаних з автоматизованими розрахунками та проектуванням процесів правки, обмежують їхнє використання в моделях, призначених для роботи в масштабі реального часу, наприклад, у системах автоматичного керування роботою правильних машин.

Більш раціональною в цьому випадку є розробка регресійних математичних моделей на основі реалізації МСЕ в комбінації з теорією планованого експерименту [126-128].

Висновки

1. Підвищення якості та зниження собівартості листового металопрокату робить актуальним удосконалення діючих і створення нових високоефективних технологій і обладнання для правки листів на основі розвитку методів автоматизованого розрахунку і проектування, підвищення ступеня наукової обґрунтованості прийнятих технічних рішень, а також на основі розробки, дослідження і впровадження конкретних практичних рекомендацій.

2. Розвиток теоретичних методів розрахунку правки на багатороликових листопрямильних машинах ґрунтується на уточненні моделей шляхом більш точного опису фізичних явищ, умов і геометрії процесу.

3. Розвиток технологій процесу правки листів ґрунтується на розширенні видів дефектів листів, що виправляються, зокрема, усунення крім поздовжньої кривизни ще й хвилястості листів, що можливо в сучасних конструкціях листопрямильних машин шляхом контрольованого вигину робочих роликів. В наш час цей напрям вивчено недостатньо, що обумовлює актуальність проведення дослідження процесу правки гарячекатаних листів.

РОЗДІЛ 2

ВИБІР НАПРЯМКІВ, МЕТОДІВ ТЕОРЕТИЧНИХ І ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ В ОБЛАСТІ ПРАВКИ ГАРЯЧЕКАТАНИХ ЛИСТІВ

2.1 Розширення сортаменту, підвищення якості та зниження собівартості готової металопродукції як основний напрямок в області наукових досліджень

Однією з основних умов підвищення конкурентоспроможності та техніко-економічних показників виробництва відносно товстих листів, штаб і заготовок є забезпечення необхідних якісних показників і стабільності геометричних характеристик готової металопродукції (див. розділ 1), на основі вдосконалення діючих і створення нових високоефективних технологій і устаткування. Разом з тим, дефіцит фінансових і матеріальних ресурсів у підприємств металургійного комплексу робить необхідним і одночасно досить істотним підвищення ступеня наукової обґрунтованості у кожному конкретному випадку технічних рішень, що приймаються.

Відзначене вище висуває ряд додаткових вимог до об'ємів і ступеня вірогідності інформації, що надається, а також до форм і методів проведення досліджень. Однією з таких вимог є використання комплексного підходу, що передбачає проведення теоретичних і експериментальних досліджень енергосилових параметрів, напружено-деформованого стану металу та основних показників якості, серед яких стосовно процесів правки гарячекатаних листів повинні бути розглянуті: точність геометричних характеристик, показники форми, площинності, а також рівень і ступінь стабільності результуючих фізико-механічних властивостей готової металопродукції. При цьому, з метою зниження питомих капітальних і експлуатаційних витрат, можливість використання отриманих результатів повинна бути забезпечена ще на стадії виконання проектно-конструкторських і проектно-технологічних робіт, що робить доці-

льним зсув акцентів у бік теоретичних досліджень, розробки широкого кола математичних моделей і відповідних їм програмних засобів. Результати ж експериментальних досліджень у лабораторних і промислових умовах можуть бути використані для уточнення вихідних даних і передумов, а також у якості критеріальних, тобто для оцінки ступеня вірогідності отриманих теоретичних рішень.

Крім високого рівня вимог до точності геометричних характеристик і ступеню площинності (див. табл. 1.3), виробництво товстих листів і штаб пов'язане з підвищенням рівнів фізико-механічних властивостей їх металів і сплавів (табл. 2.1, 2.2). Рішення даної задачі забезпечують за рахунок удосконалення хімічного складу металів і сплавів, що припускає наявність відповідних легуючих компонентів, а також за рахунок удосконалення технологічних режимів їх гарячої прокатки, у тому числі й за рахунок сполучення контрольованої прокатки з прискореним охолодженням, що забезпечують регламентацію температурних і деформаційних параметрів [1, 129-130]. У той же час, реалізація даних технічних заходів пов'язана з ускладненням технологій та устаткування процесів гарячої та холодної правки прокату з підвищеним рівнем фізико-механічних властивостей й, як наслідок, з необхідністю проведення широкого кола подальших досліджень, зокрема для правки листів з високим рівнем межі плинності матеріалу (більш 1500 МПа).

2.2 Вибір методів теоретичних досліджень

Відповідно до сучасних тенденцій розвитку наукових підходів, в основу теоретичних досліджень закономірностей формування напружено-деформованого стану металу при правці листів і штаб були покладені методи теорії пружності та пластичності, методи чисельного математичного моделювання, а також теоретико-експериментальні методи з наступним якісним і кількісним аналізом отриманих результатів.

Таблиця 2.1 – Марочний і розмірний сортамент стану 3600 і механічні властивості металу отриманого при контрольованій прокатці по категоріях міцності К 52- К60 [1]

Категорія міцності	Марка сталі	Товщина листа, мм	σ_T , МПа	σ_B , МПа	$\delta(2'')$, %, не менш	KCV, Дж/см ² , не менш (при температурі)	DWTT, %, не менш (при температурі)
К52	17Г1С-У	7-16	365-460	510-630	23(δ_5)	49(0°C)	65(0°C)
К52	13ГС	8-22	380-500	510-630	29,5	49(0°C)	80(0°C)
К52	08Г1Б	8-22	410-520	510-610	30	69(-5°C)	85(-5°C)
К55	13Г1С-У	8-22	410-530	540-660	28,5	69(0°C)	69(-15°C)
К56	09Г2ФБ	9,5-22	450-570	550-670	26,5	88(-20°C)	85(-20°C)
К60	10Г2ФБ	8-22	480-580	590-690	22(δ_5)	98(-15°C)	90(-15°C)
К60	10Г2ФБЮ	8-22	480-600	590-710	27	49(-20°C)	70(-20°C)

Таблиця 2.2 – Марочний і розмірний сортамент стану 3600 і механічні властивості металу отриманого при контрольованій прокатці, по категоріях міцності Х 42-Х70 [1]

Категорія міцності	Товщина листа, мм	σ_T , МПа	σ_B , МПа	$\delta(2'')$, %, не менш	KCV-20, Дж/см ² , не менш	DWTT, %, не менш
Х42	9,5-12,5	>300	>300	29,5	39	50
Х52	9-22	383-481	455-553	32	68,8	80
Х56	9-22	403-501	489-587	30	68,8	80
Х60	9-22	432-540	517-615	29	88,5	90
Х65	9-22	471-569	530-628	28,5	88,5	90
Х70	15,7-21,8	480-600	590-710	28,5	98	95

З погляду визначення механічних властивостей металів і сплавів, залежно від температур при їхній гарячій і холодній деформації можуть бути використані методики робіт [68; 131], при цьому особливий інтерес представляють методики Л. В. Андреюка [70; 71] і М. Я. Бровмана [66], що визначають напруження плинності для цілого ряду металів і сплавів залежно від температур їх гарячого деформування. Стосовно процесів холодного та теплого деформування можуть бути використані результати робіт [65; 67; 73]. Аналогічні підходи, що припускають аналітичну апроксимацію результатів експериментальних досліджень, можуть бути реалізовані стосовно розподілів нормального модуля пружності залежно від відповідних розподілів температур.

Безпосередньо математичне моделювання напружено-деформованого стану металу та результуючих показників якості при реалізації процесів правки відносно товстих листів, штаб і заготовок може бути здійснене на основі використання різних підходів, найбільш строгими з яких у даний час є варіаційні методи [106-108] і метод скінченних елементів [109-112]. Разом з тим, у цьому випадку має місце досить істотна трудомісткість чисельної реалізації, а, отже, і витрати машинного часу, що не дозволяють використовувати дані підходи як цільові функції систем автоматизованого налаштування правильних машин і керування технологічними режимами їх роботи.

З огляду на зазначене становлять інтерес математичні моделі, засновані на використанні чисельно-аналітичних підходів, що представляють процес правки в системі двомірних координат, при цьому заготовка розглядається як ідеальна пружно-пластична одномірна балка з наступним ітераційним рішенням системи рівнянь її геометричної форми [132; 133]. Можливою у цьому випадку є розбиття поперечних перерізів даних заготовок на кінцеву безліч елементарних об'ємів з наступним чисельним рекурентним рішенням, що впливає з умови статичної рівноваги. Реалізація даного підходу дозволить урахувати реальний характер розподілів граничних умов по висоті та ширині осередку деформації при прийнятних витратах машинного часу. Використання ж розглянутих вище більш строгих підходів поряд з результатами експерименталь-

них досліджень є доцільним з погляду критеріальної оцінки ступеня вірогідності отриманих теоретичних рішень.

Для зниження трудомісткості та витрат на проведення наукових досліджень доцільним є застосування теоретичних методів аналізу, заснованих на комп'ютерному моделюванні чисельними методами, які з високою точністю розраховують реальні фізичні процеси. Інтенсивне застосування комп'ютерних експериментів сприяє розширенню кількості одержуваної інформації завдяки врахуванню ступеня впливу основних технологічних і конструктивних параметрів на НДС у заготовці. Для уточнення вихідних даних по реології матеріалу для чисельного моделювання та оцінки ступені вірогідності отриманих теоретичних результатів повинне бути використане експериментальне дослідження.

Для визначення впливу згину роликів на хвилястість листів теоретичне дослідження процесів правки здійснювалося МСЕ, як одним з достовірних методів, що дають повну інформацію про процес деформування у порівнянні з іншими теоретичними методами дослідження (див. підрозд. 1.3) [134-138]. У якості програми використовувався ліцензійний продукт Deform 3D (тимчасова ліцензія ДДМА) та Abaqus CAE Student Edition (університетська версія ДДМА). Математичний апарат цих CAE-систем докладно розкритий у літературі [134; 139].

Чисельна модель процесу деформування заснована на теорії плинучості. Матеріал заготовки розглядається як нестисливе пружно-пластичне тіло. Система вихідних рівнянь включає [139]:

рівняння рівноваги

$$\sigma_{ij,j} = 0; \quad (2.1)$$

рівняння руху

$$\sigma_{ij,j} + \rho \frac{dv_i}{dt} = 0; \quad (2.2)$$

кінематичні співвідношення

$$\dot{\varepsilon}_{ij} = \frac{1}{2}(v_{i,j} + v_{j,i}); \quad (2.3)$$

визначальні рівняння плинину

$$s_{ij} = \frac{2\bar{\sigma}}{3\dot{\varepsilon}}\dot{\varepsilon}_{ij}; \quad (2.4)$$

умова нестисливості

$$v_{i,i} = 0; \quad (2.5)$$

рівняння опору деформації для пружнопластичного матеріалу

$$\bar{\sigma} = \bar{\sigma}(\bar{\varepsilon}, \dot{\varepsilon}, T). \quad (2.6)$$

У наведених рівняннях σ_{ij} , $\dot{\varepsilon}_{ij}$ - компоненти тензорів напружень і швидкостей деформацій; v_i - компоненти вектору швидкості; s_{ij} - девіатор тензора напружень; $\bar{\sigma}$, $\bar{\varepsilon}$, $\dot{\varepsilon}$ - інтенсивності напружень, деформацій і швидкостей деформацій відповідно; ρ - щільність.

Дискретизація рівнянь (2.1)...(2.5) проводиться на основі принципу віртуальних швидкостей і робіт, а також, методу скінченних елементів. Невідомими є вузлові значення швидкостей і середніх напружень. Скінченно-елементна сітка складається з лінійних чотирьохвузлових тетраедрів.

Деформувальний інструмент розглядається як абсолютно тверде тіло при розрахунках формозміни заготовки. Для 3D моделювання заготовка та інструменти імпортуються з CAD систем за допомогою STL формату. В Deform 3D використовується квадратична скінчено-елементна апроксимація поверхонь. Такий підхід дозволяє перебудовувати сітку без «підрізання» заготовки та підтримувати в такий спосіб постійний її об'єм. Програма автоматично генерує скінчено-елементну сітку. Адаптивний алгоритм забезпечує оптимальний розподіл щільності скінчено-елементної сітки.

Кінематичні граничні умови формуються для різних поверхонь S .

На поверхнях S_v , де задана швидкість v_i^0 , граничні умови можуть бути виражені через швидкості [139]:

$$v_i = v_i^0. \quad (2.7)$$

На поверхнях S_F , де діють сили:

$$\sigma_{ij} n_j = F_i, \quad (2.8)$$

де n_j – компоненти одиничної нормалі;

F_i – компоненти вектору сили.

На поверхні S_S , де задані швидкість і сили, граничні умови будуть:

$$v_i n_i = v_n^0, \quad (2.9)$$

$$\sigma_{ij} n_i l_j = F_f, \quad (2.10)$$

де F_f – дотична складова діючих на поверхню сил;

l_j – одиничний дотичний вектор, спрямований у протилежний бік від вектору швидкості заготовки відносно інструмента Δv_i :

$$l_i = - \frac{\Delta v_i}{|\Delta v|}. \quad (2.11)$$

Граничні умови (2.7) використовуються для ділянок, де між заготовкою та інструментом є зони прилипання. Вираз (2.10) з $F_f = 0$ може використовуватися для вільних частин поверхні заготовки.

Більш загальні граничні умови (2.9) і (2.10) використовуються спільно для ділянок з тертям і для тих ділянок, де задана симетрія. В останньому випадку вирази (2.9) і (2.10) замінюються наступними:

$$v_i n_i = 0; \quad (2.12)$$

$$\sigma_{ij} n_i l_j = 0, \quad (2.13)$$

де одиничні нормальні та дотичні вектору задаються залежно від площини симетрії.

Граничні умови, що враховують тертя, (2.9) і (2.10), повинні бути доповнені залежністю для дотичної сили F_f , що входить у закон тертя. На контактні заготовки - інструмент контактні дотичні напруження розраховуються за законом тертя Зібеля [73]

$$F_f = mk = m \frac{\bar{\sigma}}{\sqrt{3}}, \quad (2.14)$$

де k – дотичне напруження;

m – коефіцієнт тертя зрушення.

З огляду на зазначене в роботі була використана наступна методика теоретичного дослідження процесів правки.

Тривимірне моделювання методом скінченних елементів процесу правки полягало у визначенні напружено-деформованого стану листа в момент правки [139; 140]. Важливим критерієм при правці листа є нерівномірність розподілу деформацій у тілі заготовки, яка оцінювалася, як $\Delta e = e_{\max} - e_{\min}$.

У CAD-системі були задані геометрія інструмента та заготовки. Досліджувані схеми правки представлені на рис. 2.1. Діаметр валків для правки приймався рівним 320 мм, довжина 2500 мм. У дослідженні використовувалися листові сталеві моделі з хвилястою бічною поверхнею шириною 200 мм (модельований дефект). Ширина листа $B = 2000$ мм, товщина $h = 14$ мм, період хвилі 1000 мм, а амплітуда 26 мм, що відповідає максимальним розмірам дефектів форми прокатоного листа (рис. 2.2). Торці листа, розташовані уздовж валків, при моделюванні задавалися нерухожими інструментами. Для моделювання правки роликом з прогином інструментом був валок з бочкою, різниця діаметрів по середині та по краях валка 0, 5, 10 мм, вона ж є різницею перекриттів. Відстань між центрами нижніх валків 350 мм.

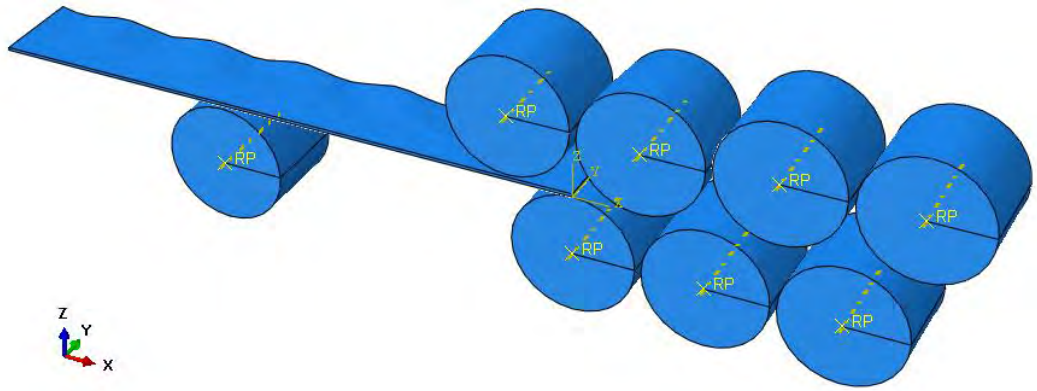
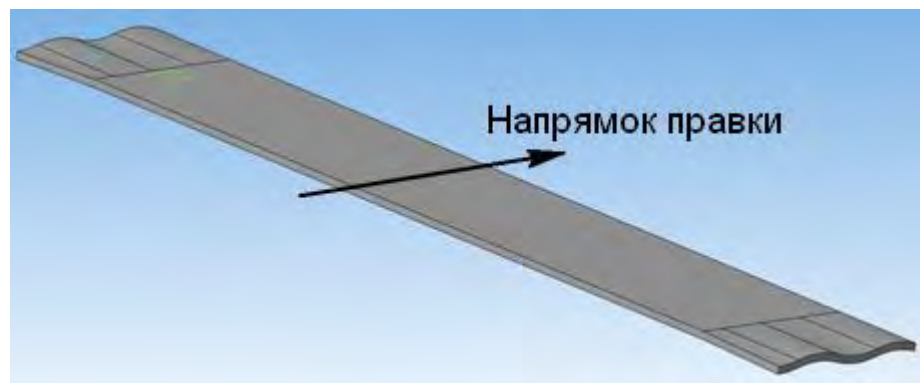
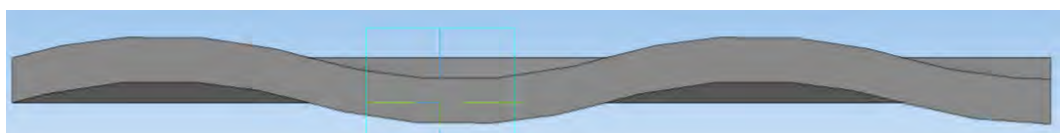


Рисунок 2.1 – Схема правки листа з вихідної хвилястістю крайки (переріз)



а)



б)

Рисунок 2.2 – Загальний вигляд заготовки (а) і її торець (б)

Матеріал заготовки – сталь 65Г (аналог, згідно зі стандартом DIN SK67); механічні характеристики матеріалу наведені на рис. 2.3; температура заготовки та інструмента 20°C; швидкість лінійного переміщення верхнього валка дорівнювала 1 мм/с; щільність при кімнатній температурі – 7840 кг / м³; модуль Юнга – 2·10⁵ МПа; коефіцієнт Пуассона – 0,3. Коефіцієнт пластичного тертя по Зібелю – 0,12).

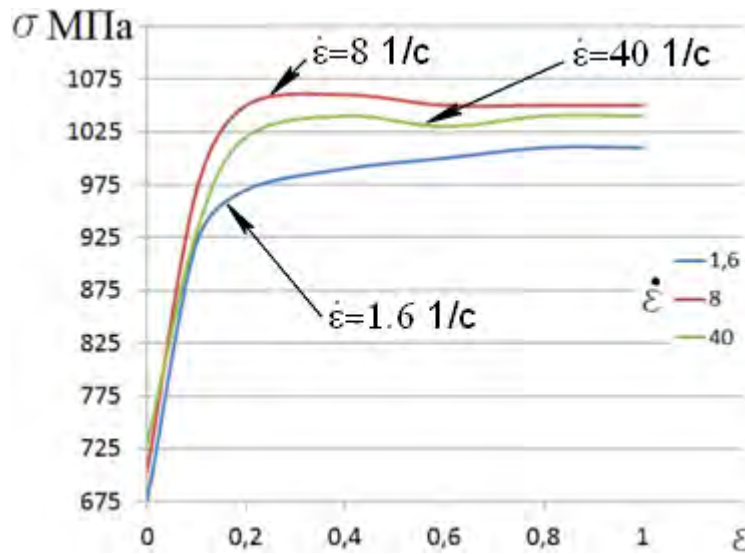


Рисунок 2.3 – Залежності опору деформуванню сталі 65Г [73]

Лист правився роликками з різною величиною різниці перекриттів 0 мм, 5 мм і 10 мм; матеріал робочих роликів – сталь 70. Температура інструмента – 20°C.

Відповідно до цілі дослідження математична модель передбачає рішення в тривимірній площині, що доцільніше робити за допомогою методу скінченних елементів. Однак реалізація даного типу моделі потребує великих витрат машинного часу, а внаслідок ускладнює вирішення задач оптимізаційного плану. Для пошуку раціональних технологічних налаштувань правильної машини в режимі реального часу в межах чисельно-аналітичної моделі було використано метод планованого експерименту [127; 128].

Виходячи з літературних даних, досліджувався вплив п'яти факторів, які варіювалися на трьох рівнях (кубічна модель). Вплив цих параметрів описується нелінійними залежностями. У результаті планування досліджень встановлювалися регресійні залежності у вигляді повного кубічного полінома. Ціль планування чисельного експерименту – одержання регресійного рівняння залежності площинності ($R_{пп}$), сили (P , кН) від основних параметрів, що впли-

вають на процес правки листа, а саме ширини листа, його товщини, вихідної хвилястості, перекриття та величини згину роликів [127].

Слід відмітити, що застосування моделі повнофакторного експерименту призводить до невиправдано завищеного числа експериментів. У цьому випадку раціональніше застосовувати дробову модель. Для нелінійної моделі з п'ятьма факторами доцільне застосування плану Хартлі (Hartley) Ha5 [141].

Для реалізації плану Ha5 необхідно провести 27 математичних експериментів. Розширена матриця планування експерименту представлена в табл. 2.3.

Таблиця 2.3 – Матриця планування експерименту Ha5 [141]

N	Код					N	Код				
	x1	x2	x3	x4	x5		x1	x2	x3	x4	x5
1	+1	+1	+1	+1	+1	15	+1	+1	-1	+1	-1
2	-1	-1	+1	+1	+1	16	-1	-1	-1	+1	-1
3	-1	+1	-1	-1	-1	17	0	0	0	0	0
4	+1	-1	-1	-1	-1	18	+1	0	0	0	0
5	-1	+1	-1	+1	+1	19	-1	0	0	0	0
6	+1	-1	-1	+1	+1	20	0	+1	0	0	0
7	+1	+1	+1	-1	-1	21	0	-1	0	0	0
8	-1	-1	+1	-1	-1	22	0	0	+1	0	0
9	-1	+1	+1	+1	-1	23	0	0	-1	0	0
10	+1	-1	+1	+1	-1	24	0	0	0	+1	0
11	+1	+1	-1	-1	+1	25	0	0	0	-1	0
12	-1	-1	-1	-1	+1	26	0	0	0	0	+1
13	-1	+1	+1	-1	+1	27	0	0	0	0	-1
14	+1	-1	+1	-1	+1						

План Хартлі більш економічний, ніж ортогональний і рототабельний центральний композиційний план та рекомендується при побудові інтерполяційних моделей квадратичного полінома для об'єктів з малим рівнем шумів [141]. На основі описаної методики була розроблена відповідна програма. Результати розрахунків: розподіл деформацій, напружень, силові характеристики процесу правки та зміна геометрії листа. Для виміру геометрії листа після правки в програмі DEFORM 3D на різних стадіях проводився експорт контурів заготовки (файл формату *.stl) для побудови 3D моделі Solidworks.

При плануванні математичного експерименту одержали математичну модель площинності у вигляді нерівномірності розподілу деформацій ($\Delta\epsilon = \epsilon_{\max} - \epsilon_{\min}$), а також сили правки P залежно від п'яти факторів: різниці перекриття, перекриття та початкової хвилястості країв заготовки (відносини довжин волокон листа L_k / L_c). Попередні розрахунки показали, що на площинність вагомо впливають п'ять факторів: ширина листа (B), його товщина (h), початкове відношення довжин волокон листа $\lambda_0 = L_k / L_c$, відносна величина перекриття роликів (W/h) і різниця перекриттів ролику, що згинається (ΔW).

2.3 Вибір методів експериментальних досліджень процесів правки гарячекатаних листів

Основним цільовим призначенням експериментальних досліджень процесу гарячої та холодної правки відносно товстих листів, проведених у лабораторних і промислових умовах, були оцінка ступеня вірогідності відповідних математичних моделей і уточнення вихідних даних для їхньої чисельної реалізації. Крім того, результати даних експериментальних досліджень, поряд з узагальненням досвіду промислового освоєння ряду правильних машин, були використані для оцінки ефективності запропонованих технічних рішень і розроблених практичних рекомендацій.

Слід зазначити, що зростаючі вимоги щодо обсягів надаваної інформації, а також необхідність оцінки ступеню вірогідності чисельних математичних моделей роблять актуальним проведення експериментальних досліджень

не тільки енергосилових, а і результуючих геометричних характеристик прокату після правки.

Відповідно до викладеного вище, лабораторні експериментальні дослідження інтегральних характеристик енергосилових параметрів і показників результуючої кривизни, одержуваної при виправленні вигином заготовок зі свинцю та стали різних марок, були проведені на спеціально створеній за участю автора для цих цілей лабораторній листоправильній машині 9×100×250 Донбаської державної машинобудівної академії (ДДМА), загальний вигляд, конструктивні особливості та склад устаткування якої ілюстровані рисунками 2.4...2.8.

Дана конструкція має дев'ять робочих роликів, вісім з яких приводні, що дозволяє більш повно моделювати процес правки в умовах промислового виробництва.

Привод даної експериментальної установки (див. рис. 2.4...2.5) здійснюється від мотор-редуктора 1 через моторну муфту 2, одноступінчастий циліндричний редуктор 3, проміжну муфту 4, шестеренну кліть 5 і шпindelні передачі 6 безпосередньо на робочу кліть 7. Мотор-редуктор 1 типу МЦ2С-63 має частоту обертання 40 об/хв, що з урахуванням передатного відношення одноступінчастого циліндричного редуктора 4 забезпечило частоту обертання робочих роликів правильної машини 10 об/хв, що, у свою чергу, відповідало швидкості правки порядку 50 мм/сек.

Кліть робоча, конструкція якої ілюстрована рисунками 2.6 і 2.7, містить у собі вузол станин 1, дев'ять блоків робочих правильних роликів 2 з подушками 3, натискні гвинти 4 і системи врівноважування пружинного типу 5. Подушки 3 кожного з робочих роликів 2 були сполучені зі своїми натискними гвинтами 4 за допомогою кулькової опори 6 і месдоз 7. Гайки натискних механізмів 8 були розміщені безпосередньо в станинах 1, а для осьової фіксації подушок робочих роликів 3 була використана регульовальна планка 9. Безпосередньо робочі ролики 1 (див. рис. 2.8) були

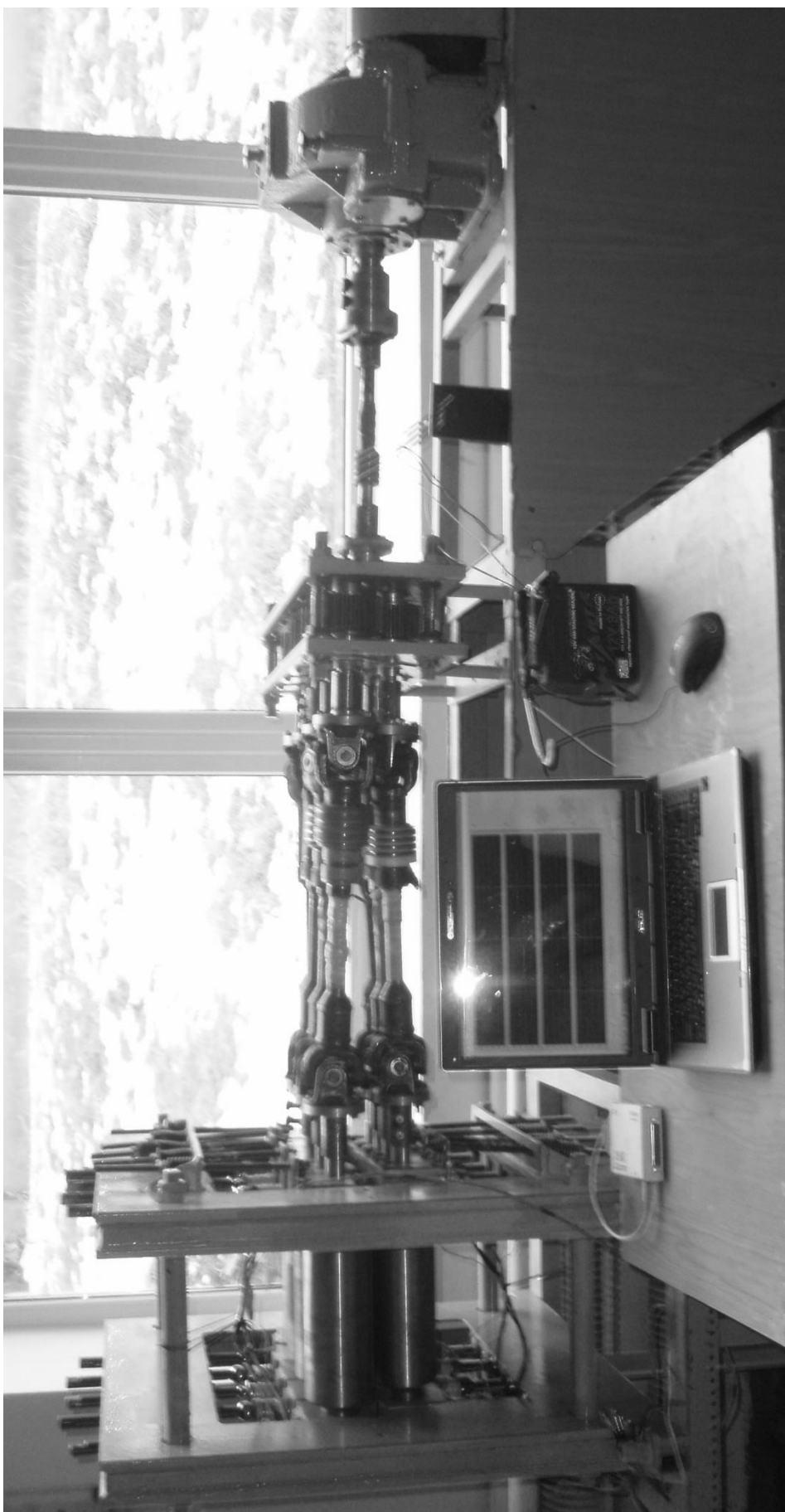


Рисунок 2.4 – Загальний вигляд лабораторної експериментальної установки $9 \times 100 \times 250$ ДДМА, призначеної для експериментального дослідження процесу правки відносно товстих листів

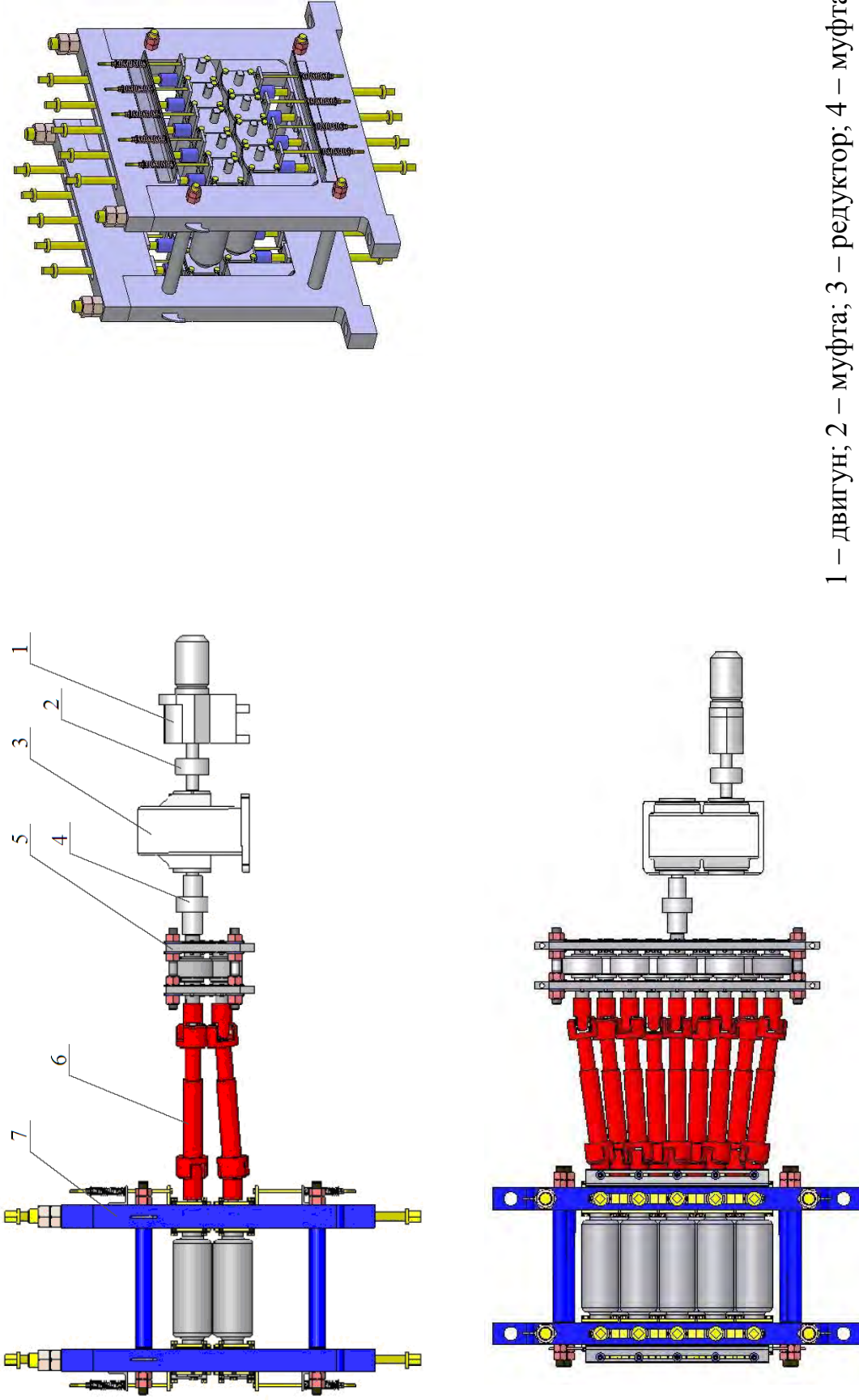
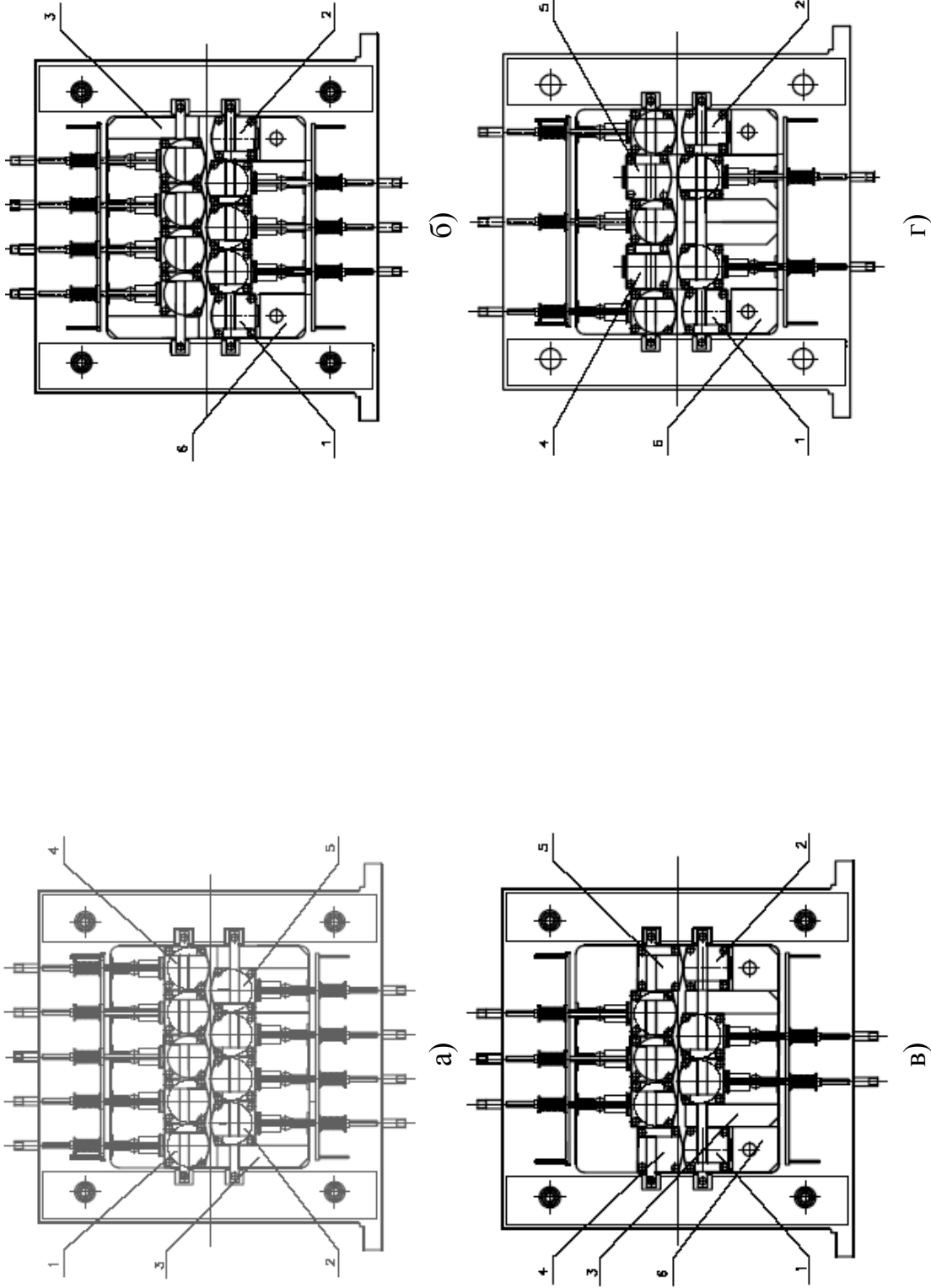


Рисунок 2.5 – Принципова схема експериментальної установки $9 \times 100 \times 250$ ДДМА, призначеної для експериментального дослідження процесу правки відносно товстих листів



1, 2 – блоки роликів; 3 – проставки; 4, 5 – блоки роликів

Рисунок 2.7 – Перетворення 9- роликової установки (а) в 7-ї (б) і 5-роликову (в) зі зміною кроку роликів (г)

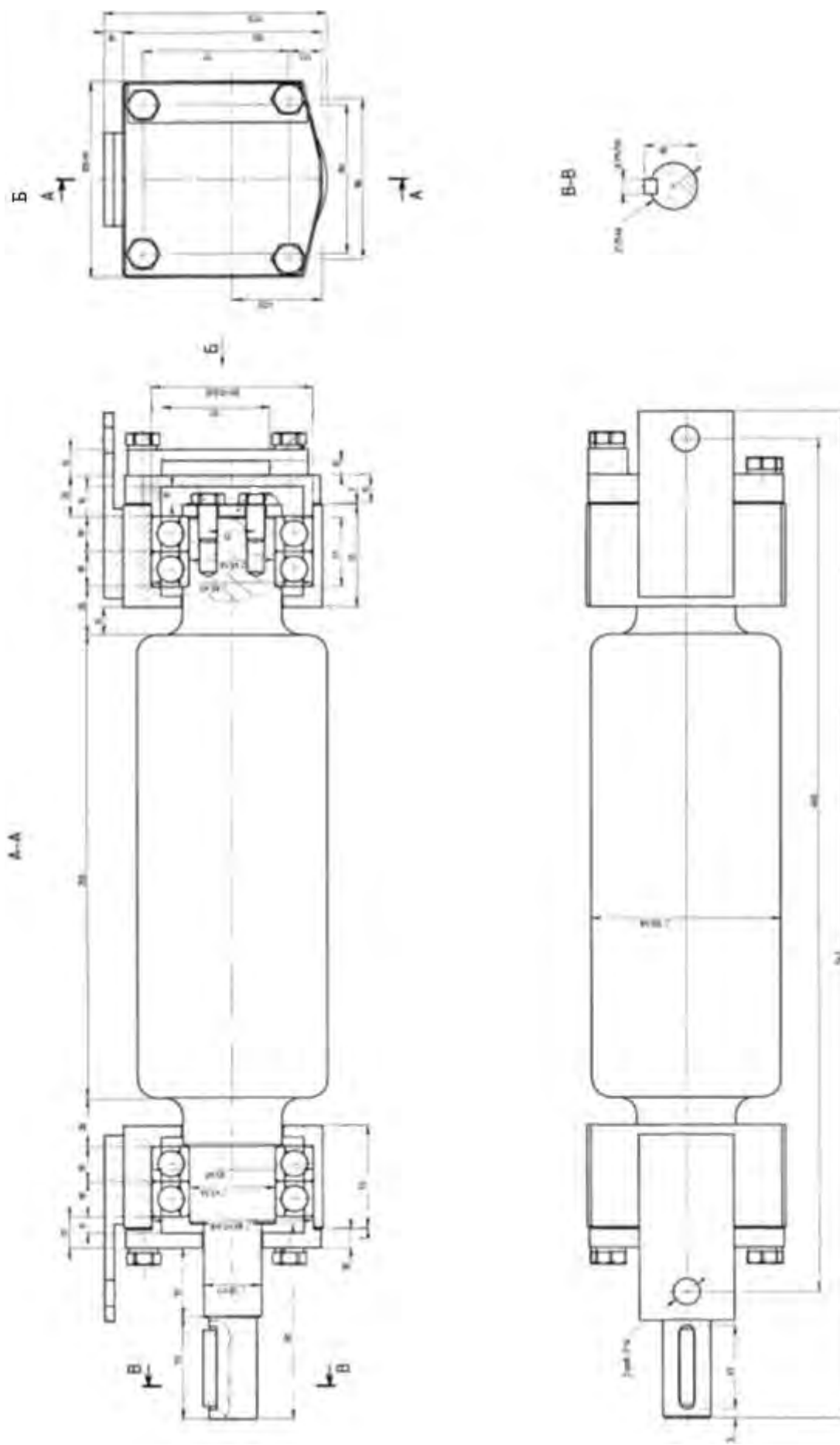


Рисунок 2.8 – Конструкція вузла ролика робочої кліті установки 9×100×250 ДДМА, призначеної для дослідження процесу правки відносно товстих листів

виготовлені зі сталі 45, а кожен з їхніх шийок було зафіксовано в подушках 2 за допомогою двох однорядних радіальних підшипників 3.

З метою забезпечення можливості приводу як мінімум на 8 робочих роликів була спроектована та виготовлена спеціалізована шестеренна кліть, загальний вигляд і конструкція якої ілюстровані рисунками 2.9 і 2.10. При цьому, було виготовлено 9 зубчастих коліс 1 зі сталі 40ХН, зварена конструкція вузла станин 2 шестеренної кліті, вхідний хвостовик валу 3 центрального зубчастого колеса був сполучений з приводом головної лінії робочої кліті, а вихідні хвостовики валів усіх зубчастих коліс за допомогою універсальних шпинделів на підшипниках кочення, були сполучені з приводними хвостовиками відповідних робочих роликів правильної машини.

Слід зазначити, що розглянута експериментальна установка була виконана з можливістю зміни кількості робочих роликів, задіяних у процесі правки, тобто з урахуванням можливості 5-ти, 7-і або 9-ти роликового компонування (див. рис. 2.7).

Для перетворення з 9-ти роликової (див. рис. 2.7, а) в 7-роликову правильну машину (див. рис. 2.7, б) з установки демонтується блоки роликів 1 і 2, подушки яких потім будуть установлені в нижню частину станини як проставки. У верхню частину станини встановлюються проставки 3. Для перетворення з 9-роликової в 5-роликову правильну машину (див. рис. 2.7, в) з установки демонтуються блоки роликів 1, 2, 4, 5 подушки яких потім будуть установлені у верхню та нижню частину станини як проставки. Також, для забезпечення фіксації подушок нижніх роликів у поперечному напрямку, встановлюються проставки 3.

Створена конструкція експериментальної установки правильної машини дозволяє встановлювати робочі ролики з довільно змінюваним кроком від 105 до 210 мм. Для цієї мети між подушками правильних роликів встановлюються проставки 3, подушки 1, 2, 4, 5 також використовуються в якості проставок, при цьому нижні подушки встановлюються на підставки 6 (див. рис. 2.7, г).

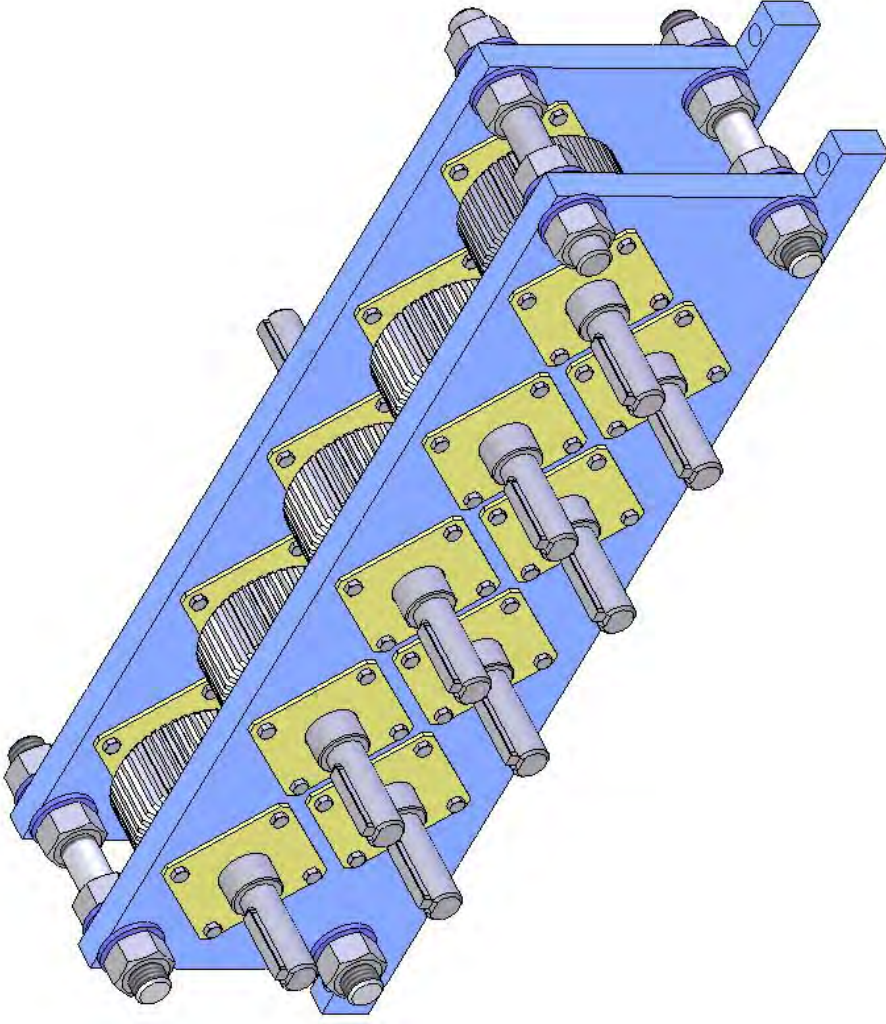


Рисунок 2.9 – Загальний вигляд шестеренної кліті експериментальної установки для дослідження процесу правки відносно товстих листових заготовок

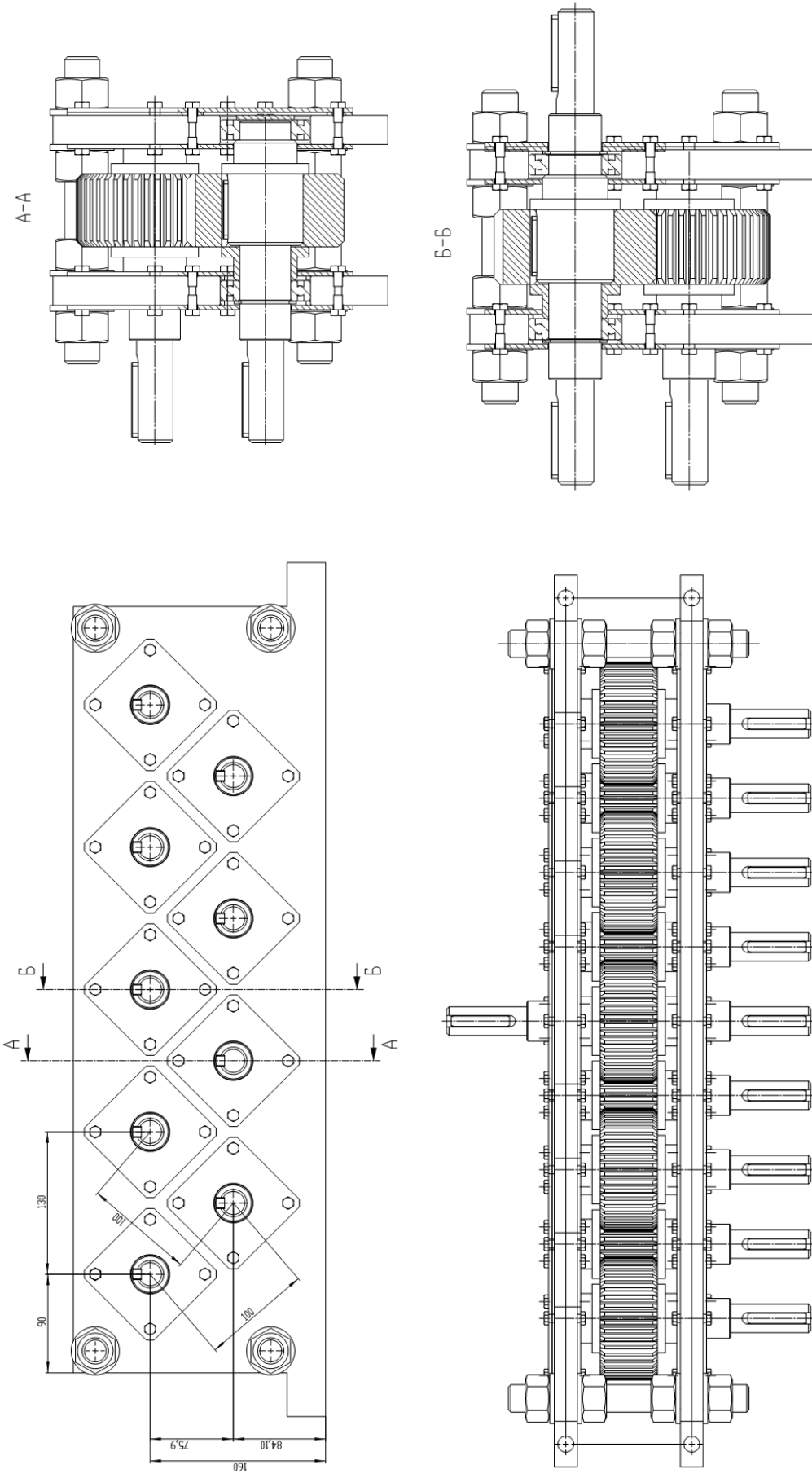


Рисунок 2.10 – Конструкція шестеренної кліті експериментальної установки 9×100×250 ДДМА, призначеної для експериментального дослідження процесу правки відносно товстих листових заготовок

У рамках проведення експериментальних досліджень безпосередньому виміру підлягали наступні основні технологічні параметри процесу правки листів, а саме:

- величина сумарного крутного моменту правки;
- величина сили правки на кожному ролику;
- вихідна χ_0 та кінцева χ_1 кривизна заготовок, що вимірювались

відповідно до методики роботи [145] за допомогою вимірів стріли прогину на базовій довжині.

Сумарний момент правки фіксувався за допомогою тензометричних датчиків опору, наклеєних відповідно до методик робіт [142...144] на тіло валу входу в шестеренну кліть (рис. 2.11). Під натискними гвинтами кожного з дев'яти правильних роликів були розміщені месدوزи з кільцевим пружним елементом, розраховані на сприйняття навантаження до 10000 Н (рис. 2.12).

З метою підвищення точності результатів експериментальних досліджень, тарировку вимірників крутних моментів виконували безпосередньо на установці шляхом їхнього імітаційного навантаження відповідними моментами відомої величини. Тарування силовимірювальних месдоз виконували шляхом їхнього імітаційного навантаження силами відомої величини за допомогою гідравлічного преса.

Показники можливих втрат, наприклад, механічний коефіцієнт корисної дії гідродомкрата, потужність електричних втрат, момент холостого ходу і так далі, як при тарировці, так і при наступній обробці отриманих результатів були враховані.

Запис досліджуваних параметрів виконували за допомогою аналого-цифрового перетворювача АЦП-ЦАП М-DAQ12, що забезпечує можливість виміру по 16 диференційованих каналах з наступним записом і обробкою даних на ЕОМ. Вхідний сигнал оцифровували шістнадцятибітним аналого-цифровим перетворювачем із частотою до 100 кГц і можливістю посилення в діапазоні 1...64.

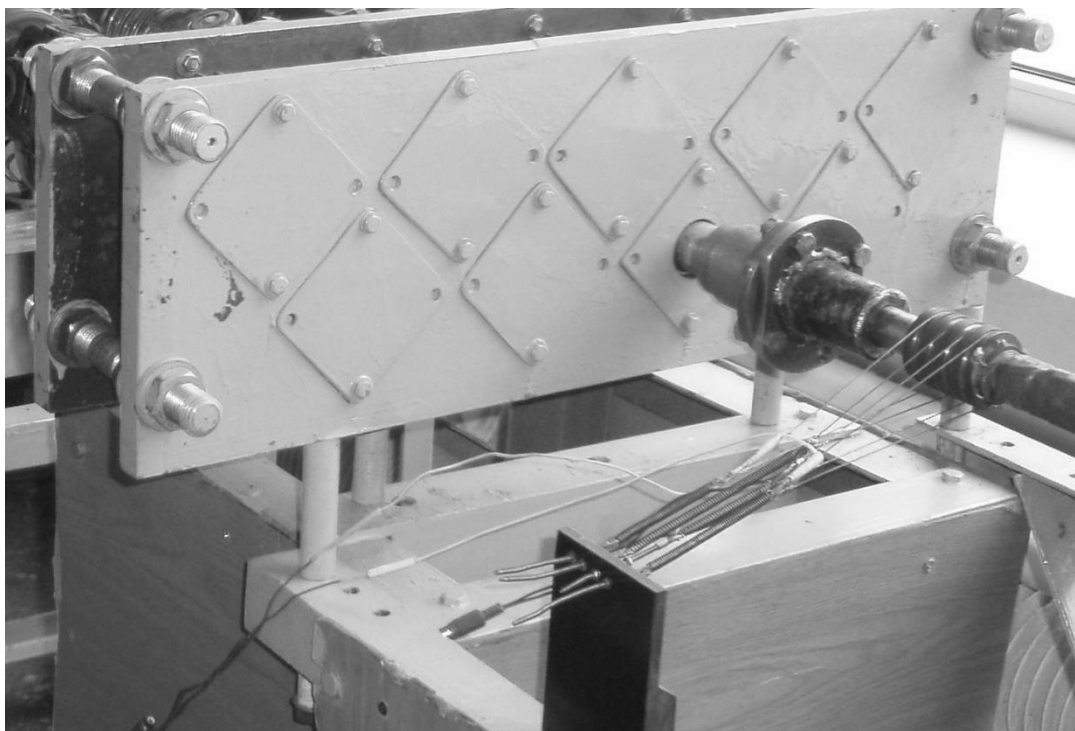


Рисунок 2.11 – Система струмознімачів датчиків моменту
на корінному валу повідної установки



Рисунок 2.12 – Система силовимірювальних месдоз
під натискними гвинтами установки

Обробку результатів експериментальних досліджень, а також оцінку ступеню відповідності отриманих теоретичних рішень робили з використанням загальноприйнятих методів теорії імовірності та математичної статистики [146-149]. Для відповідності явищ, які протікають у натурному зразку та моделі було забезпечено відповідність основним умовам і законам подібності: геометричної, силової, реологічної та кінематичної [128].

Висновки

1. У якості основного напрямку теоретичних і експериментальних досліджень процесів правки вигином листів, слід розглядати розширення сортаменту, підвищення якості та зниження собівартості готової металопродукції, забезпечувані на основі вдосконалювання діючих і створення нових високоефективних технологій і устаткування. Досить важливим, у цьому випадку, є також забезпечення економії матеріальних ресурсів, як з погляду питомих капітальних витрат, так і з погляду експлуатаційних витрат, що мають місце. Рішення даних завдань робить необхідним реалізацію комплексного підходу, що полягає у використанні різних методів теоретичних і експериментальних досліджень, а також максимально повний і уніфікований охват різних технологічних схем і конструктивних виконань багатороликових правильних машин.

2. Широкий спектр можливих умов реалізації процесів правки вигином, поряд з досить високим рівнем вимог щодо об'ємів і ступеня вірогідності надаваної інформації, роблять необхідним використання методів теорії пружності та пластичності, що включають метод чисельних ітераційних рішень одномірного вирішення умов безперервності геометричних параметрів пружної лінії листів при правці, а також метод скінчених елементів, які дозволяють повною мірою врахувати реальні геометричні параметри. Важливим у цьому випадку є забезпечення можливості безпосереднього прогнозування, вже на теоретичному рівні, основних показників якості листів, а також розподілу результуючих механічних властивостей, деформацій та напружень з наступним переходом на розробку систем автоматизованого проектування відповідних техно-

логій і устаткування. У якості критеріальних, при оцінці ступеня вірогідності отриманих теоретичних рішень, можуть бути використані результати відповідного скінчено-елементного математичного моделювання. Математичне та фізичне моделювання процесів правки повинні бути виконані з урахуванням основних положень теорії пластичності, теорії обробки металів тиском, механіки деформації твердого тіла. Для теоретичних досліджень застосованій МСЕ з метою визначення формозміни, розподілу деформацій, напружень, силових характеристик процесу правки. Розроблено методику чисельного рішення задачі пластичного деформування на основі МСЕ. Дослідження містять у собі чисельне моделювання, а також методи планованого експерименту.

3. Уточнення вихідних даних і оцінку ступеня вірогідності отриманих теоретичних рішень слід виконувати також на основі результатів експериментальних досліджень, методика проведення яких припускає максимально повне охоплення як по досліджуваних параметрах, так і по реалізованих у цьому випадку технологічних схемах правки. Відзначене може бути забезпечене за рахунок використання різного, у тому числі спеціально створеного, експериментального устаткування.

РОЗДІЛ 3

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ЕНЕРГОСИЛОВИХ І ГЕОМЕТРИЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ПРОЦЕСУ ПРАВКИ ГАРЯЧЕКАТАНИХ ЛИСТІВ

3.1 Математична модель з розрахунку енергосилових і геометричних параметрів процесів правки гарячекатаних листів

При проектуванні нового обладнання та удосконалення технології правки листового металопрокату найбільш доцільним є використання інженерних методик розрахунків напружено-деформованого стану, які дозволяють вирішувати завдання оптимізаційного плану. Відповідно до цього в даній роботі основна увага приділена інженерній моделі процесу правки, відмінною рисою якої є врахування таких факторів, як безперервність епюри кутів повороту на границях розрахункових ділянок листа, зсув точки контакту від вершини ролика по горизонталі та вертикалі, вплив залишкових напружень, можливість переходу зосередженого контакту в розподілений і врахування зміцнення металу при виправленні.

Для спрощення моделі та зниження трудомісткості обчислень був прийнятий ряд припущень:

- геометрична лінійність задачі, що дозволяє внаслідок малості кутів нахилу листа описувати кривизну по спрощеній формулі $\chi = d^2y/dx^2$;
- у моделі розглядається два випадки: матеріал листа або не зміцнюється, або його пластичний стан визначається принципом Мазинга та ефект Баушингера враховується як ідеальний [150; 151];
- кусочно-лінійна апроксимація епюри згинальних моментів при вертикальному напрямку реакцій роликів через малість кутів нахилу листа.

Розрахункова схема, що використовується при математичному моделюванні представлена на рисунку 3.1, де показана *i*-та міжроликова ділянка.

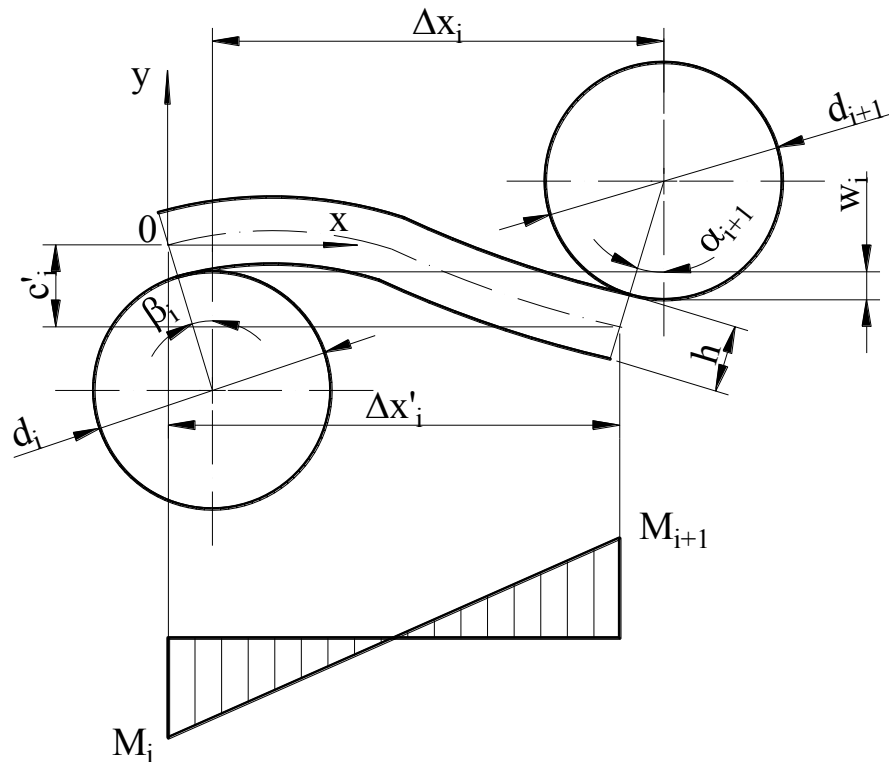


Рисунок 3.1 – Розрахункова схема до математичної моделі процесу правки листового металопродукту

Діаметри роликів d_i і крок між роликками Δx_i можуть бути постійними або змінними залежно від типу застосовуваного правильного устаткування. За початок координат прийнята точка O , яка розташована на нейтральній лінії та перебуває в перерізі початку контакту металу з першим роликом. Перекриття роликів позначені через w_i , при цьому одне з перекриттів приймається рівним нулю, а наступні відлічуються у бік збільшення прогину листа. Геометричні координати, що обмежують міжроликову зону – лінійні $\Delta x'_i$, c'_i та кутові α_{i+1} , β_i .

Згідно з розрахунковою схемою лінійні координати дорівнюють:

$$\Delta x'_i = \Delta x_i + 0,5[(d_i + h)\sin\beta_i - (d_{i+1} + h)\sin\alpha_{i+1}]; \quad (3.1)$$

$$c'_i = c_i - (d_i + h)\sin^2 0,5\beta_i - (d_{i+1} + h)\sin^2 0,5\alpha_{i+1}, \quad (3.2)$$

де c_i – прогин листа для даної пари суміжних роликів без урахування зсуву:

$$c_i = f_i + f_{i+1} + h;$$

f_i, f_{i+1} – перекриття роликів, при цьому $w_i = f_i + f_{i+1}$.

До деформаційних показників процесу правки відносять кривизну вигину середнього шару листа χ_i , яка вважається позитивною, якщо по напрямку вона збігається з кривизною контактної поверхні самого ролика. Відповідно кривизні визначається знак згинального моменту M_i . Таким чином, на кожній i -й ділянці поточна кривизна χ міняється від $-\chi_i$ до χ_{i+1} , а поточне значення змінного моменту від $-M_i$ до M_i .

У подальших розрахунках для зручності та спрощення формул замість кривизни вигину листа та згинальних моментів використовуються їхні відповідні відносні величини:

$$k = Eh\chi/2\sigma_T; \quad (3.3)$$

$$m = 6M/\sigma_T Bh^2. \quad (3.4)$$

У більшості випадків контакт листа з роликками у правці вигином є зосередженим, тобто для цього випадку рівняння (3.1)...(3.2) можуть бути доповнені умовами рівності:

$$\alpha_i = \beta_i \text{ при } i = 2 \dots n - 1, \quad (3.5)$$

за допомогою яких забезпечується узгодження кутів нахилу листа на границях окремих ділянок і тим самим безперервність епюри кута повороту перерізів. Однак, для урахування всіх можливих випадків правки доцільно передбачити також можливість переходу до розподіленого контакту, при якому на роликках виникають ненульові кути охопту $\varphi_i = \alpha_i - \beta_i$, що можна врахувати при

виконанні умови $k_i > k_{i \text{ lim}}$, де $k_{i \text{ lim}}$ – гранично можливе значення відносної кривизни вигину на ролику:

$$k_{i \text{ lim}} = \frac{Eh}{\sigma_T \cdot (d_i + h)}. \quad (3.6)$$

Тобто слід замінити i -е рівняння (3.3) рівнянням (3.6).

Подальша деталізація рішення визначається тим, у якій формі приймати залежність між кривизною та моментом. Нехай при однократному вигині листа без вихідної кривизни маємо $m = f(k)$ або $k = \varphi(m)$. Якщо враховувати вплив історії навантаження тільки через залишкову кривизну, яку лист здобуває після перегину на попередньому ролику (у безрозмірному виді $k_{\text{ост.}i} = k_i - m_i$), тобто спрощено зводити багаторазовий знакозмінний вигин до однократного, то для i -ої міжроликової ділянки:

$$k = \begin{cases} m - k_i + m_i, & -m_i \leq m \leq 0; \\ \varphi(m) - k_i + m_i, & 0 \leq m \leq m_{i+1}. \end{cases} \quad (3.7)$$

Більш строге рішення вимагає послідовного врахування розвитку епюри напружень, яка настільки ускладнюється, що описати її єдиною функцією в аналітичному виді не представляється можливим. Подолати ці труднощі вдається на основі моделі Мазінга [151]. При цьому необхідно враховувати, що в процесі правки вигином коливання кривизни та моменту спочатку зростають, а потім зменшуються.

З аналізу моделі Мазінга випливає, що у випадку коливань зі зростаючою амплітудою залежність між кривизною та моментом у межах одного циклу деформування узгодиться з даним принципом лише доти, поки ширина та висота гістерезисної напівпетлі не зрівняються зі своїми старими значеннями наприкінці попереднього циклу, після чого процес знову буде описуватися в

координатах k , m вихідною залежністю. Таким чином, у загальному випадку для i -ої ділянки:

$$k = \begin{cases} 2\varphi\left(\frac{m_i + m}{2}\right) - k_i, & m \leq m_{\max}(i); \\ \varphi(m) + (-1)^i k_0, & m > m_{\max}(i), \end{cases} \quad (3.8)$$

$$m_{\max}(i) = \max(m_1 \dots m_i), \quad (3.9)$$

де k_0 – безрозмірна вихідна кривизна.

Якщо амплітуда коливань починає убувати, петлі гістерезису стають розімкнутими і обчислення йдуть тільки по першій частині формули (3.8). Для першої ділянки $m_{\max 1} = m_1 = 0$, і обчислення йдуть однозначно по другій частині, тобто має місце вихідна залежність.

Тут слід зазначити, що уточнення, пов'язане з розглядом не однієї, а двох ділянок на кривій Мазінга при зростаючій амплітуді коливань, відносно невелике, у той час як формули ускладнюються через це надалі досить суттєво. Але таке уточнення виправдане міркуваннями коректності – наприклад, воно виключає ситуацію, коли під квадратним коренем з'являється негативна величина в процесі обчислення кривизни через момент.

Вид функції $\varphi(m)$ з урахуванням (3.4) визначається прийнятим законом зміцнення. Для ідеального пружнопластичного тіла:

$$\varphi(m) = \begin{cases} m, & m \leq 1; \\ 1/\sqrt{3 - 2m}, & m > 1. \end{cases} \quad (3.10)$$

Форма поздовжньої осі листа завдяки геометричній лінійності задачі описується спрощеним диференціальним рівнянням

$$d^2y/dx^2 = \chi[M(x)] \quad (3.11)$$

з граничними умовами

$$x = 0 \Rightarrow y = 0, dy/dx = \operatorname{tg}\beta_i; \quad x = \Delta x_i' \Rightarrow y = -c_i', dy/dx = -\operatorname{tg}\alpha_{i+1}. \quad (3.12)$$

Передбачається, що кривизна в правій частині рівняння функціонально пов'язана зі згинальним моментом, який, у свою чергу, як уже відмічалось, лінійно залежить від координати X :

$$M = (M_i + M_{i+1})x/\Delta x_i' - M_i. \quad (3.13)$$

При $-M_i \leq M \leq M_{i+1}$ рішення рівняння кривизни $\chi = d^2y/dx^2$ з урахуванням формули (3.13) і умов (3.1)...(3.2):

$$\begin{aligned} \frac{\partial y}{\partial x} &= \operatorname{tg}\beta_i + \frac{\Delta X_i'}{M_i + M_{i+1}} \int_{-M_i}^M \chi dM; \\ y &= \Delta X_i' \operatorname{tg}\beta_i \frac{M_i + M}{M_i + M_{i+1}} + \left(\frac{\Delta X_i'}{M_i + M_{i+1}} \right)^2 \int_{-M_i}^M dM \int_{-M_i}^M \chi dM. \end{aligned} \quad (3.14)$$

Рішення сформульованої крайової задачі приводить до наступних рівнянь для кута сходу листа з i -го ролика та кута підходу до $i+1$ -го ролика:

$$\begin{aligned} \operatorname{tg}\beta_i &= -\frac{2\sigma_T \cdot \Delta x_i'}{Eh} \cdot \frac{1}{(m_i + m_{i+1})^2} \int_{-m_i}^{m_{i+1}} dm \int_{-m_i}^m k \cdot dm - \frac{c_i'}{\Delta x_i}; \\ \operatorname{tg}\alpha_{i+1} &= \frac{2\sigma_T \cdot \Delta x_i'}{Eh} \cdot \left[\frac{1}{(m_i + m_{i+1})^2} \int_{-m_i}^{m_{i+1}} dm \int_{-m_i}^m k \cdot dm - \frac{1}{m_i + m_{i+1}} \int_{-m_i}^{m_{i+1}} k dm \right] + \frac{c_i'}{\Delta x_i} \\ &\text{при } i = 1 \dots n - 1. \end{aligned} \quad (3.15)$$

Розглядаючи послідовно ділянки з умовами зв'язку $\alpha_i = \beta_i$, одержимо систему з $4n - 6$ рівнянь (3.15) при $i = 1 \dots n - 1$, що становить основну частину математичної моделі.

Методика розрахунків була розроблена для прямої постановки задачі, метою якої є рішення системи рівнянь моделі відносно невідомих $\alpha_2 \dots \alpha_n$, $\beta_1 \dots \beta_{n-1}$, $m_2 \dots m_{n-1}$ (на крайніх роликах моменти дорівнюють нулю – $m_1 = m_n = 0$) при заданих перекриттях роликів $w_1 \dots w_n$ і визначення геометричних характеристик нейтральної лінії листа при правці. У ході рішення, крім моментів на роликах, обчислюються також невідомі значення кривизни $k_2 \dots k_n = k_{\text{ост}}$ на основі залежності (3.8), яка стає рекурентною формулою для кривизни, якщо приймати $m = m_{i+1}$.

У викладеній вище методиці розрахунків використовується ітераційна схема рішення.

Для зручності розрахунків у методиці використовується ряд допоміжних функцій $f(k)$, $\varphi_1(m)$, $\varphi_2(m)$, $m_{\text{max}}(i)$, $F_1(i)$ і $F_2(i)$:

$$f(k) = \begin{cases} k, & k \leq 1; \\ (3 - 1/k^2)/2, & k > 1; \end{cases} \quad (3.15)$$

$$\varphi_1(m) = \begin{cases} m^2/2, & m \leq 1; \\ 1,5 - \sqrt{3 - 2m}, & m > 1; \end{cases} \quad (3.16)$$

$$\varphi_2(m) = \begin{cases} m^3/6, & m \leq 1; \\ 1,5m + [(3 - 2m)^{1,5} - 5]/3, & m > 1; \end{cases} \quad (3.17)$$

$$m_{\text{max}}(i) = \max(m_1; \dots; m_i). \quad (3.18)$$

$$F_1(i) = \frac{8\varphi_1[(m_i + m_{i+1})/2]}{m_i + m_{i+1}}; \quad F_2(i) = \frac{16\varphi_2[(m_i + m_{i+1})/2]}{(m_i + m_{i+1})^2}$$

при $m_{i+1} \leq m_{\text{max}}(i)$; (3.19)

$$m_{\text{max}} = m_{\text{max}}(i); \quad c_1 = (m_i + m_{\text{max}})/2; \quad c_2 = m_{i+1} - m_{\text{max}};$$

$$F_2(i) = \frac{16\varphi_2(c_1) + 2\varphi_2(m_{i+1}) - 2\varphi_2(m_{\max})}{(m_i + m_{i+1})^2} + \frac{2c_2 \cdot [4\varphi_1(c_1) - \varphi_1(m_{\max})] + c_2^2 \cdot [k_i + (-1)^i k_0]}{(m_i + m_{i+1})^2} \quad (3.20)$$

при $m_{i+1} \triangleright m_{\max}(i)$.

На початку розрахунків перевіряється геометрична умова допустимості заданих перекриттів.

У розробленій математичній моделі передбачена можливість наближеного урахування впливу поперечних (аксіальних) напружень. Напружено-деформований стан листового та штабового прокату вважається в процесах правки вигином плоским через відносно невелику товщину металу в порівнянні з шириною, радіусом вигину та відстанню між роликками. Головними напруженнями при правці вважають поздовжню (тангенціальну), радіальну та аксіальну компоненти нормальних напружень, їм же відповідають головні деформації. З них при постановці плоскої задачі радіальне напруження та аксіальну деформацію приймають рівними нулю, а з інших розглядають звичайно тільки поздовжні напруження та деформації. Наявність аксіальних напружень мається на увазі, але не враховується.

Беручи до уваги, що при пружному деформуванні існує така ж залежність між поздовжніми компонентами напружень та деформації, як у випадку лінійного напруженого стану матеріалу з модулем пружності [152]:

$$E' = E / (1 - \nu^2), \quad (3.21)$$

де ν – коефіцієнт Пуассона оброблюваного матеріалу, а при деформуванні за межами пружності поздовжнє напруження з ростом деформації прагне до значення опору деформації [152]:

$$\sigma_T' = 2\sigma_T / \sqrt{3}, \quad (3.22)$$

можливо приблизно враховувати в рамках одноосової схеми плоский характер напруженого стану, тобто внесок аксіальних напружень, підставляючи у формули замість величин σ_T і E їх ефективні значення σ_T' і E' відповідно.

При холодній правці зміна механічних властивостей матеріалу листів може бути описана статечною залежністю виду (1.12).

Відносну деформацію, що входить у формулу (1.12), згідно даним роботи [150] можна прийняти як:

$$\varepsilon = h/2r, \quad (3.23)$$

де $1/r = \chi$ – сумарна кривизна скривлення та пружного пружинення.

З урахуванням вихідної кривизни листа χ_0 вираз (3.23) перетвориться в наступний [150]:

$$\varepsilon = \frac{(\chi_i - \chi_0)h/2}{1 + \chi_0 h/2}. \quad (3.24)$$

У якості вихідних даних при чисельній реалізації розробленої математичної моделі процесу правки використовуються:

h, b – товщина та ширина листа;

$a_1 \dots a_3$ – коефіцієнти регресії, що описують залежність межі плинності від деформації, модуль пружності та коефіцієнт Пуассона оброблюваного матеріалу;

χ_0 – вихідна кривизна листа;

n, d – кількість і діаметр робочих роликів;

t – горизонтальна відстань між роликами (крок роликів);

W_i – перегин листа на кожному з роликів.

Для коректного задавання вихідних даних слід враховувати наступне:

– коефіцієнт Пуассона матеріалу листа задається тільки лише при необхідності наближеного урахування плоского характеру напруженого стану матеріалу листа. Вихідна кривизна вважається позитивною, якщо по напрямкові збігається з кривизною контактної поверхні першого ролика;

– діаметри роликів ($i = 1 \dots n$) у правильних машинах з постійним кроком і без напрямних роликів $d_i \equiv d$, $\Delta x_i \equiv t/2$. При наявності напрямних роликів їх діаметри $d_1 \dots d_n$ можуть відрізнятися від d , а відстані $\Delta x_1 \dots \Delta x_{n-1}$ – від $t/2$. У машинах зі змінним кроком (правильних станах) усі d_i та всі Δx_i різні.

У моделі перекриття всіх роликів відлічуються відносно рівня правки, тобто від загальної дотичної до роликів одного ряду, для яких, як правило, перекриття відсутнє $f_i \equiv 0$ (наприклад, нижній ряд). Перекриття роликів протилежного ряду можуть бути постійними (робочі ролики машин з паралельним налаштуванням, правильні стани), змінюватися за лінійним законом (машини з похилим налаштуванням) або призначатися незалежно (напрямні ролики машин з паралельним налаштуванням, машини з індивідуальним налаштуванням). Позитивний напрямок відліку – у бік збільшення прогинів листа.

Закладена в методиці розрахунків можливість коректного урахування перегинів листа на кожному з робочих роликів листопрямильної машини дозволяє оцінити ступінь ефективності застосовуваного технологічного процесу, а також розробити рекомендації з його вдосконалення, при цьому реалізована математична модель дозволяє використовувати в якості вихідних даних будь-яке практично реалізоване технологічне налаштування робочих роликів від паралельного до індивідуального.

При цьому для кожної i -ї пари роликів, $i=1 \dots n-1$, для якої:

$$\Delta x_i < (d_i + d_{i+1})/2 + h, \quad (3.25)$$

перевіряється умова

$$f_i + f_{i+1} \leq (d_i + d_{i+1})/2 - \sqrt{[(d_i + d_{i+1})/2 + h]^2 - (\Delta x_i)^2}, \quad (3.26)$$

яка являє собою умову спільності заданих перегинів листа на міжроликовій ділянці.

Послідовність розрахунків відносних значень кривизни та згинального моменту на роликах представлена нижче.

Ефективні значення межі плинності (опору деформації) і модуля пружності:

якщо напружений стан вважається лінійним, то

$$\sigma_T' = \sigma_T; E' = E, \quad (3.27)$$

якщо напружений стан вважається плоским, то

$$\sigma_T' = 2\sigma_T/\sqrt{3}, E' = E/(1 - \nu^2). \quad (3.28)$$

Відносна вихідна кривизна:

$$k_0 = E'h\chi_0/(2\sigma_T'). \quad (3.29)$$

Граничні значення відносної кривизни вигину на роликах

$$k_{i, \text{lim}} = E'h/[\sigma_T' \cdot (d_i + h)] \quad \text{при } i = 2, \dots, n - 1. \quad (3.30)$$

Прогин листа для кожної пари роликів

$$c_i = f_i + f_{i+1} + h \quad \text{при } i = 1, \dots, n - 1. \quad (3.31)$$

Відносна кривизна вигину листа на першому ролику

$$k_1 = k_0. \quad (3.32)$$

Відносні згинальні моменти на крайніх роликах

$$m_1 = m_n = 0. \quad (3.33)$$

Початкові відносні значення кривизни та згинального моменту на інших роликах

$$k_i = m_i = \min \left[\frac{3E'hc_{i-1}}{\sigma_T' \cdot (\Delta x_{i-1})^2}; 1,5 \right] \text{ при } i = 2, \dots, n-1. \quad (3.34)$$

Початкові значення кутів підходу листа до і-го ролику та сходу з попереднього і-1 ролика

$$\alpha_i = 2 \arctg \frac{c_{i-1}}{2\Delta x_{i-1}}, \quad \beta_{i-1} = -\alpha_i \text{ при } i = 2, \dots, n. \quad (3.35)$$

Початкове значення лічильника числа ітерацій

$$j=0. \quad (3.36)$$

Чергове наближення невідомих для першої мікроликової ділянки (ролики 1-2). Збільшується значення лічильника числа ітерацій:

$$j = j + 1. \quad (3.37)$$

Запам'ятовуються старі значення кута підходу до другого ролика та кута сходу з першого ролика:

$$\alpha = \alpha_2, \quad \beta = \beta_1. \quad (3.38)$$

Обчислюються горизонтальні та вертикальні відстані між краями ділянки з урахуванням зсуву точок контакту відносно вершин роликів:

$$\begin{aligned} \Delta x_1' &= \Delta x_1 + 0,5(d_1 + h)\sin\beta - 0,5(d_2 + h)\sin\alpha; \\ c_1' &= c_1 - (d_1 + h)\sin^2 0,5\beta - (d_2 + h)\sin^2 0,5\alpha. \end{aligned} \quad (3.39)$$

Обчислюються нові значення кутів підходу та сходу:

$$a = \frac{\sigma_T' \cdot \Delta x_1'}{E'h} \cdot \left[k_0 - \frac{2\varphi_1(m_2)}{m_2} + \frac{2\varphi_2(m_2)}{m_2^2} \right] + \frac{c_1'}{\Delta x_1}; \quad (3.40)$$

$$\alpha_2 = \alpha - \frac{\alpha - \arctg a}{1 + 0,5(d_2 + h)a/\Delta x_1}; \quad (3.41)$$

$$\beta_1 = \arctg \left\{ \frac{2\sigma_T' \cdot \Delta x_1'}{E'h} \cdot \left[k_0 - \frac{\varphi_1(m_2)}{m_2} \right] - \tg \alpha_2 \right\}. \quad (3.42)$$

Підраховується погрішність між двома послідовними наближеннями

$$s = |\alpha_2 - \alpha| + |\beta_2 - \beta|. \quad (3.43)$$

Чергові наближення невідомих послідовно для кожної i -ї мікроликової ділянки, $i = 2, \dots, n-1$. Запам'ятовуються старі значення кута підходу до $(i+1)$ -го ролику та кута сходу з i -го ролика відповідно:

$$\alpha = \alpha_{i+1}, \quad \beta = \beta_i. \quad (3.44)$$

Обчислюються горизонтальні та вертикальні відстані між краями ділянки при новому значенні кута сходу $\beta_i = \alpha_i$, тобто в припущенні, що на i -му ролику реалізується зосереджений тип контакту:

$$\begin{aligned}\Delta x_i' &= \Delta x_i + 0,5(d_i + h)\sin\alpha_i - 0,5(d_{i+1} + h)\sin\alpha; \\ c_i' &= c_i - (d_i + h)\sin^2 0,5\alpha_i - (d_{i+1} + h)\sin^2 0,5\alpha.\end{aligned}\quad (3.45)$$

Обчислюється відносна кривизна вигину на i -му ролику при $\beta_i = \alpha_i$:

$$k_i = \frac{E'h}{\sigma_T' \cdot \Delta x_i'} \cdot \left(\frac{c_i'}{\Delta x_i'} + \operatorname{tg}\alpha_i \right) + F_2(i).\quad (3.46)$$

Якщо після обчислення $k_i > k_{i,\text{lim}}$, то кривизна обмежується граничним значенням: $k_i = k_{i,\text{lim}}$. Відстані між краями ділянки перераховуються при старому значенні кута сходу:

$$\begin{aligned}\Delta x_i' &= \Delta x_i + 0,5(d_i + h)\sin\beta - 0,5(d_{i+1} + h)\sin\alpha; \\ c_i' &= c_i - (d_i + h)\sin^2 0,5\beta - (d_{i+1} + h)\sin^2 0,5\alpha.\end{aligned}\quad (3.47)$$

Обчислюється відносний згинальний момент на i -му ролику:

$$m_i = 2f[(k_{i-1} + k_i)/2] - m_{i-1}.\quad (3.48)$$

Якщо після обчислення $m_i > m_{\max(i-1)}$, то момент перераховується:

$$m_i = f[k_i + (-1)^i k_0].\quad (3.49)$$

Обчислюються нові значення кутів підходу та сходу:

$$F_1 = F_1(i); \quad (3.50)$$

$$a = \frac{\sigma_T' \cdot \Delta x_i'}{E'h} \cdot [k_i - F_1 + F_2(i)] + \frac{c_1'}{\Delta x_1}; \quad (3.51)$$

$$\alpha_{i+1} = \alpha - \frac{\alpha - \text{arctg } a}{1 + 0,5(d_{i+1} + h)a/\Delta x_i}; \quad (3.52)$$

$$\beta_i = \text{arctg} \left[\frac{\sigma_T' \cdot \Delta x_i'}{E'h} \cdot (2k_i - F_1) - \text{tg } \alpha_{i+1} \right]. \quad (3.53)$$

Підраховується сумарна погрішність між двома послідовними наближеннями:

$$s = s + |\alpha_{i+1} - \alpha| + |\beta_i - \beta|. \quad (3.54)$$

Розрахунки за формулами (3.45)...(3.55) повторюють доти, поки погрішність виявиться строго рівною нулю або погрішність через обмежену машинну точність обчислень перестане зменшуватися, причому число ітерацій у цей момент буде більше гранично припустимого значення (з досвіду розрахунків подібних завдань можна прийняти гранично припустимим $j = 12$) [132].

Відносна залишкова кривизна:

$$k_{\text{ост}} = k_n = m_{n-1} - k_{n-1}. \quad (3.55)$$

Абсолютна залишкова кривизна:

$$\chi_{\text{ост}} = 2\sigma_T' k_{\text{ост}} / (E'h). \quad (3.56)$$

Розглянуті вище теоретичні рішення склали повний алгоритм з автоматизованого розрахунку локальних та інтегральних показників напружено-деформованого стану металу, що має місце при правці листів, однак практичний інтерес представляють і енергосилові параметри процесу правки.

Для визначення сили та крутного моменту правки необхідно розв'язати систему рівнянь відносно величин m_i, α_i, β_i . Сили, що діють на ролики, визначаються з умов рівноваги. У загальному випадку:

$$P_i = (M_{i-1} + M_i) / \Delta x_{i-1}' + (M_i + M_{i+1}) / \Delta x_i', \quad (3.57)$$

де $\Delta x_i'$ обчислюються згідно з формулою (3.1). Без урахування зсувів при $\Delta x_i \equiv t/2$ ця формула збігається з відомою [152]:

$$P_i \approx 2(M_{i-1} + 2M_i + M_{i+1}) / t. \quad (3.58)$$

Переходячи до відносних величин, одержимо

$$P_i = p_i \cdot \sigma_T \cdot B \cdot h, \quad (3.59)$$

де $p_1 = m_2 h / 6 \Delta x_1'$;

$$p_i = \frac{(m_{i-1} + m_i)h}{6 \Delta x_{i-1}'} + \frac{(m_i + m_{i+1})h}{6 \Delta x_i'} \quad \text{при } i = 2 \dots n - 1;$$

$$p_n = m_{n-1} h / 6 \Delta x_{n-1}'. \quad (3.60)$$

Горизонтальна сила, необхідна для протягування листа через i -ту між-роликову ділянку машини [152]:

$$\Delta T_i = - \int_{-M_i}^{M_{i+1}} \chi dM = \frac{\sigma_T B h^2}{6 \Delta x_i} \cdot (m_i + m_{i+1}) (\operatorname{tg} \beta_i + \operatorname{tg} \alpha_{i+1}). \quad (3.61)$$

Звідси для відносної сумарної сили протягування:

$$T_{\text{пр}} = \sum_{i=1}^{n-1} \Delta T_i / (\sigma_T B h), \quad (3.62)$$

впливає формула:

$$T_{\text{пр}} = \frac{1}{6} \sum_{i=1}^{n-1} (m_i + m_{i+1}) \cdot (\operatorname{tg} \beta_i + \operatorname{tg} \alpha_{i+1}) h / \Delta x_i'. \quad (3.63)$$

Останню формулу можна використовувати в наближеному виді:

$$T_{\text{пр}} \approx \frac{\sigma_T}{E} \sum_{m_i > 1} \frac{(k_i - 1)^2}{k_i}, \quad (3.64)$$

яка отримана в припущенні, що петля гістерезисної залежності між кривизною та моментом для двох сусідніх мікроликових ділянок є приблизно замкненою та зміцнення матеріалу відсутнє. Погрішність цієї формули (3.64) в порівнянні з попередньою (3.63) в більшості випадків не перевершує декількох відсотків.

Сумарний крутний момент, що витрачається на здійснення роботи пластичного деформування, при однаковому діаметрі приводних роликів d виражається через параметр $T_{\text{пр}}$ формулою [152]:

$$M_{\text{кр}, \Sigma} = 0,5(d + h) \sum_{i=1}^{n-1} \Delta T_i = T_{\text{пр}} \sigma_T B h \cdot (d + h) / 2. \quad (3.65)$$

Як приклад на рисунках 3.2 і 3.3 представлені розрахункові розподіли різниці у витяжках по середині листа та по його хвилястих краяхах, а також відносної кривизни залежно від довжини та амплітуди хвилі.

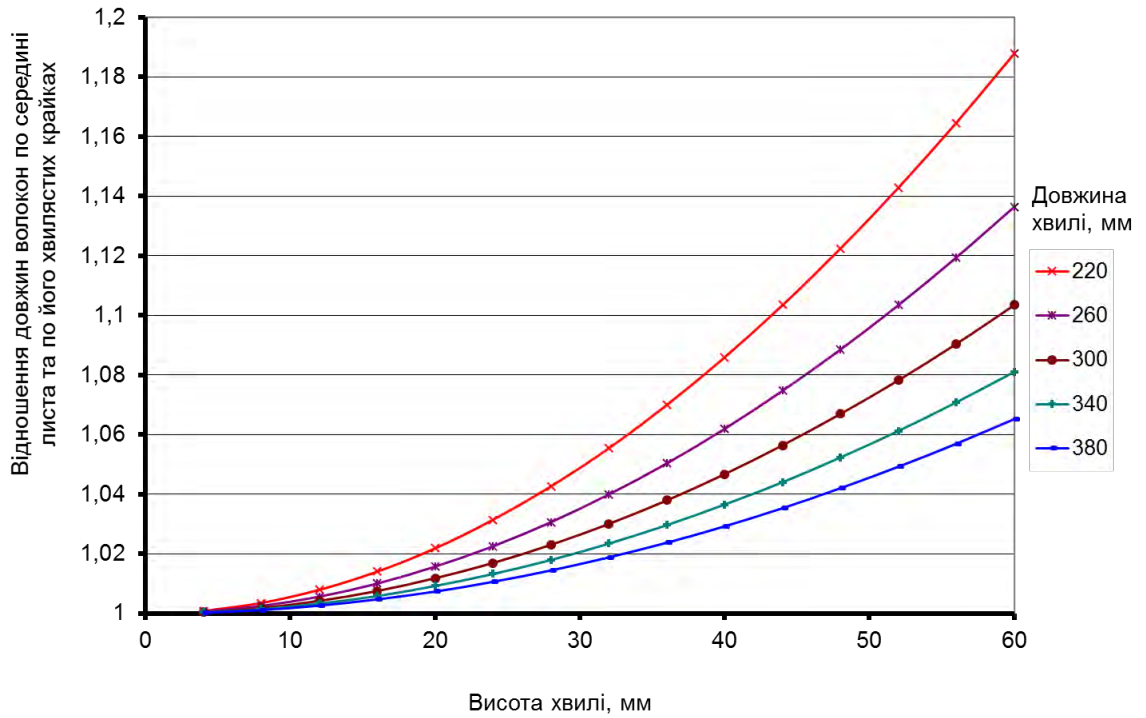


Рисунок 3.2 – Залежність різниці у витяжках по середині листа та по його хвилястих краях від висоти та довжини хвилі ($n = 13$; $h = 4$ мм; $d = 210$

мм;

$t = 230$ мм; $b = 2000$ мм; сталь 08кп)

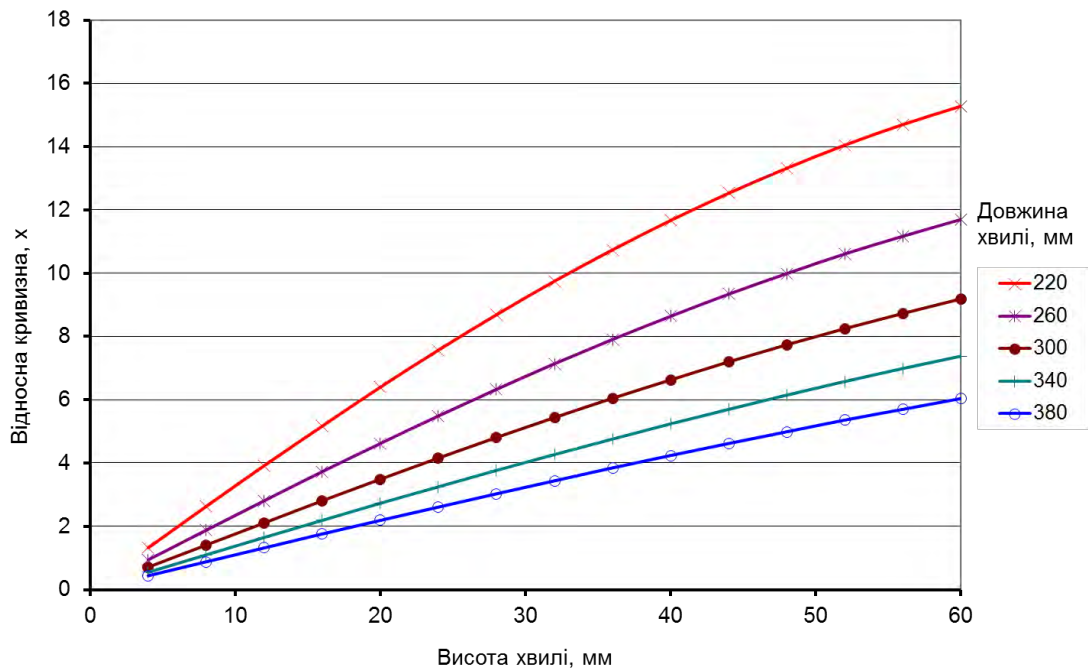


Рисунок 3.3 – Залежність відносної кривизни від висоти та довжини хвилі ($n = 13$; $h = 4$ мм; $d = 210$ мм; $t = 230$ мм; $b = 2000$ мм; сталь 08кп)

Дані залежності були використані в якості вихідних даних при реалізації тривимірної моделі процесу правки [153].

По В.К. Пірсону показник форми, який відповідає поперечній кривизні радіусом 10^4 см елементу шириною 1 см, коли він вилучений з листа та розташований на площині, вимірюється в мон [3].

Згідно з дослідженнями В. К. Пірсона, критичне з погляду втрати площинності значення відносної різниці витяжок на одиницю ширини при створенні хвилі по краях становить 0,02 мон. При величині характеристики форми $\Phi = 0,02 \dots 0,1$ мон спостерігається дуже добрий стан площинності листів з хвилею по краях без перевищення амплітуди в 4 мм/м. При характеристиці форми $\Phi = 0,1 \dots 1$ мон спостерігається гарний стан поверхні з амплітудою хвилі 4...8 мм/м. При характеристиці форми $\Phi = 1 \dots 2$ мон – задовільний стан поверхні з амплітудою хвилі 8...12 мм/м [3].

Розглянуті в рамках даного розділу теоретичні рішення склали повний алгоритм з автоматизованого розрахунку локальних та інтегральних показників напружено–деформованого стану металу при холодній правці. На основі викладеного алгоритму розроблені програмні засоби в лінгвістичному середовищі MS VB6.1, представлені в додатку А.

Як приклад чисельної реалізації розроблених програмних засобів на рисунках 3.4...3.8 представлені розподіли сил правки та відносної кривизни листа по роликах правильної машини при правці листів різної товщини від 4 до 14 мм стосовно до умов реалізації процесу на листоправильній машині 13×210×2800 лінії обробки листів.

З аналізу представлених залежностей можна зробити висновок про вплив властивостей матеріалу, його геометричних характеристик, форми хвилі по крайках, а також налаштувань роликів на кінцеву відносну кривизну листа, а саме:

– зі збільшенням товщини листів або зменшенням межі плинності матеріалу при одних і тих же конструктивних параметрах ЛПМ кінцева кривизна

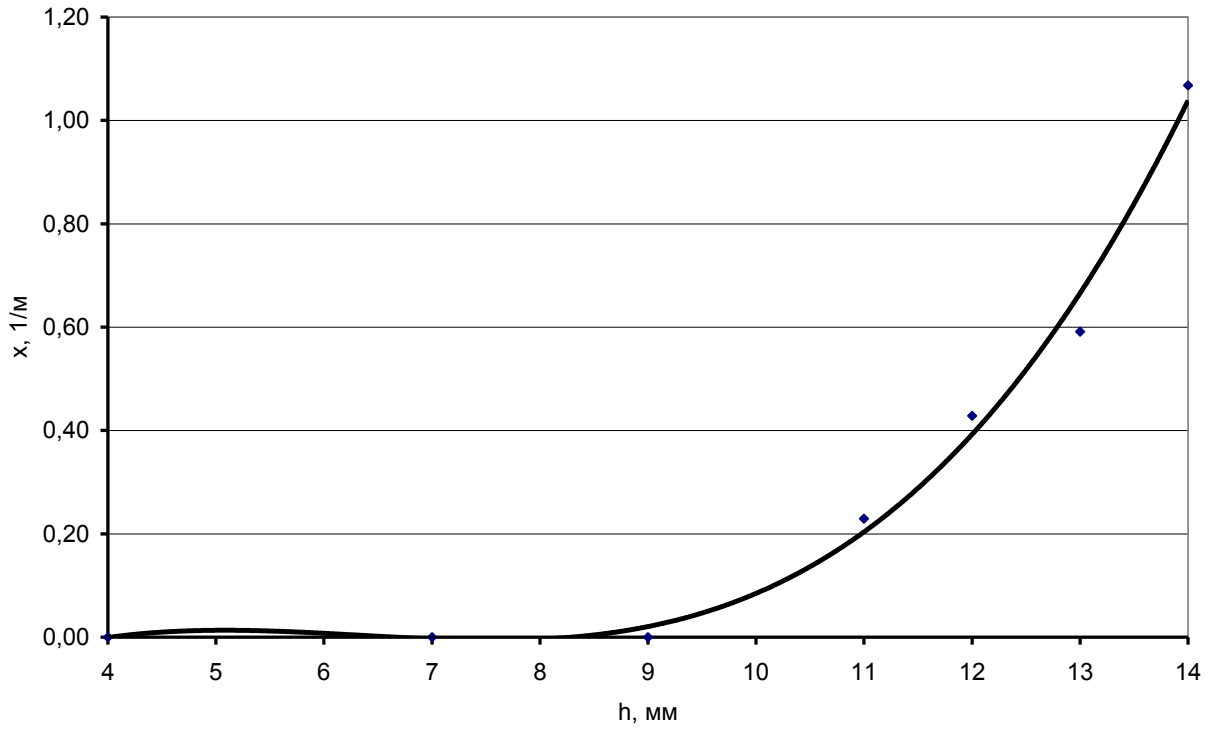


Рисунок 3.4 – Розрахункові розподіли кінцевої відносної кривизни від товщини прокату ($n = 13$; $d = 210$ мм; $t = 230$ мм; $b = 2000$ мм; сталь 08кп)

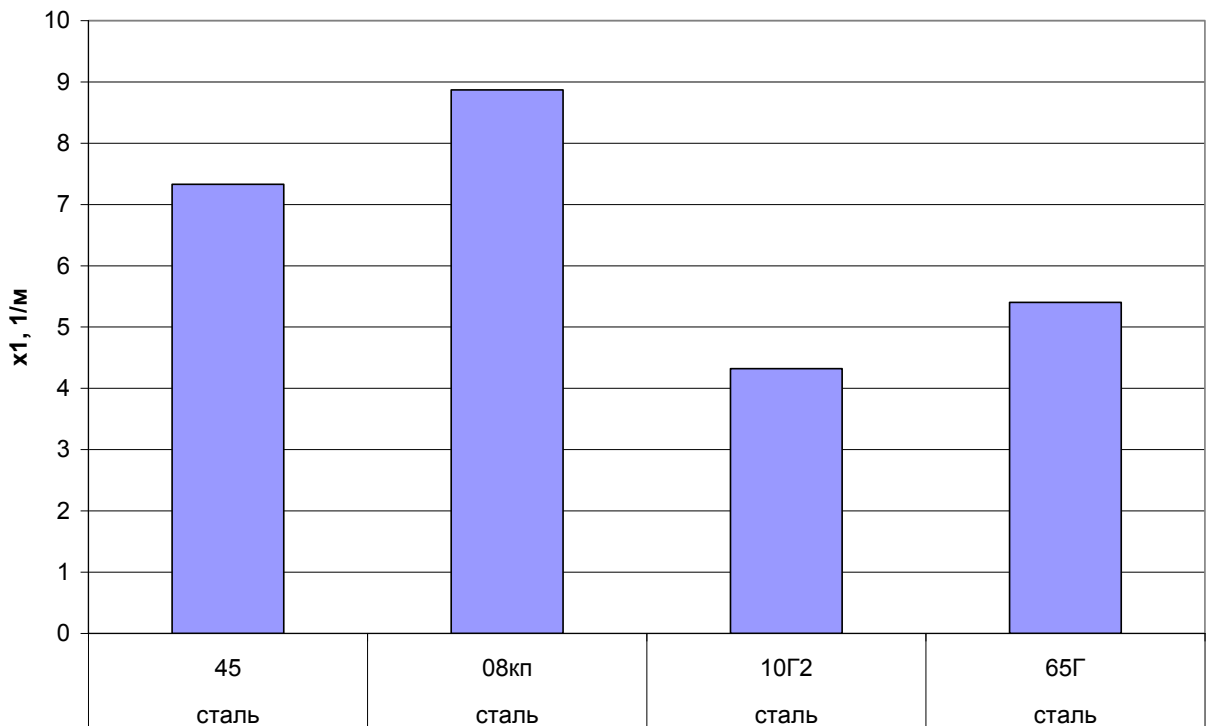
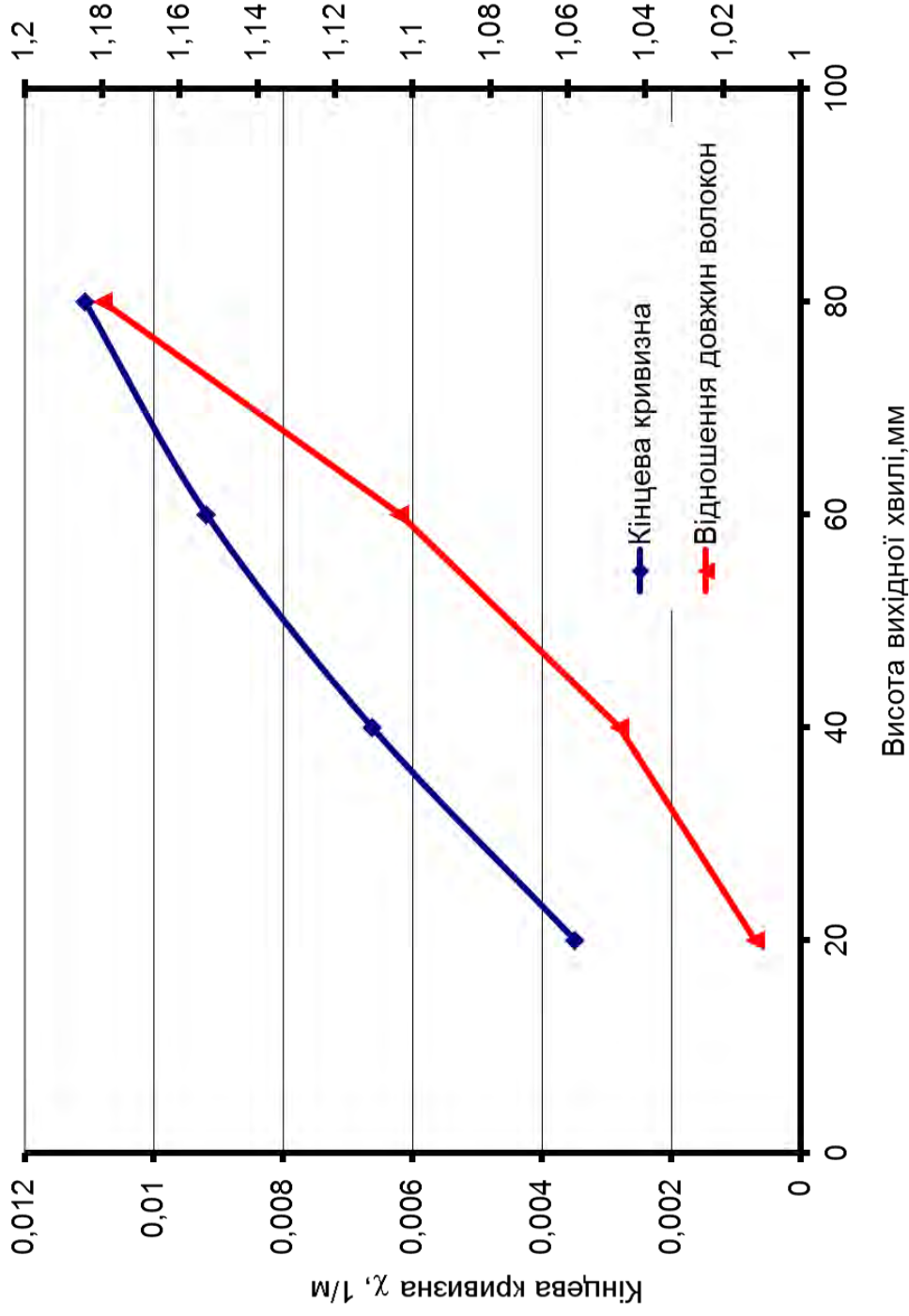


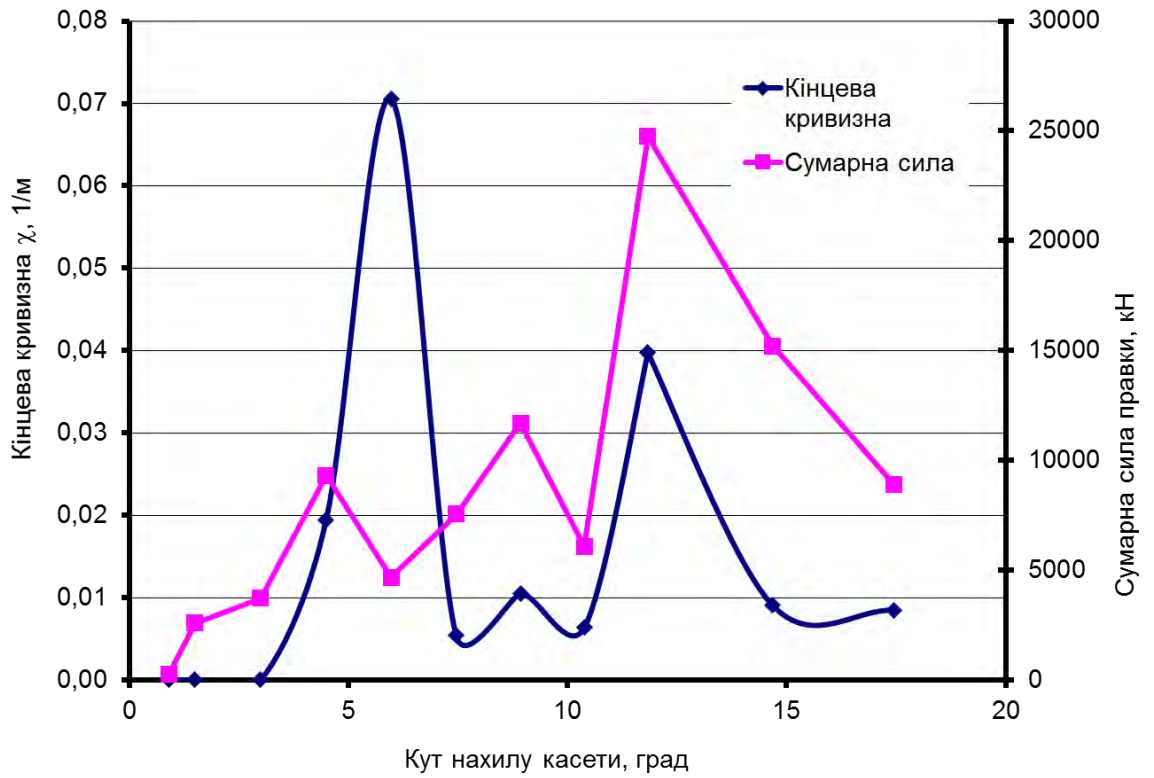
Рисунок 3.5 – Розрахункові розподіли кінцевої відносної кривизни від матеріалу прокату ($n = 13$; $h = 4$ мм; $d = 210$ мм; $t = 230$ мм; $b = 2000$ мм)



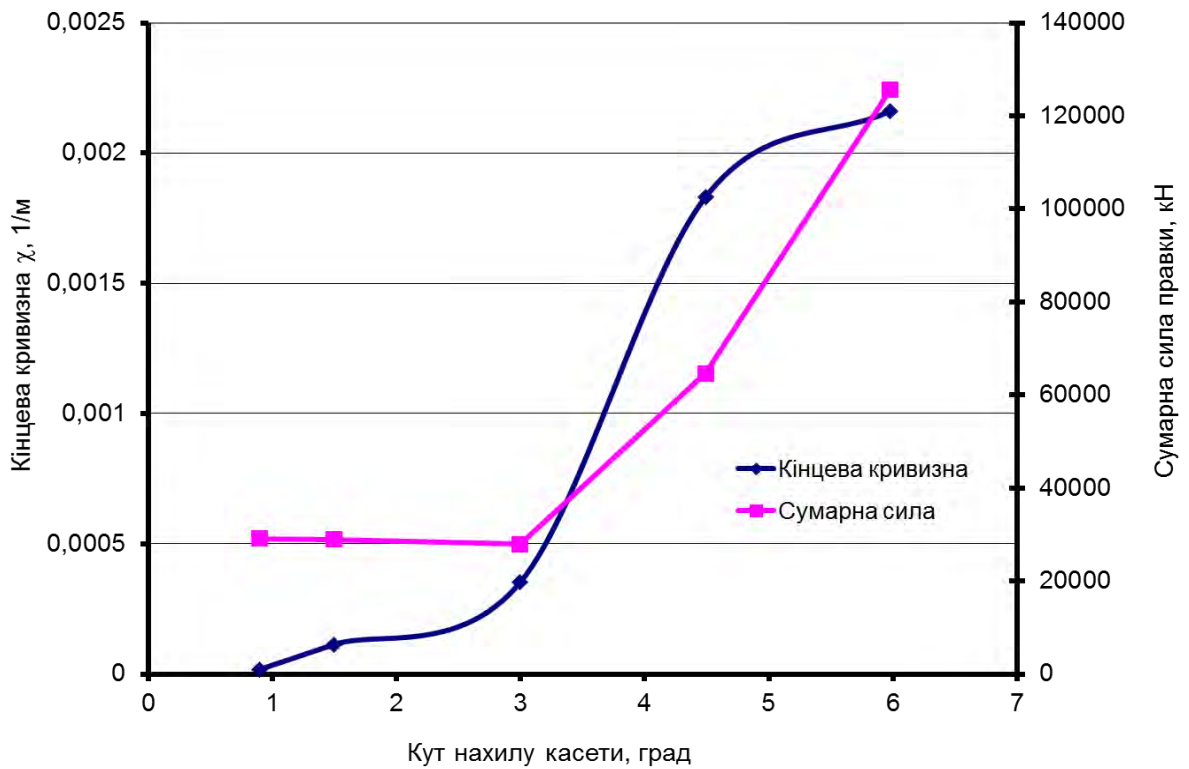
Відношення довжин волокон по середині листа та по його хвильках крайках λ/λ_c

Рисунок 3.6 – Залежність відносної кривизни та різниці у витяжках по середині листа і його хвильках крайках від висоти хвилі ($n = 13$; $h = 4$ мм; $d = 210$ мм; $t = 230$ мм; $b = 2000$ мм;

сталь 08кп)



а)



б)

Рисунок 3.7 – Розрахункові розподіли кінцевої відносної кривизни та сумарної сили правки від кута нахилу касети ($n = 13$; $h = 4$ мм (а); $h = 14$ мм (б); $d = 210$ мм; $t = 230$ мм; $b = 2000$ мм; сталь 08кп)

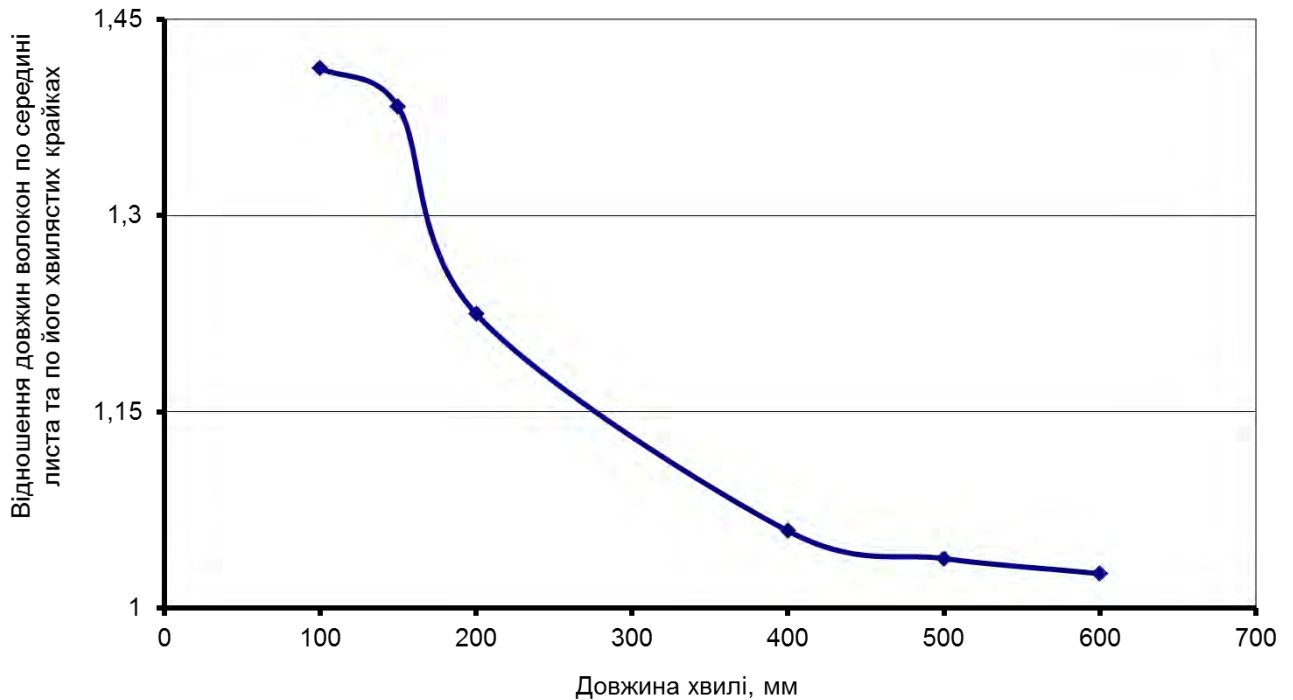


Рисунок 3.8 – Залежність відношення довжин волокон по середині листа та по його хвилястих краях від висоти хвилі ($n = 13$; $h = 4$ мм; $d = 210$ мм; $t = 230$ мм; $b = 2000$ мм; сталь 08кп)

листів збільшується, що необхідно враховувати при проектуванні нового обладнання під заданий сортамент і визначенні його технологічних можливостей (див. рис. 3.4, 3.5);

– зі збільшенням крайової хвилястості листів при одних і тих же налаштуваннях ЛПМ різниця в подовженні волокон по середині листа і його краях збільшується, що підвищує ефективність процесу, проте кінцева кривизна листів також зростає, але з меншою інтенсивністю (див. рис. 3.6);

– зі збільшенням перекриття роликів (умовно кута нахилу касети, оскільки використовувалася індивідуальне налаштування роликів) кінцева кривизна листів змінюється нерівномірно з яскраво вираженими мінімумами функцій, що засвідчує про необхідність вирішення задач оптимізаційного плану з визначення перекриття роликів залежно від параметрів вихідного листа (див. рис. 3.7);

– зі збільшенням довжини хвилі крайової хвилястості листів різниця в подовженні волокон по середині і краяхах листа зменшується, що свідчить про необхідність урахування крім амплітуди хвилі і цього параметра з визначення налаштувань роликів (див. рис. 3.8).

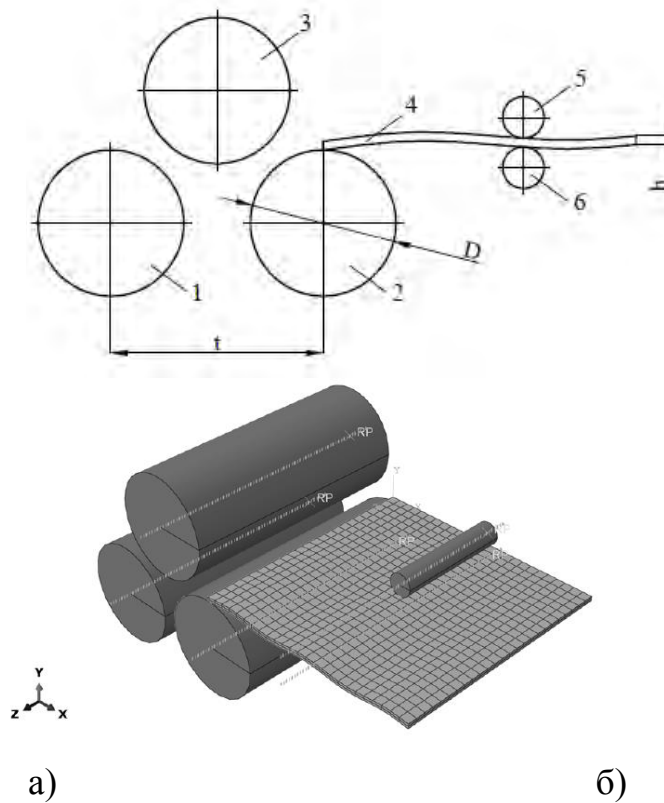
3.2 Скінченно-елементне моделювання процесу правки хвилястості на листопробних машинах

Розглянута в попередньому підрозділі чисельна аналітична модель має низку переваг, а саме, відносну простоту, достатню точність і низькі витрати машинного часу, що дозволяє її використовувати не тільки при вирішенні задач оптимізаційного плану (зокрема при проектуванні конструктивних параметрів ЛПМ і налаштувань робочих роликів), а і в автоматизованій системі керування ЛПМ. Однак при вирішенні задач в тривимірній площині для визначення величини згину робочих роликів при усуненні дефектів хвилястості листів ця модель непридатна внаслідок прийнятих припущень про взаємозв'язок між подовженнями волокон по ширині прокату і може бути використана лише для критеріальної оцінки. Цих недоліків позбавлені трьохвимірні моделі на основі методу скінченних елементів, котрі дозволяють моделювати процеси правки на реальних моделях листів з дефектами.

Виходячи з цього для аналізу напружено-деформованого стану металу при виправленні поздовжньої та поперечної кривизни листів були виконані розрахунки з використанням методу скінчених елементів у системі Abaqus CAE [154-156].

Розглянута стосовно до аналізу процесу правки листів на пробних машинах розрахункова схема, яка являла собою лист 4, три робочих 1-3 і два 5, 6 напрямних ролика, представлена на рисунку 3.9, а.

При дослідженні використовувалася площина симетрії, що дозволило скоротити час розрахунків.



1-3 – робочі ролики; 4 – лист; 5, 6 – напрямні ролики

Рисунок 3.9 – Розрахункова (а) і скінчено-елементна в глобальній системі координат (б) модель процесу правки листів на листопрямильних машинах

З урахуванням викладеного вище робили дискретизацію об'єму (побудова скінчено-елементної сітки), котрий займає модель, на елементарні області (скінчені елементи) (див. рис 3.9, б). Для моделювання роликів були використані тривимірні жорсткі елементи. Для моделювання листа були використані елементи типу C3D8R – восьмиузлові лінійні, тверdotільні скорочені елементи з контролем руйнування [155].

Відповідно до розрахункової схеми (див. рис. 3.9, а) крок машини t було прийнято 250 мм, діаметр робочих роликів 1, 2, 3 $D = 220$ мм. Безпосереднє моделювання процесу правки було виконано для листа товщиною $h = 10$ мм. Для моделювання вигину осі робочих роликів їх бочка була виконана опуклою. Для дослідження процесу правки крайової хвилястості використовували модель листа, отриману в пакеті Solidworks (рис. 3.10).

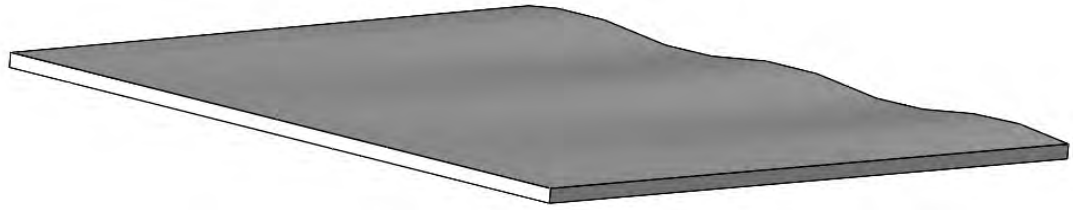


Рисунок 3.10 – Модель листа з крайовою хвилястістю

Вихідна скінчено-елементна модель має наступні граничні умови: нижні ролики машини 1 і 2, а також напрямні ролики 5 і 6 (див. рис. 3.9, а) мають один обертальний ступінь свободи, ролик 3 має два ступені свободи: можливість обертання навколо своєї осі, а також переміщення по осі «2» глобальної системи координат.

У розрахунках використовувалася модель класичної пластичності металу, у якості матеріалу листа була прийнята сталь 08кп (криву зміцнення показано на рис. 3.11) [73].

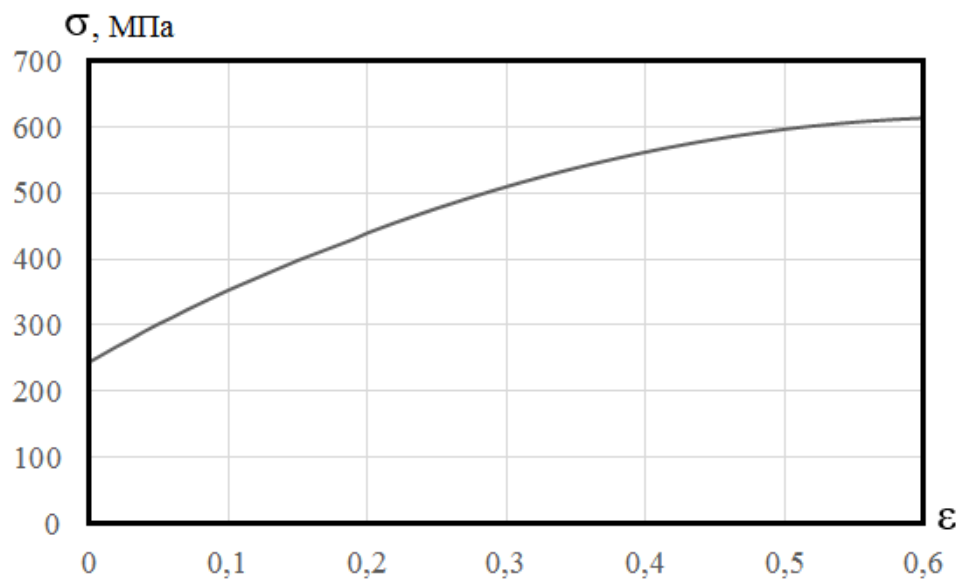


Рисунок 3.11 – Крива зміцнення матеріалу листа (сталь 08кп, використувана при розрахунках процесу правки [73])

Контакт між листом і роликами задавався за допомогою моделі контакту «Поверхня до поверхні» шляхом завдання коефіцієнта тертя $\mu = 0,2$.

Після цього усі 3 робочих ролика, а також два напрямних приводилися в обертання з кутовою швидкістю 0,95 і 4 рад/сек відповідно, що, з урахуванням їх діаметра, відповідає лінійній швидкості руху листа уздовж осі «1» глобальної системи координат 0,1 м/с. Час кроку був прийнятий 6 сек.

Для оцінки отриманих результатів вихідними в цьому випадку параметрами були обрані проекції реакцій у контрольних точках роликів у глобальній системі координат RF1, RF2, RF3, а також переміщення, деформації та напруження у вузлах скінчених елементів листа.

При скінченно-елементному моделюванні важливим фактором є дискретність розбиття об'єму деформованого матеріалу, яка впливає на точність і час розрахунку. Зі збільшенням дискретності точність розрахунку збільшується, але при цьому різко зростає час на його виконання. Для визначення мінімально достатньої кількості скінчених елементів при збереженні точності за аналогією з роботою [157] були виконані дослідження процесу правки листів на багатороликовій правильній машині з вигином робочого ролика.

Для дослідження процесу правки крайової хвилястості використовували імпортовану модель листа, отриману в пакеті SolidWorks. Сам же лист розбивали на різну кількість елементів, а саме: 300; 1224; 4545; 7191; 15014 (рис. 3.12) [158].

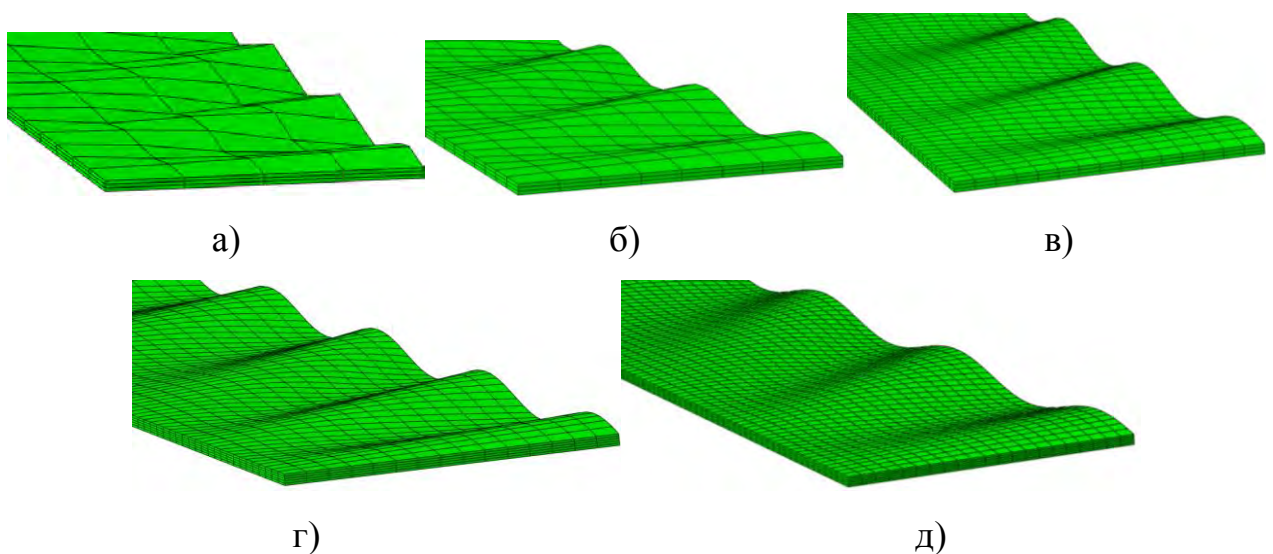


Рисунок 3.12 – Моделі листів з різною дискретизацією об'єму:

а – 300; б – 1 224; в – 4545; г – 7191; д – 15014

Реалізація моделі була виконана на ЕОМ з процесором Intel Core i3-4005U і об'ємом оперативної пам'яті 4 ГБ. У процесі розрахунку фіксувались час розрахунку (рис. 3.13) і сила правки на третьому ролику (рис. 3.14). Було встановлено, що зі збільшенням дискретизації об'єму деформованого матеріалу, час розрахунку збільшується практично лінійно і при кількості елементів 15120 становить 4,2 години (див. рис. 3.13). Отримані значення сили правки мають значний розкид, який зменшується зі збільшенням кількості елементів (див. рис. 3.14).

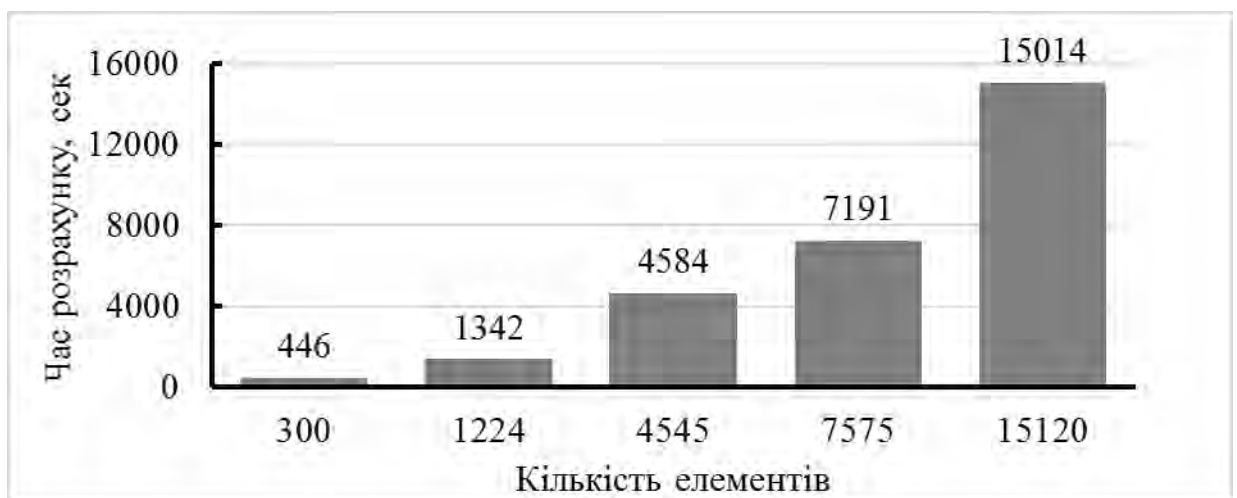


Рисунок 3.13 – Залежність часу розрахунку від кількості елементів

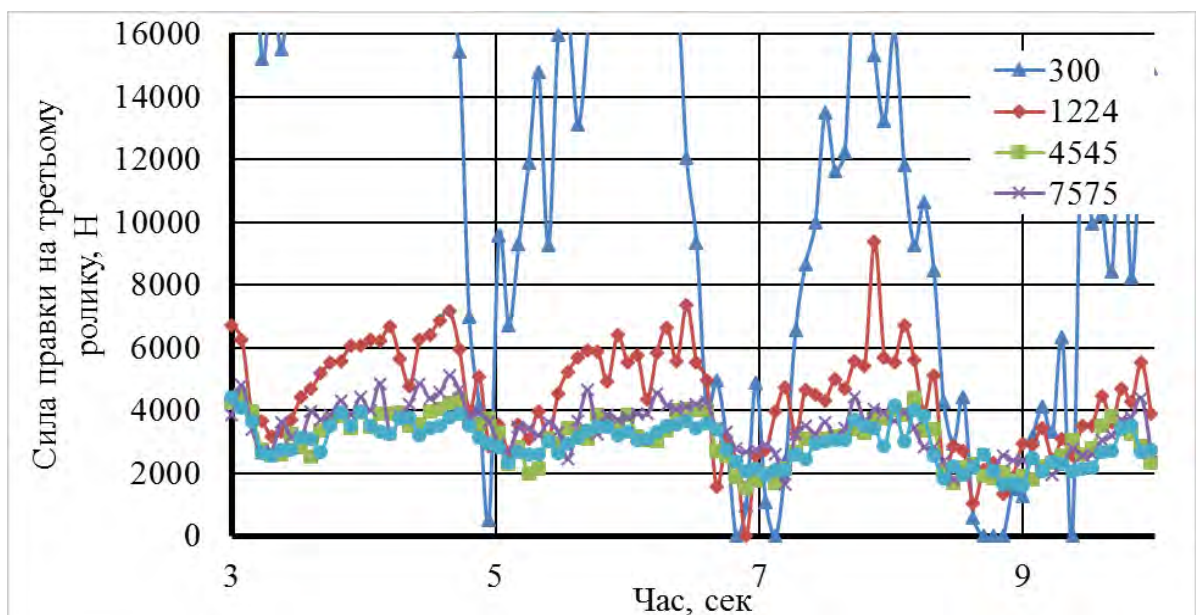


Рисунок 3.14 – Значення сил правки під час протікання процесу деформації в залежності від кількості елементів

Використовуючи отриманий під час розрахунку ряд значень сил правки було визначено коефіцієнт варіації їх розкиду для кожного випадку дискретизації об'єму, який склав більше 65% в разі використання сітки з 300 елементів і близько 20 ... 25% при збільшенні дискретизації більше 4000 елементів (рис. 3.15). Це дозволяє зробити висновок про достатність розбиття об'єму металу на рівні 4500 скінченних елементів при відношенні діаметра робочих роликів до товщини листа $D / h = 40$ або 15 елементів на 1 мм погонної довжини листа, при цьому час реалізації моделі складає близько 1,3 години при варіації сил правки на 3% вище щодо більш точного рішення.

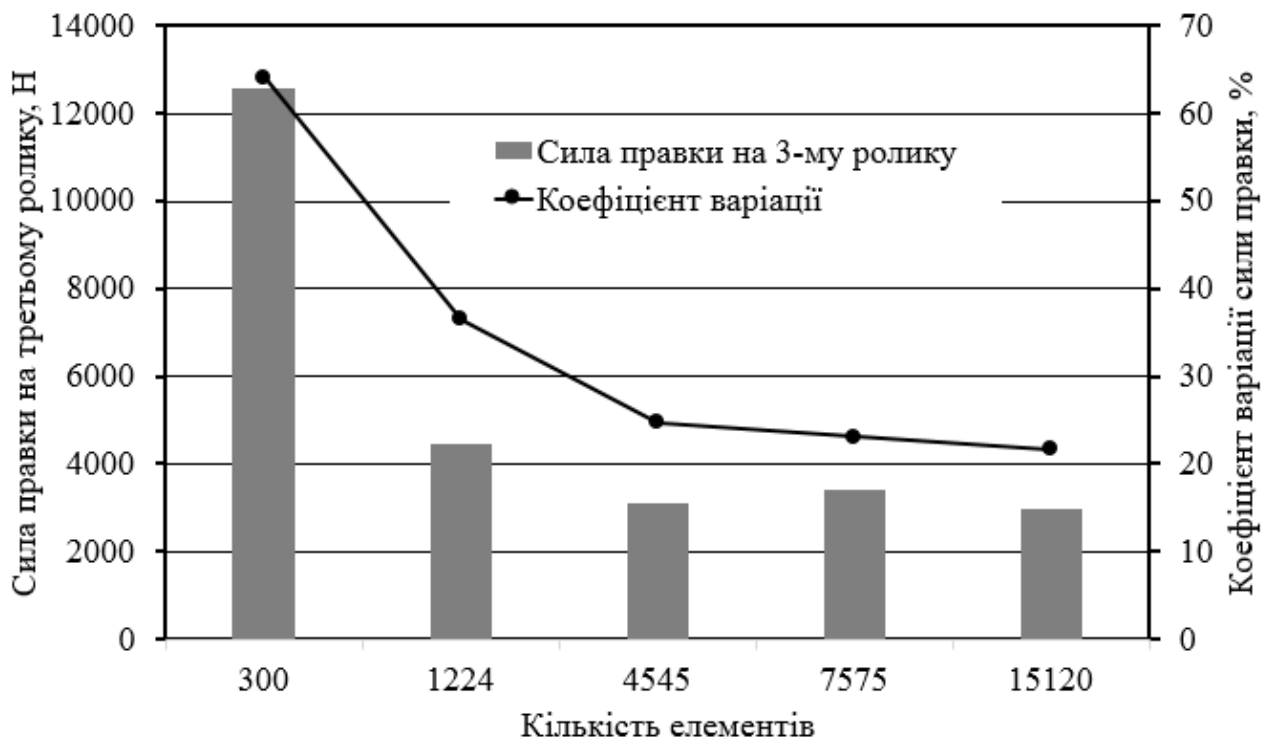
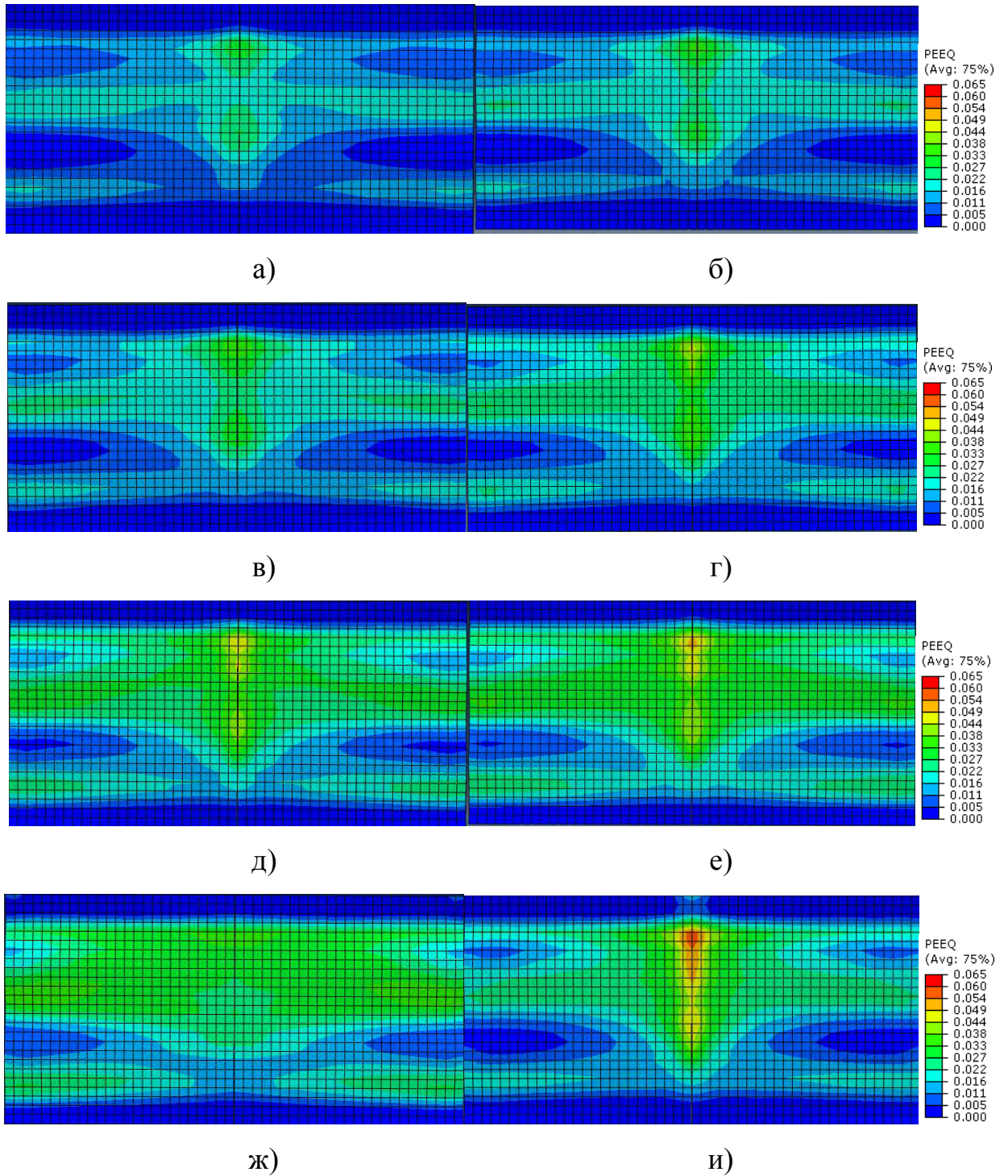


Рисунок 3.15 – Значення сили правки на третьому ролику і його коефіцієнта варіації в залежності від кількості елементів

З метою аналізу впливу технологічних параметрів на геометричні параметри листів, що виправляються, був виконаний ряд розрахунків. Зокрема розрахунки були зроблені для різних перекриттів і різного вигину бочки роликів [159]. На рисунку 3.16 представлені поля розподілу еквівалентних деформацій по поверхні листа при різних перекриттях (а-е) і вигинів робочих роликів (е-и).



а – $W=3$ мм, $dW=2$ мм; б – $W=4$ мм, $dW=2$ мм; в – $W=5$ мм, $dW=2$ мм;
 г – $W=7$ мм, $dW=2$ мм; д – $W=9$ мм, $dW=2$ мм; е – $W=10$ мм, $dW=2$ мм;
 ж – $W=10$ мм, $dW=0$ мм; и – $W=10$ мм, $dW=5$ мм

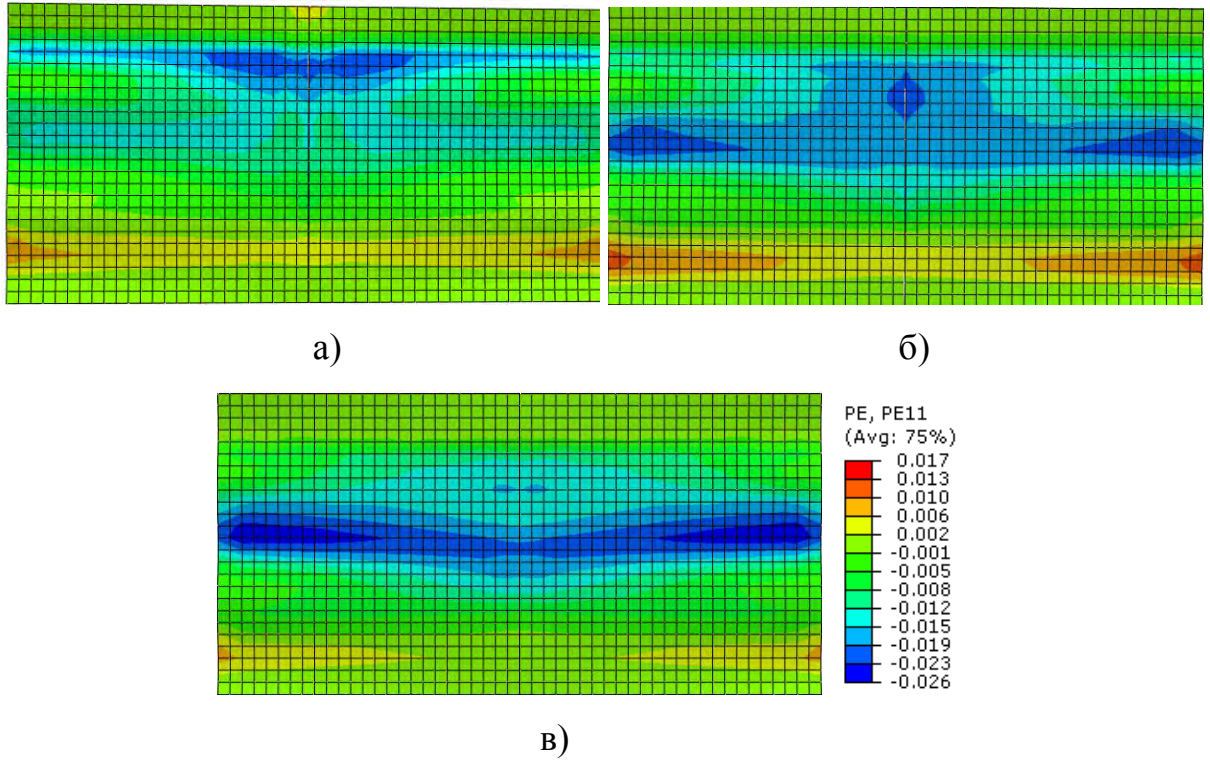
Рисунок 3.16 – Поля розподілу еквівалентних деформацій (PEEQ) по поверхні листів при різних перекриттях (а-е) і вигинах (ж, и) робочих роликів

З аналізу представлених розподілів видно, що зі збільшенням величини перекриття роликів W (рис. 3.16, а-е) еквівалентна деформація в середній частині листа (плоска ділянка) зростає, а характер розподілу визначається хвилястістю бічних крайок. Зокрема при збільшенні перекриття з 3 до 10 мм максимальне значення еквівалентної деформації зросло в 2 рази – з 3% до 6%. При зростанні величини вигину робочого ролика dW також спостерігається збільшення еквівалентної деформації в середній частині листа (плоска ділянка). При відсутності вигину ролика (рис. 3.16, ж) спостерігається відносно рівномірний розподіл деформації по поверхні листа на рівні 3,5 %. При зростанні вигину ролика деформація середніх ділянок листа збільшується (рис. 3.16, е, и) і при величині вигину 2 мм перебуває на рівні 6,0 %, а при величині вигину 5 мм – на рівні 6,5%, причому зона деформації зростає.

На рисунку 3.17 представлені розрахункові розподіли поздовжньої деформації по нижній поверхні листів при різних вигинах робочих роликів. З аналізу даних розподілів можна зробити висновок, що при правці листів з крайовою хвилястістю спостерігаються чергування деформації стиску та розтягання по довжині листа, при цьому зі збільшенням вигину ролика підвищується різниця деформації середніх і крайніх ділянок листів.

На рисунку 3.18 представлені розрахункові розподіли крайової хвилястості листів залежно від величини вигину роликів dW . У зв'язку з більшими витратами машинного часу на розрахунки був розглянутий лист довжиною, рівною подвійному кроку правильної машини, що привело до деякого викривлення даного результату по першій і третин хвилі через неповну обробку переднього та заднього кінця листа.

З аналізу представленого на рис. 3.18 розподілу видно, що зі збільшенням вигину ролика крайова хвилястість зменшується. Зокрема, при відсутності вигину висота хвилі зменшувалась з 4,0 мм до 3,65 мм, при вигині 1 мм – до 2,8 мм, при вигині 2 мм – до 1,04 мм, при вигині 5 мм – до 0,52 мм. Даний факт підтверджує вплив величини вигину ролика на правку хвилястості листів



а – $W=10$ мм, $dW=5$ мм; б – $W=10$ мм, $dW=2$ мм; в – $W=10$ мм, $dW=0$ мм

Рисунок 3.17 – Поля розподілу поздовжньої деформації (PE11) на контактній поверхні листів залежно від величини вигину робочих роликів

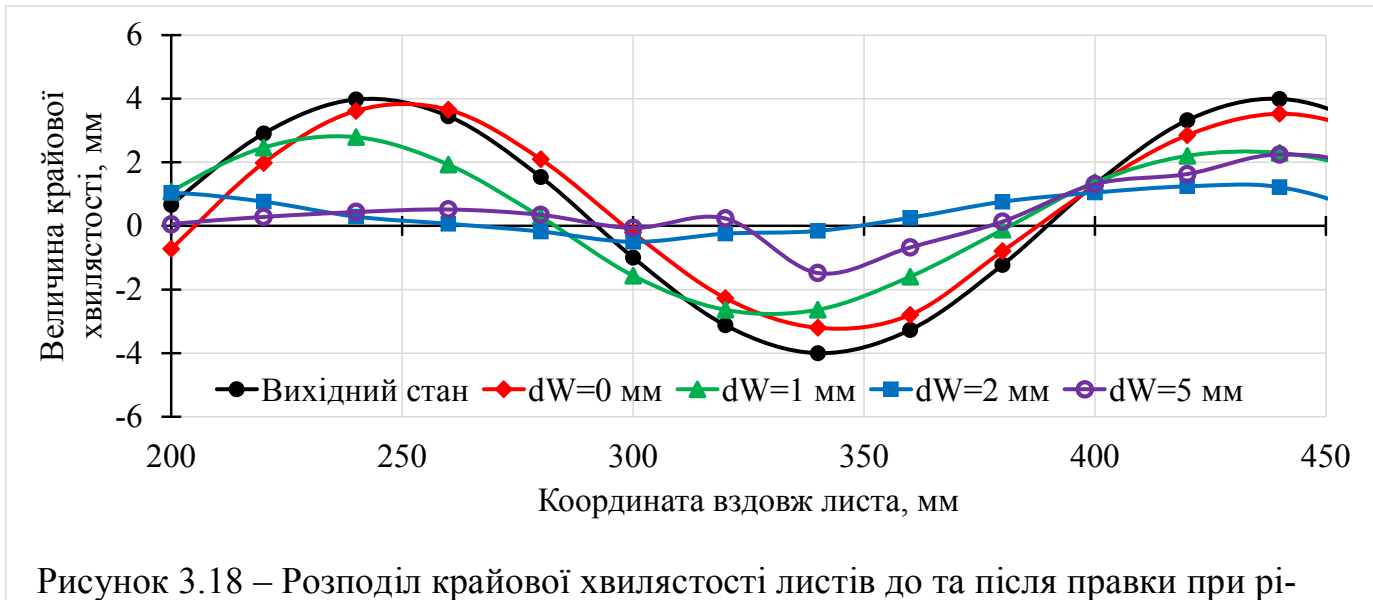


Рисунок 3.18 – Розподіл крайової хвилястості листів до та після правки при різних вигинах робочих роликів

і можливість використання даного підходу для підвищення якості правки, а також використовувати отримані залежності для визначення раціональної величини згину робочих роликів для виправлення хвилястості. Ця модель була взята за основу при побудові регресійної моделі для визначення кінцевої кривизни листів з дефектами хвилястості.

Висновки

1. На основі реалізації розробленої чисельно-аналітичної моделі встановлено вплив властивостей матеріалу, його геометричних характеристик, форми хвилі по краяхках, а також налаштувань роликів на кінцеву відносну кривизну листа, а саме зі збільшенням товщини листів та зменшенням межі плинності матеріалу кінцева кривизна листів збільшується, що необхідно враховувати при проектуванні нового обладнання; зі збільшенням крайової хвилястості листів при одних і тих же налаштуваннях ЛПМ різниця в подовженні волокон по середині листа і його крайках збільшується, що підвищує ефективність процесу, проте кінцева кривизна листів також зростає, але з меншою інтенсивністю; зі збільшенням перекриття роликів кінцева кривизна листів змінюється нерівномірно з яскраво вираженими мінімумами функцій, що засвідчує про необхідність вирішення задач оптимізаційного плану з визначення перекриття роликів залежно від параметрів вихідного листа; зі збільшенням довжини хвилі крайової хвилястості листів різниця в подовженні волокон по середині і крайках листа зменшується, що свідчить про необхідність урахування крім амплітуди хвилі і витяжок при визначенні налаштувань роликів.

2. Розроблена скінченно-елементна модель процесу правки листів з вигином робочих роликів дозволила визначити характер впливу величини перекриття та прогину робочих роликів на хвилястість готового прокату. В результаті реалізації тривимірної скінченно-елементної моделі процесу правки листів з дефектом хвилястості було встановлено, що при моделюванні раціональною кількістю є 4500 скінченних елементів при відношенні діаметру робочих роликів до товщини листа $D / h = 40$ або 15 елементів на 1 мм погонної довжи-

ни листа. На прикладі результати розрахунків для листів товщиною 10 мм зі сталі 08кп з крайовою хвилястістю 4 мм показано, що при вигині робочих роликів на 1 мм крайова хвилястість зменшується на 30%, при вигині на 2 мм – на 75%, при вигині на 5 мм – на 87%. Дані результати підтверджують ефективність технології правки хвилястості на ЛПМ, а запропонована модель дозволяє розраховувати кінцеву хвилястість листів в залежності від налаштування робочих роликів.

РОЗДІЛ 4

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСІВ ПРАВКИ ГАРЯЧЕКАТАНИХ ЛИСТІВ НА ЛИСТОПРАВИЛЬНИХ МАШИНАХ З ДИФЕРЕНЦІЙОВАНИМ ДОДАТКОМ СИЛИ ПРАВКИ ПО ШИРИНІ ПРОКАТУ

4.1 Експериментальні дослідження процесів правки на листопривильній машині з диференційованим додатком сили правки по ширині прокату

Ріст вимог, що висувуються до обсягів надаваної інформації, робить актуальними експериментальні дослідження не тільки енергосилових, але і геометричних характеристик металопрокату, що виправляється.

З метою оцінки ступеня вірогідності отриманих математичних моделей (див. розділ 3), а також уточнення вихідних передумов для їхньої чисельної реалізації, експериментальні дослідження процесу холодної правки на листопривильних машинах з диференційованим додатком сили правки по ширині смуги в лабораторних умовах були проведені з використанням спеціально спроектованої експериментальної установки (див. рис. 2.1) для правки з 9-ма привильними роликами діаметром 100 мм, розміщеними в робочій кліті привильної машини з кроком 105 мм.

Дана установка являє собою 9-ти роликову листопривильну машину, робоча кліть якої (див. рис. 2.2), містить у собі 9 робочих роликів, з яких перших вісім роликів по ходу руху листа виконані приводними, а дев'ятий – неприводним.

Відмінною рисою процесу правки на листопривильній машині з диференційованим додатком сили правки по ширині смуги є усунення хвилястості прокату, яке досягається шляхом вигину робочих роликів силами правки на величину, обумовлену положенням опорних роликів. На даній експеримента-

льній установці були проведені дослідження з примусовим вигином ролику і з застосуванням профільованого робочого ролику.

В першому випадку для забезпечення різного подовження волокон по ширині було виготовлено спеціальне пристосування для диференційованого додатку сили до ролика листоправильної машини (рис. 4.1).



Рисунок 4.1 – Загальний вигляд спеціального пристосування для диференційованого додатку сили до ролика листоправильної машини

Пристосування являє собою два натискні гвинти, закріплені на станинах робочої кліти правильної машини, які через каретку з роликами (рис. 4.2) здійснюють вигин робочого ролика листоправильної машини.

Фіксацію прогину ролика виконували за допомогою індикатору часового типу (рис. 4.3, а) шляхом торкання голкою мікрометра каретки пристрою диференційованого додатку сили до ролика листоправильної машини (див. рис. 4.3, б).

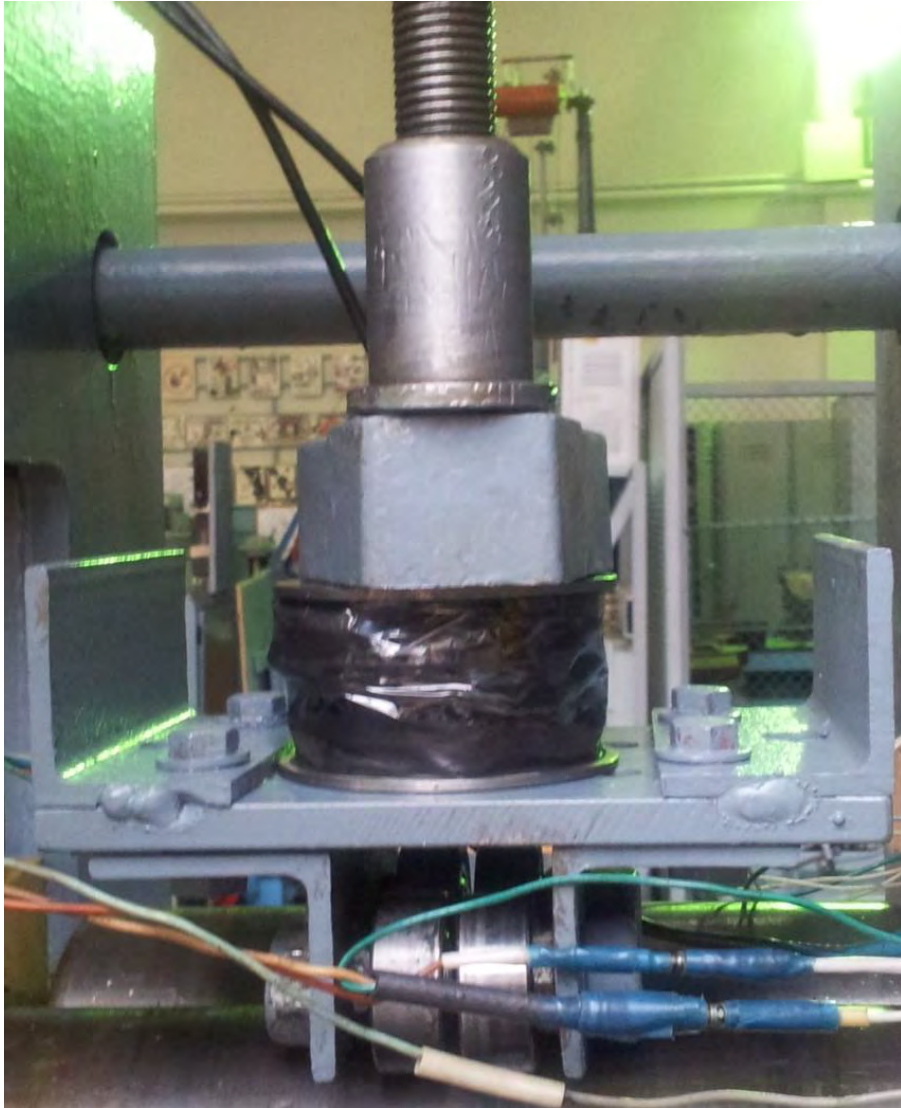
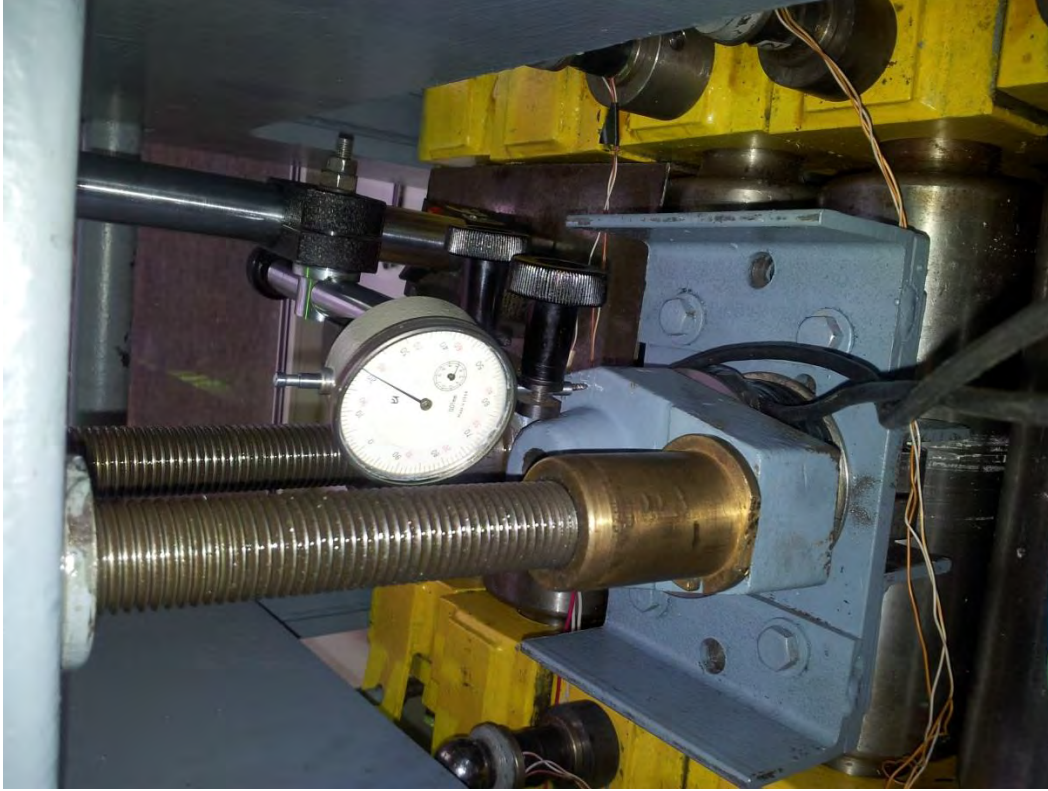


Рисунок 4.2 – Загальний вигляд каретки для диференційованого додатка сили до ролика листопривальної машини



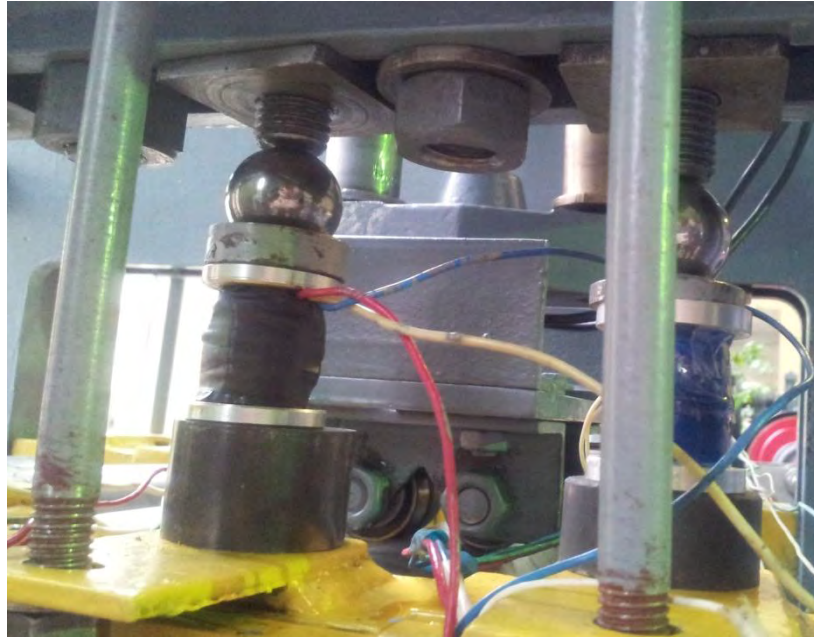
а)



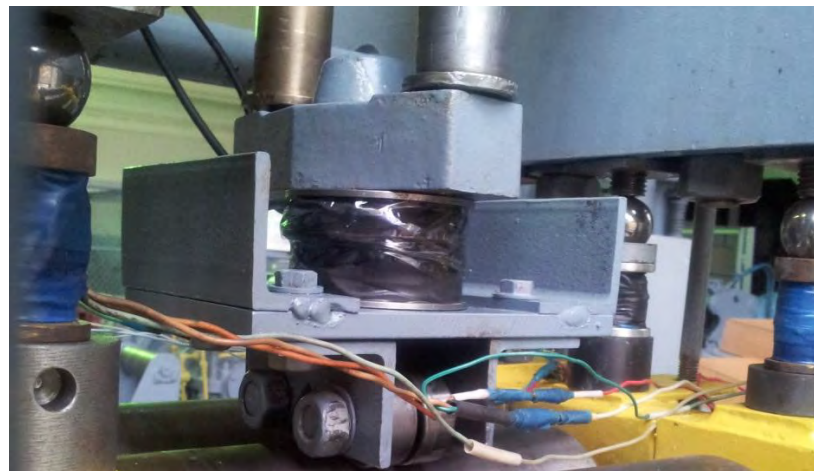
б)

Рисунок 4.3 – Загальний вигляд індикатору часового типу (а), а також спосіб (б) вимірювання прогину ролика листоправильної машини

Сили, що діють на робочі ролики, вимірювали за допомогою штифтових месдоз з кільцевим пружним елементом, розміщених між відповідними подушками та натискними гвинтами (рис. 4.4, а), а сили вигину ролика – месдозою, розташованою між натискним механізмом і кареткою пристрою диференційованого додатку сили (див. рис. 4.4, б).



а)



б)

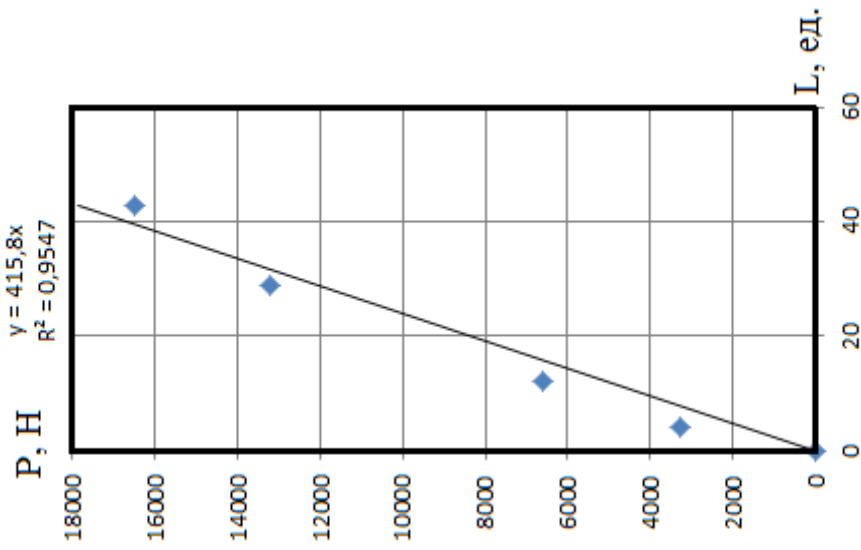
Рисунок 4.4 – Система силовимірювальних месдоз під натискними гвинтами установки (а), а також кареткою (б) пристрою диференційованого додатку сили

Тарування кільцевих месдоз здійснювали на розташованому в безпосередній близькості від установки спеціальному гідравлічному пресі (рис. 4.5) шляхом їхнього попарного імітаційного навантаження силою відомої величини без розбирання комутаційного електричного ланцюга підключення датчиків до аналогово-цифрового перетворювача.

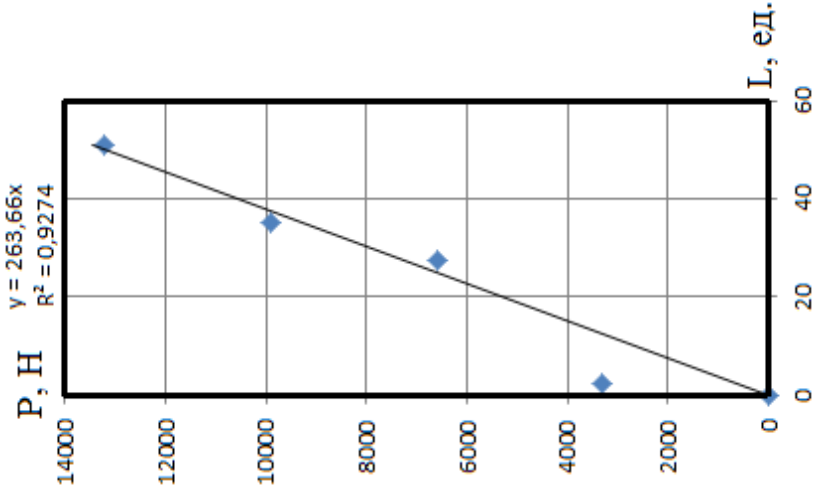


Рисунок 4.5 – Схема тарування кільцевих месдоз на гідравлічному пресі

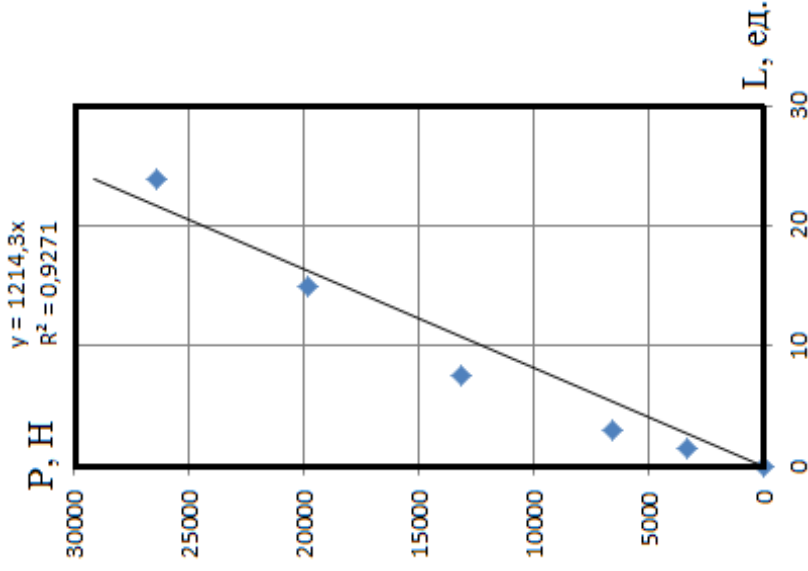
Запис поточних у часі значень усіх реєстрованих параметрів виконували за допомогою багатофункціонального модуля АЦП-ЦАП М-DAQ12, який приєднався до ПК через USB-Інтерфейс (Highspeed). Підключення сигналів здійснювалося через роз'єм, розташований на бічній стінці модуля. Їхнє наступне розшифрування здійснювали з використанням ЕОМ шляхом аналітичної інтерпретації відповідних тарувальних графіків (рис. 4.6). Ступінь невідповідності показань при таруванні у відносному вимірі не перевищував $\pm 8\%$.



а)



б)



в)

Рисунок 4.6 – Гарувальні графіки вимірників сили під 3-м (а), 5-м (б) роликками, а також під кареткою (в) пристрою диференційованого додатка сили при дослідженні процесу правки листа

При проведенні експериментальних досліджень в якості зразків використовували сталеві листи перерізом $2,5 \times 152$ мм (рис. 4.7), а також листи зі свинцю перерізом 10×200 мм (рис. 4.8).



Рисунок 4.7 – Загальний вигляд сталевих листів, використовуваних при експериментальному дослідженні на листопривальній машині з диференційованим додатком сили правки по ширині смуги



Рисунок 4.8 – Загальний вигляд листів зі свинцю, використовуваних при експериментальному дослідженні на листопривальній машині з диференційованим додатком сили правки по ширині смуги

Геометричні параметри, що характеризують налаштування робочих роликів експериментальної листопральної машини 9×100×250 ДДМА при дослідженні процесів правки листів товщиною 2,5 мм і шириною 152 мм зі сталі представлено в таблиці 4.1. Аналогічні дані стосовно до правки листів зі свинцю марки С1 товщиною 10 мм і шириною 200 мм зведено в таблицю 4.2.

Таблиця 4.1 – Налаштування робочих роликів експериментальної листопральної машини 9×100×250 ДДМА при дослідженні процесу правки зразків товщиною 2,5 мм і шириною 152 мм зі сталі 45

Перегини листа на роликах, мм		
1	3	5
0	2,5	0,5

Таблиця 4.2 – Налаштування робочих роликів експериментальної листопральної машини 9×100×250 ДДМА при дослідженні процесу правки зразків товщиною 10 мм і шириною 200 мм зі свинцю С1

Перегини листа на роликах, мм		
1	3	5
0	1,875	-1,25

Налаштування роликів листопральної машини здійснювали в такий спосіб:

- Робоча кліть і всі нижні ролики листопральної машини встановлюються по нульовому рівню.
- Налаштування на сортамент здійснюється натискними гвинтами листопральної машини (див. рис. 2.8, поз. 11) за наступною схемою:
 - абсолютно рівний лист клали на нижні ролики листопральної машини;

- верхні ролики опускаються до торкання з поверхнею листа;
- проганяється лист крізь листоправильну машину без здійснення перегинів на роликах;
- дане налаштування приймається за базове.

Наступне налаштування роликів листоправильної машини здійснюється натискними гвинтами згідно таблиці 4.1, 4.2, виходячи з умови, що 1 оберт гвинта (360°) дорівнює переміщенню ролика на 2,5 мм.

Для визначення подовження волокон листа, на його поверхні були нанесені мітки, відповідні довжинам волокон (рис. 4.9).



а)



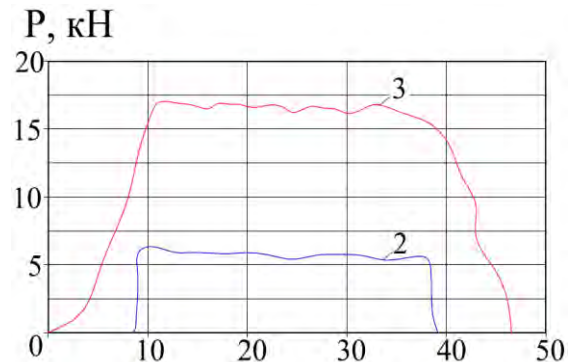
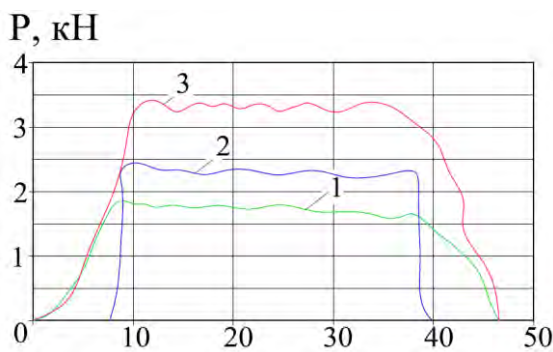
б)

Рисунок 4.9 – Загальний вигляд поверхні листів (а – в проекції, б – зверху) для визначення подовження волокон при експериментальному дослідженні на листоправильній машині з диференційованим додатком сили правки по ширині листа

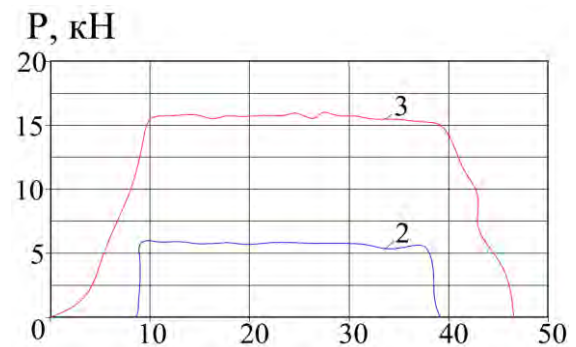
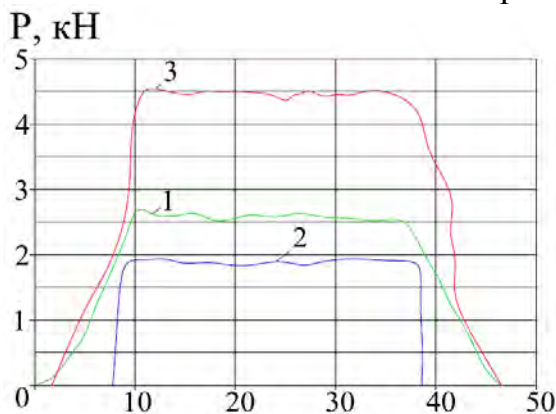
При експериментальних дослідженнях було виправлено 12 листів, типові приклади осцилографічних розподілів сил, обмірюваних на кожному з правильних роликів, а також різниця довжин волокон листа при виправленні до та після додатка диференційованої сили правки наведені на рисунку 4.10 і таблиці 4.3 [160].

Різниця довжин волокон сталевих листів при виправленні до та після додатку диференційованої сили правки на базі 900 мм у середньому склала 1 мм для сталевих листів і 4 мм на базі 500 мм для свинцевих листів, що безпосередньо впливає на зменшення хвилястості листів і підтверджує ефективність застосування даної технології.

Сила правки. Пропуск №1



Сила правки. Пропуск №2



а)

б)

Рисунок 4.10 – Типові значення сил правки під 3-м (1) і 5-м (2) роликками, а також під кареткою (3) при експериментальному дослідженні на листопральній машині з диференційованим додатком сили правки по ширині смуги на зразках зі сталі 45 (а) і свинцю С1 (б)

Таблиця 4.3 – Геометричні параметри, що характеризують різницю довжин волокон листа при виправленні до та після додатку диференційованої сили при дослідженні процесу правки зразків товщиною 10 мм і шириною 200 мм зі свинцю С1

№ перерізу	Геометричні параметри, що характеризують довжини волокон листа					
	Пропуск №1			Пропуск №2		
	L1, мм	L2, мм	Δ , мм	L1, мм	L2, мм	Δ , мм
1	504	506	2	506	507,5	1,5
2	503	506	3	506	509	3
3	502	506,5	4,5	506,5	510	3,5
4	502	508	6	508	511,5	3,5
5	503	508	5	508	512	4
6	502,5	508	5,5	508	511,5	3,5
7	502	507	5	507	510	3
8	503	506,5	3,5	506,5	508,5	2
9	504	506	2	506	508	2

Згідно з вихідними даними, що відповідають наведеним у таблицях 4.1 і 4.2 умовам проведення експериментів, були виконані розрахунки енергосилових параметрів процесу виправлення. Зіставлення експериментальних та теоретичних результатів представлено таблицею 4.4 і таблицею 4.5.

Співставлення експериментальних даних процесів правки сталевих зразків з результатами розрахунків свідчать про якісну та кількісну відповідність. При цьому погрішність розрахунків сили правки на третьому ролику не перевищила 15,3% при середньоквадратичному відхиленні 5,9%, а на 5-му ролику – 22,4 % при середньоквадратичному відхиленні 9,2%.

У ході експериментальних досліджень правки сталевих зразків отримана різниця витяжок склала порядку 1,001 при теоретичній, рівній 1,00141, а свинцевих – 1,008...1,012 при теоретичній – 1,01064.

Таблиця 4.4 – Сили правки при дослідженні зразків у холодному стані при правці до та після додатка диференційованої сили

Номер пропуску	Сила правки, Н					
	До вигину ролика			Після вигину ролика		
	P_3	P_5	P_b	P_3	P_5	P_b
Сталеві листи перерізом 2,5×152 мм						
1	6237	4614,05	0	0	6591,5	17000,2
2	7267,5	5536,86	0	0	6855,16	15178,75
Листи зі свинцю перерізом 10×200 мм						
1	-	-	-	1739,7	2121,8	3195,92
2	-	-	-	2609,55	1803,53	4565,6

Таблиця 4.5 – Порівняння сил правки при теоретичних і експериментальних дослідженнях процесу правки

Номер пропуску	Сила правки, Н				Погрішність, %	
	Експеримент		Теорія			
	P_3	P_5	P_3	P_5	ΔP_3	ΔP_5
Сталеві листи перерізом 2,5×152 мм						
1	6237	4614,05	7362	4522	15,3	-2,03
2	7267,5	5536,86	7362	4522	1,3	-22,4
1	7560	6591,5	7984	5678	5,3	-16,1
2	7480	6855,16	7984	5678	6,3	-20,7
Листи зі свинцю перерізом 10×200 мм						
1	4934	2121,8	5092	2083	3,1	-1,9
2	5175	1803,5	5092	2083	-1,6	13,4

При цьому погрішність розрахунків різниці довжин волокон для сталевих листів не перевищила 12,9%, а для свинцевих – 11,34%.

Порівняння свідчить про достатній ступінь вірогідності розроблених математичних моделей і можливості застосування їх на діючому промисловому устаткуванні.

Для виявлення більш повної картини були також проведені дослідження правки листів у роликах з бочкоподібною формою робочої поверхні, що дозволяє в достатній мері імітувати вигин по центру ролика (рис. 4.11).



Рисунок 4.11 – Роликова система листоправильної машини з 3-м роликом бочкоподібною формою для імітації вигину по центру листа

Експериментальні дослідження були проведені стосовно до холодної правки сталевих листів з дефектом площинності у вигляді хвилястості крайок. Згідно результатів теоретичних досліджень правку такого дефекту здійснюють роликом з вигином посередині бочки. При цьому диференційований додаток сили по ширині листа моделювався шляхом використання ролика з бочкоподібним профільованням робочої поверхні. Відповідно до результатів теоретич-

них досліджень профільованим був виконаний тільки третій ролик листопривильної машини. При цьому різниця діаметрів по середині та по краях склала 5 мм, що відповідало величині прогину робочої поверхні 2,5 мм.

Для експериментальних досліджень в якості зразків використовували сталеві листи розміром 2,5×150×900 мм (рис. 4.12), на крайках яких механічним способом виконували хвилястість. Матеріал листів – сталь 45. Оскільки подовження волокон у центральній частині сталевих листів при правці з бочкоподібним роликом на базі 900 мм не перевищує 1 мм, для більшої наочності правки дефекту була виконана вихідна хвилястість з амплітудою в діапазоні $A = 2,3 \dots 4$ мм. Усього було виправлено по 10 зразків.

Геометричні параметри, що характеризують налаштування робочих роликів експериментальної листопривильної машини 9×100×250 ДДМА при дослідженні процесів правки листів товщиною 2,5 мм і шириною 150 мм зі сталі 45, вибиралися з урахуванням результатів теоретичних досліджень і представлені в таблиці 4.6.

При експериментальних дослідженнях листи правили за 3 проходи, з налаштуванням роликів, зазначеним в таблиці 4.6. Типові приклади осцилографічних розподілів сил і моментів на шпинделях робочих роликів (рис. 4.13), а також зміни амплітуди хвилястості після кожного проходу (рис. 4.14) наведені нижче.

Таблиця 4.6 – Геометричні параметри налаштування робочих роликів експериментальної ЛПМ 9×100×250 ДДМА при дослідженні процесу правки

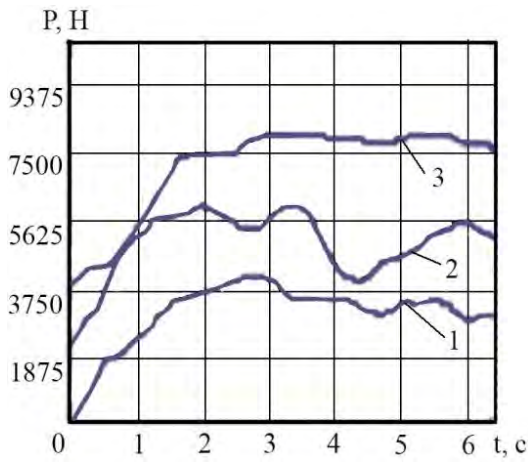
№ про- ходу	Перекриття роликів відносно листа, мм			
	1 ролик	3 ролик		5 ролик
		По центру	По крайці	
1	0	5	2,5	0
2	0	7,5	5	0
3	0	10	7,5	0



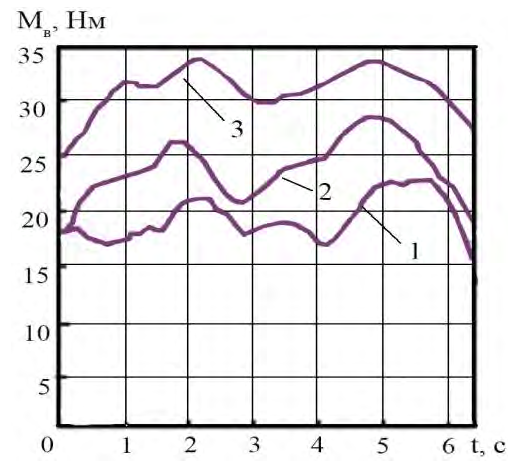
Рисунок 4.12 – Загальний вигляд сталевго зразка, використовуваного при експериментальному дослідженні

Для коректного зіставлення результатів теоретичних і експериментальних досліджень процес правки на лабораторній установці був промодельований за допомогою тривимірної скінчено-елементної моделі (див. розд. 3), для якої як вихідні параметри були прийняті параметри експерименту.

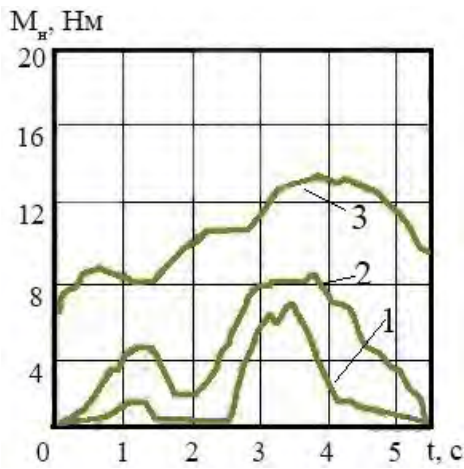
Встановлено, що при експериментальному дослідженні для випадку правки листа з максимальною вихідною амплітудою хвилі на крайці 4 мм (див. рис. 4.14,а) після першого проходу амплітуда хвилі склала 3,3 мм (див. рис. 4.14,б), після другого проходу – 2,7 мм (див. рис. 4.14,в), після третього – 1,8 мм (див. рис. 4.14,г) зі середньоквадратичним відхиленням за результатами експериментів відповідно 0,12, 0,11 і 0,09 мм. У той же час при тривимірному моделюванні амплітуда хвилястості на крайці склала після першого проходу 2,9 мм, після другого проходу – 2,3 мм, а після третього – 1,6 мм (рис. 4.15). Погрішність результатів у всіх випадках не перевищила 15 %, що свідчить про достатній ступінь вірогідності теоретичної моделі стосовно результуючих параметрів форми листа. Аналогічні результати мали місце і для випадку правки інших зразків, при цьому абсолютні показники були нижче, а статистичні відрізнялися незначно.



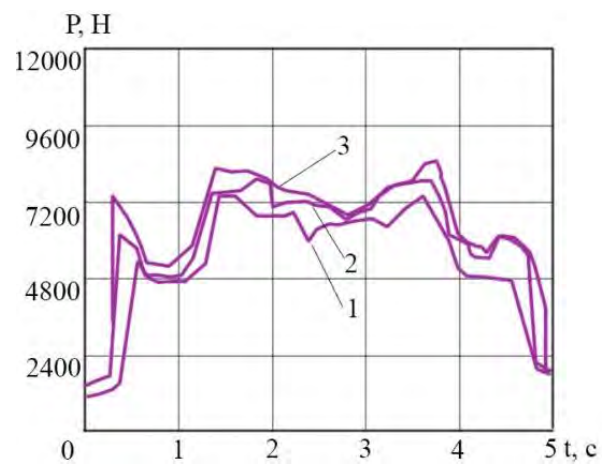
а)



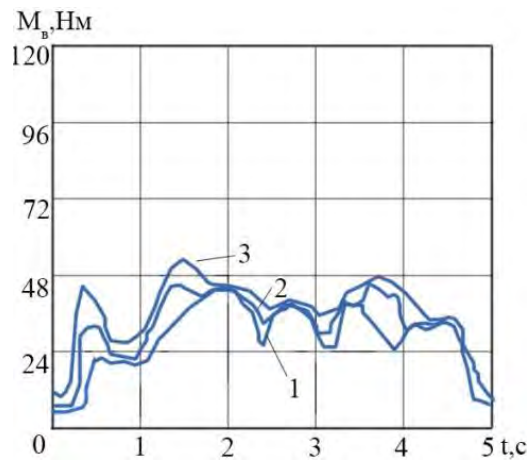
б)



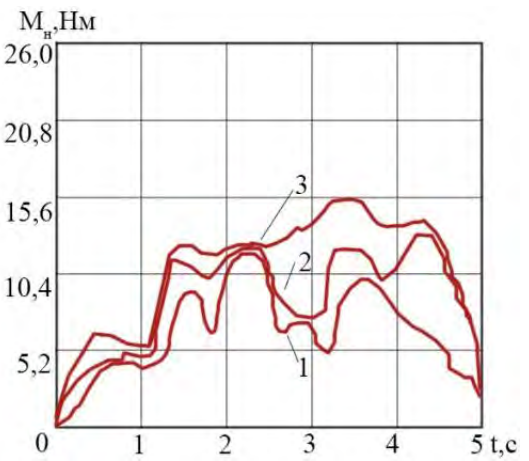
в)



г)



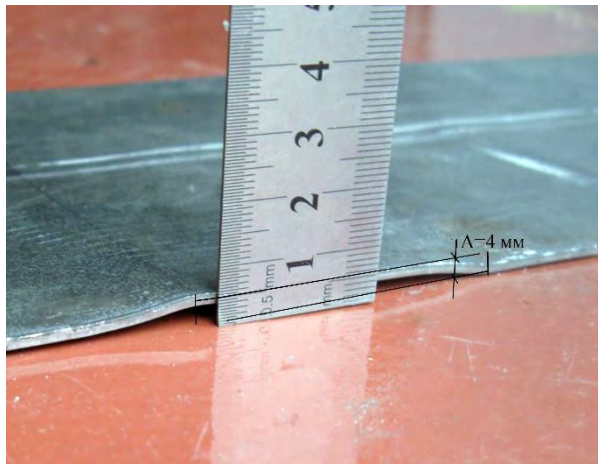
д)



е)

а – сила на 3-му ролику; б – момент на шпинделі 3-го ролика; в – момент на шпинделі 4-го ролика; г – сила на 3-му ролику; д – момент на шпинделі 3-го ролика; е – момент на шпинделі 4-го ролика

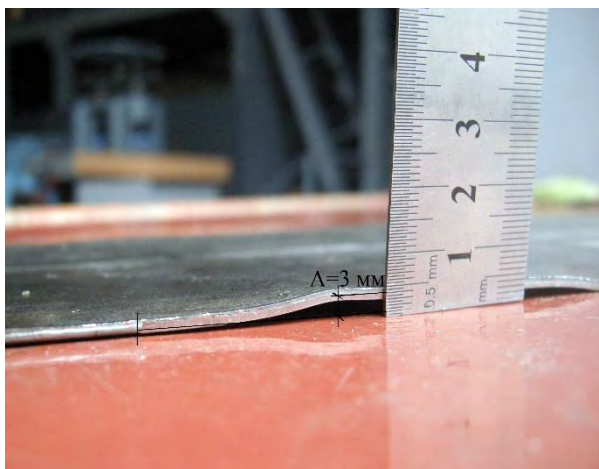
Рисунок 4.13 – Енергосилові параметри при експериментальному (а-в) і тривимірному (г-д) дослідженні



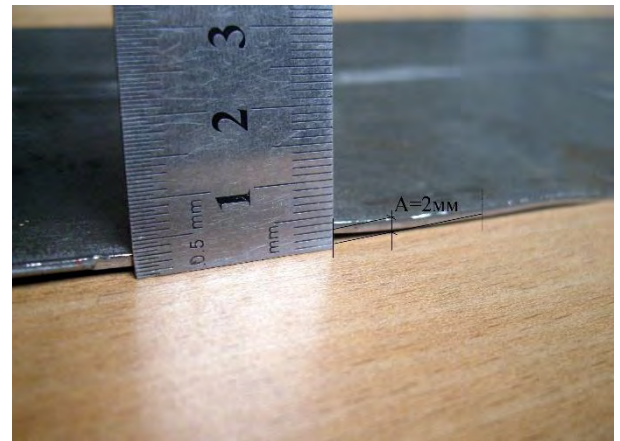
а)



б)



в)

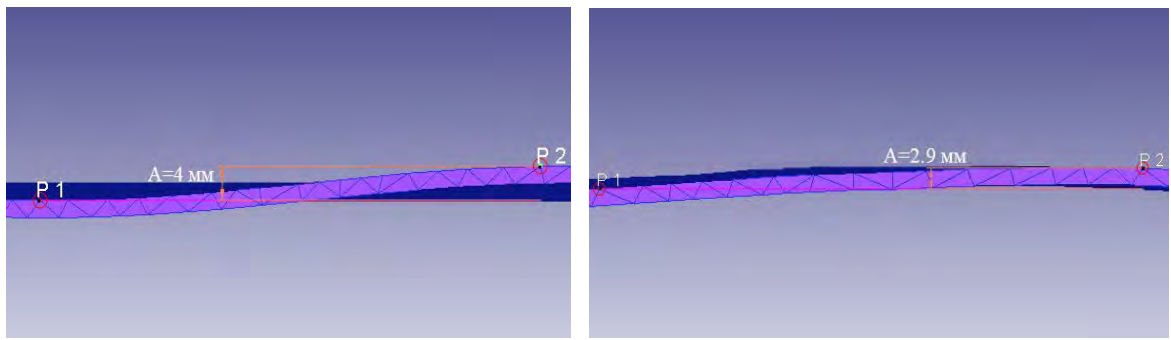


г)

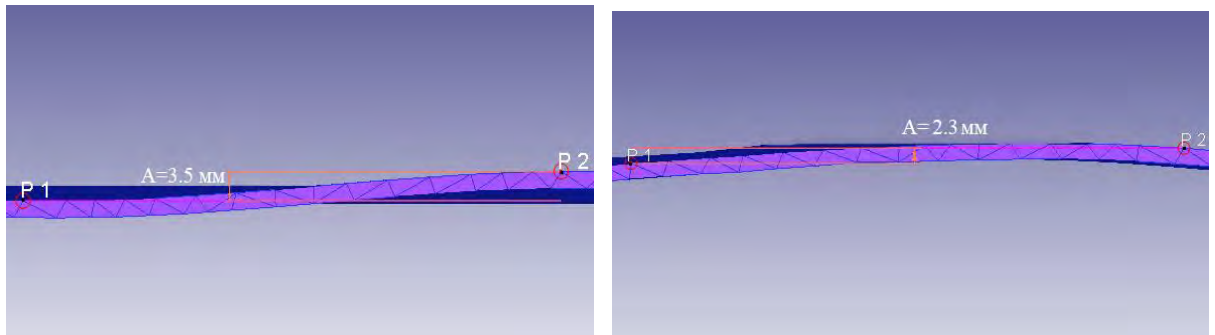
а – вихідна хвилястість; б – хвилястість після 1-го проходу;
в – після 2-го проходу; г – після 3-го проходу

Рисунок 4.14 – Зміна амплітуди хвилястості на краях листа

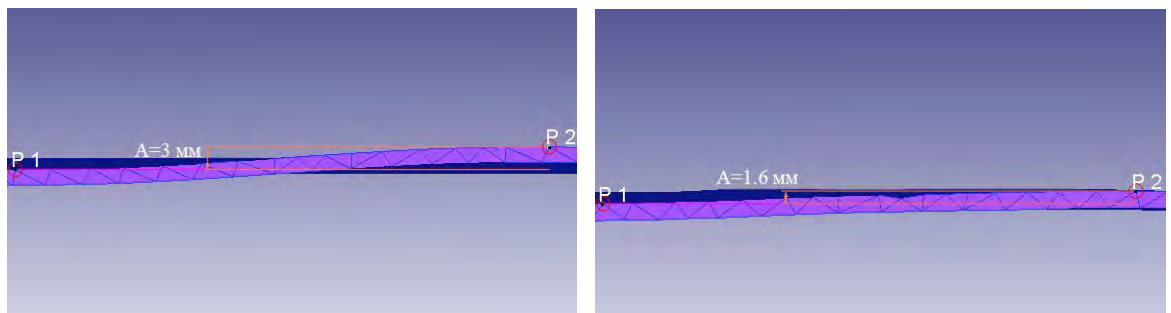
Разом з тим для енергосилових параметрів процесу експериментальні значення по відношенню до сили і моменту правки виявилися у всіх випадках нижче теоретичних, при цьому максимальна величина невідповідності мала місце для першого проходу та склала по силі правки 28 % і по моменту правки – 23 %, мінімальна також відрізнялася більш ніж на 12 %. Відзначене свідчить про наявність у теоретичній моделі неврахованих факторів, що впливають на точність результатів.



а)



б)



в)

зміна хвилястості після: 1-го проходу (а); 2-го проходу (б); в – 3-го проходу (в)

Рисунок 4.15 – Форма крайки листа, отримана при математичному моделюванні процесу правки

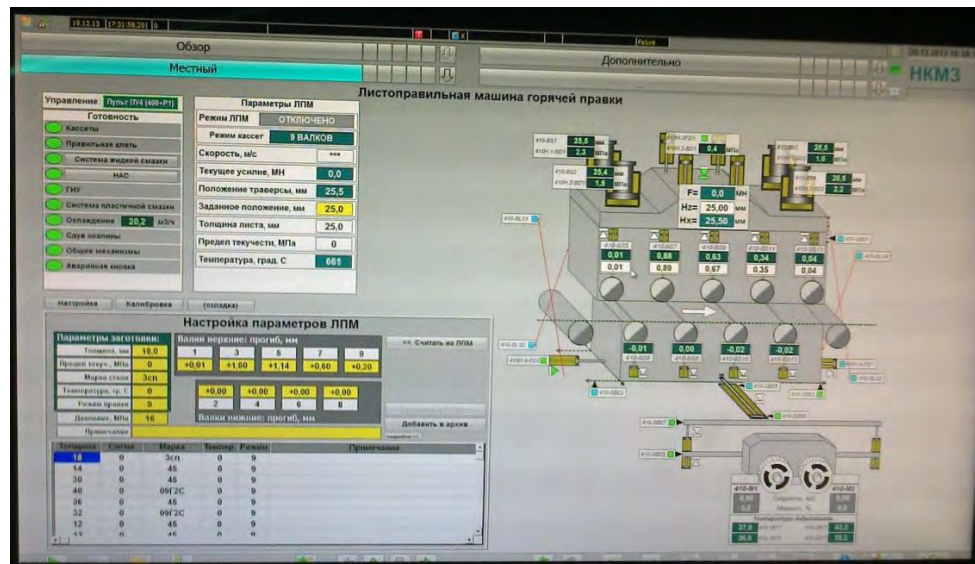
У цілому результати експериментальних досліджень підтвердили ефективність правки нерівномірно розподілених по ширині дефектів площинності шляхом диференційованого додатка по ширині навантаження за рахунок профілювання поверхні робочих роликів, зокрема, можливості правки при профілюванні тільки одного з них. Також була підтверджена вірогідність тривимірної скінчено-елементної моделі стосовно результуючих показників якості холодної правки листів з коробуватістю або хвилястістю крайок.

4.2 Промислова адаптація розробленої одномірної математичної моделі процесу правки на листопрямильній машині товстолистового стану 2850 ПАТ «Ашинський металургійний завод»

З метою промислової адаптації розроблених математичних моделей і програмних засобів були проведені експериментальні дослідження в умовах діючого цеху на листопрямильній машині товстолистового стану 2800 Ашинського металургійного заводу. Дана листопрямильна машина конструкції НК-МЗ уведена в експлуатацію в грудні 2013 року та має наступні переваги [161]:

- листопрямильна машина ТЛС 2800 АМЗ є однією з найбільш сучасних і дозволяє реалізувати індивідуальне налаштування робочих роликів;
- система автоматичного керування листопрямильною машиною оснащена діагностичним комплексом ІВА, що дозволяє вести моніторинг великої кількості параметрів роботи устаткування, таких, як переміщення та фактичне положення траверси листопрямильної машини та кожного з правильних роликів, тиску в натискних гідравлічних циліндрах, заданої та фактичної швидкості, струму та моменту на кожному з двигунів приводу правильних роликів і т.п.

Дослідження проводилися в такий спосіб. Оператор одержував з пульта керування робочої кліті ТЛС інформацію по марці металу і його товщині. При наближенні листа до листопрямильної машини встановленим на вході пірометром фіксувалася температура листа. Отримані вихідні дані вручну вводилися на першому етапі в переносну ЕОМ, а на другому – в керуючу програму ЛПМ з установленими програмними засобами на основі описаних у розділі 3 математичних моделей. Інтерфейс керуючої програми представлено на рисунку 4.16. Після завершення розрахунків результати повідомлялися операторові, який виконував налаштування листопрямильної машини. Якість виправленого металу оцінювалося працівниками ОТК цеху згідно діючих стандартів і умов.



а)



б)

Рисунок 4.16 – Интерфейс керуючої програми (а) і
пульт керування (б) ЛПМ ТЛС 2800 АМЗ

Записи енергосилових і кінематичних параметрів процесу фіксувалися протоколами системи ІВА. Приклад осцилографічного представлення протоколу запису технологічних параметрів в автоматичній системі діагностики ІВА показано на рисунку 4.17. Після розшифрування та зіставлення даних з інформацією рапортів прокатки по чистовій кліті (даних про геометричний і марочний сортамент прокатаного металу) аналізувалося відповідність результатів розрахунків енергосилових параметрів і їх фактичних значень.

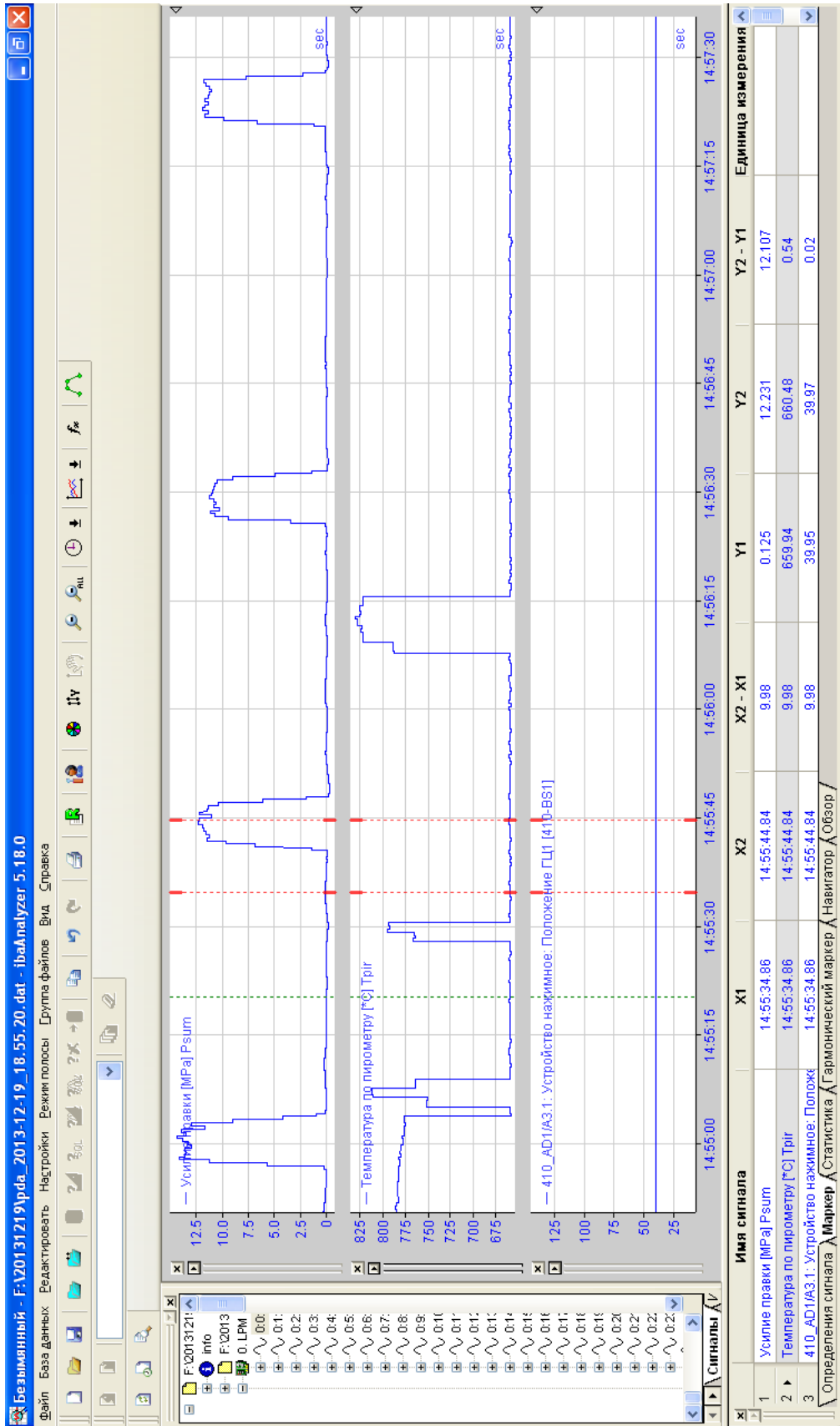


Рисунок 4.17 – Розподіли параметрів процесу правки на ЛПМ ТЛС 2800 АМЗ, що відображені в системі ІВА

Процес експериментальної правки відбито на рисунках 4.18 і 4.19, а стан листів після правки – на рисунку 4.20. У зв'язку з тим, що робота проводилася на діючому устаткуванні, обсяг і кількість зразків, що піддавалися правці з використанням розрахованих технологічних налаштувань, обмежувалися програмою завантаження стану.

У ході промислової адаптації розробленої математичної моделі були виправлені гарячекатані товсті листи з різних марок сталей (сталі марок 03сп, 20, 30, 45, 09Г2С, 30ХГСА) товщиною від 8 до 100 мм і шириною в діапазоні 1500...2700 мм при температурах від 650 до 850°C.

У ході досліджень сумарна сила правки визначалася в такий спосіб. У ненавантаженому стані обчислювалося середнє значення тиску в натискних та врівноважувальних гідроциліндрах, при правці визначалася різниця між тиском у натискних гідроциліндрах і середніми значеннями отриманих тисків по наступній залежності:



Рисунок 4.18 – Вхід металу в ЛПМ ТЛС 2800 АМЗ



Рисунок 4.19 – Вихід металу із ЛПМ ТЛС 2800 АМЗ

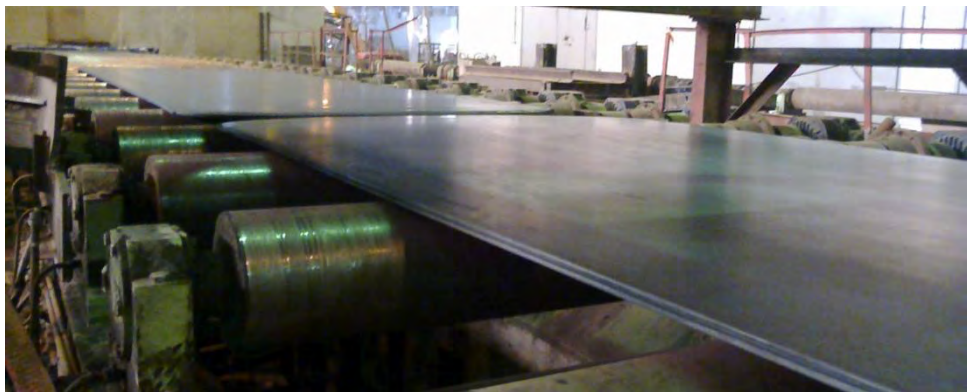


Рисунок 4.20 – Метал після правки на ЛПМ ТЛС 2800 АМЗ

$$P_{\Sigma} = \sum_{i=1}^4 P_i - \sum_{i=1}^4 P_{cp_i} - \left(\sum_{i=1}^n P_{вр_i} - G_{TP} \right), \quad (4.1)$$

де $P_i = \rho \pi D^2 / 4$ – сила, створювана натискними гідроциліндрами;

ρ – тиск рідини в гідроциліндрах;

D – діаметр плунжера гідроциліндра ($D = 525$ мм);

P_{cp_i} – сила, створювана натискними гідроциліндрами під час пауз;

$P_{вр_i}$ – сила, створювана гідроциліндрами, що врівноважують;

G_{TP} – вага траверси разом з верхньою касетою ($G_{TP} = 780$ кН).

У ході промислової адаптації були внесені зміни у визначенні вихідних даних для розрахунків налаштування роликів. Зокрема, через неможливість визначення напруження плинності матеріалу листів була здійснено три варіанти введення даних:

1. Явне задавання напруження плинності в МПа.
2. Задавання групи сталей. По рекомендаціях фахівців АМЗ марки сталей були розбиті на 6 груп. За базові прийняті типові марки сталі з характерними механічними властивостями для своєї групи: 1 – сталь 03сп; 2 – 17Г1С; 3 – 09Г2С; 4 – 10ХСНД; 5 – 40Х; 6 – 30ХГСА. Обчислення напруження плинності виконувалось за методикою Андреюка (підрозд. 1.3).
3. Задавання хімічного складу сталі, а саме змісту в процентному співвідношенні вуглецю; марганцю; кремнію; хрому; нікелю; вольфраму; молібдену; ванадію; титану; алюмінію; кобальту; ніобію та міді. Тут слід зазначити, що даний спосіб виконаний на перспективне введення нового пічного обладнання, що дозволяє одержувати даний вид інформації.

Дані про розмірний і марочний сортамент листів, підданих правці з використанням розрахованих на підставі розроблених математичних моделей технологічних налаштувань, наведено в таблиці 4.7. Тут же наведені результати теоретичного розрахунку сили правки та відповідна погрішність. На рисунках 4.21...4.23 наведені гістограми порівняння сил правки залежно від марки сталі та товщин листів.

Таблиця 4.7 – Результати промислового експерименту

Матеріал	Товщина	Ширина	Налаштування роликів, мм						Сила правки	Темпе- ратура	Кіль- кість	Р _{теор}	Похибка
	мм		1	3	5	7	9	МН					
3сп	8	2000	0	2,95	2,04	1,04	0,03	0,6	650	1	0,535	-12,1	
3сп	10	1500	0	2,21	1,56	0,8	0,03	0,79	650	1	0,855	7,6	
3сп	10	1500	0	2,21	1,56	0,8	0,03	0,84	650	1	0,855	1,8	
3сп	10	1500	0	2,21	1,56	0,8	0,03	1,06	650	1	0,855	-24,0	
3сп	10	1500	0	2,21	1,56	0,8	0,03	0,57	650	6	0,855	33,3	
3сп	10	1500	0	2,21	1,56	0,8	0,03	0,6	650	1	0,855	29,8	
3сп	10	1500	0	2,2	1,55	0,79	0,04	0,8	710	1	0,855	6,4	
3сп	12	1500	0	2,14	1,5	0,76	0,02	0,8	755	3	1,028	22,2	
3сп	12	1500	0	2,14	1,5	0,76	0,02	0,8	810	3	1,08	25,9	
3сп	20	1500	0	1,21	0,9	0,44	0,07	2,5	750	1	2,24	-11,6	
3сп	20	1500	0	1,21	0,9	0,44	0,07	2,57	750	1	2,24	-14,7	
3сп	20	1500	0	1,22	0,92	0,47	0,04	2,47	750	1	2,24	-10,3	

Продовження табл. 4.7

Матеріал	Товщина мм	Ширина мм	Налаштування роликів, мм						Сила правки	Темпе- ратура °С	Кіль- кість	R _{теор}	Похибка %
			1	3	5	7	9						
3сп	20	1500	0	1,21	0,9	0,44	0,07	9	МН	750	1	2,24	23,2
3сп	20	1500	0	1,24	0,93	0,49	0,05	0,05	1,9	750	1	2,24	15,2
3сп	20	1500	0	1,24	0,93	0,49	0,05	0,05	1,99	750	1	2,24	11,2
3сп	20	1500	0	1,39	1,01	0,53	0,04	0,04	2,0	750	1	2,24	10,7
3сп	20	1500	0	1,21	0,92	0,47	0,05	0,05	1,8	750	1	1,9	5,3
3сп	20	1500	0	1,39	1,01	0,53	0,04	0,04	2,0	750	1	1,9	-5,3
3сп	20	1500	0	1,39	1,01	0,53	0,04	0,04	2,4	750	1	1,9	-26,3
3сп	20	1500	0	1,39	1,01	0,53	0,04	0,04	2,52	750	1	1,9	-32,6
3сп	20	1500	0	1,22	0,93	0,47	0,04	0,04	2,46	750	4	1,9	-29,5
09Г2С	20	1800	0,01	1,62	1,17	0,6	0,03	0,03	2,7	700	1	3,8	28,9
30ХГС А	20	2000	0	1,01	0,76	0,39	0,02	0,02	2,7	750	1	2,3	-17,4
3сп	25	2000	0,01	0,92	0,73	0,38	0,02	0,02	3,5	750	1	4,8	27,1

Продовження табл. 4.7

Матеріал	Товщина мм	Ширина мм	Налаштування роликів, мм							Сила правки	Темпе- ратура °С	Кіль- кість	R _{теор}	Похибка %
			1	3	5	7	9							
3сп	25	2000	0,01	0,92	0,73	0,38	0,02	3,6	МН	750	1	4,8	25,0	
3сп	25	2000	0,01	0,92	0,73	0,38	0,02	4,4	МН	750	1	4,8	8,3	
30ХГСА	25	2000	0,01	0,89	0,67	0,35	0,04	3,5	МН	750	1	4,6	23,9	
30ХГСА	25	2000	0,01	0,89	0,67	0,35	0,04	3,35	МН	750	1	4,6	27,2	
09Г2С	36	2000	0	1,2	0,82	0,40	0	5,0	МН	850	1	4,7	-6,4	
09Г2С	36	2000	0	1,16	0,8	0,37	0	4,3	МН	900	1	6,9	37,7	
09Г2С	36	2000	0	1,2	0,81	0,40	0	6,0	МН	900	1	6,9	13,0	
09Г2С	40	2000	0	2,57	1,74	0,88	0	12,8	МН	800	2	13,5	5,2	
09Г2С	40	2000	0	2,59	1,73	0,90	0	15,7	МН	900	1	13,6	-15,4	
09Г2С	40	2000	0	2,60	1,73	0,90	0	14,5	МН	850	1	13,5	-7,4	
09Г2С	40	2000	0	2,58	1,74	0,90	0	13,1	МН	900	1	13,6	3,7	
09Г2С	40	2000	0	2,57	1,74	0,90	0	13,8	МН	800	2	13,5	-2,2	

Продовження табл. 4.7

Матеріал	Товщина мм	Ширина мм	Налаштування роликів, мм							Сила правки	Темпе- ратура °С	Кіль- кість штук	R _{теор}	Похибка %
			1	3	5	7	9							
09Г2С	40	2000	0	2,56	1,69	0,81	0,02	0,02	14,5	850	1	13,5	-7,4	
09Г2С	40	2000	0	2,56	1,68	0,82	0,02	0,02	11,3	850	1	13,5	16,3	
3сп	40	1500	0	2,57	1,72	0,88	0,02	0,02	10	850	2	13,5	25,9	
3сп	40	1500	0	1,47	1,07	0,54	0,02	0,02	10	850	2	14,2	29,6	

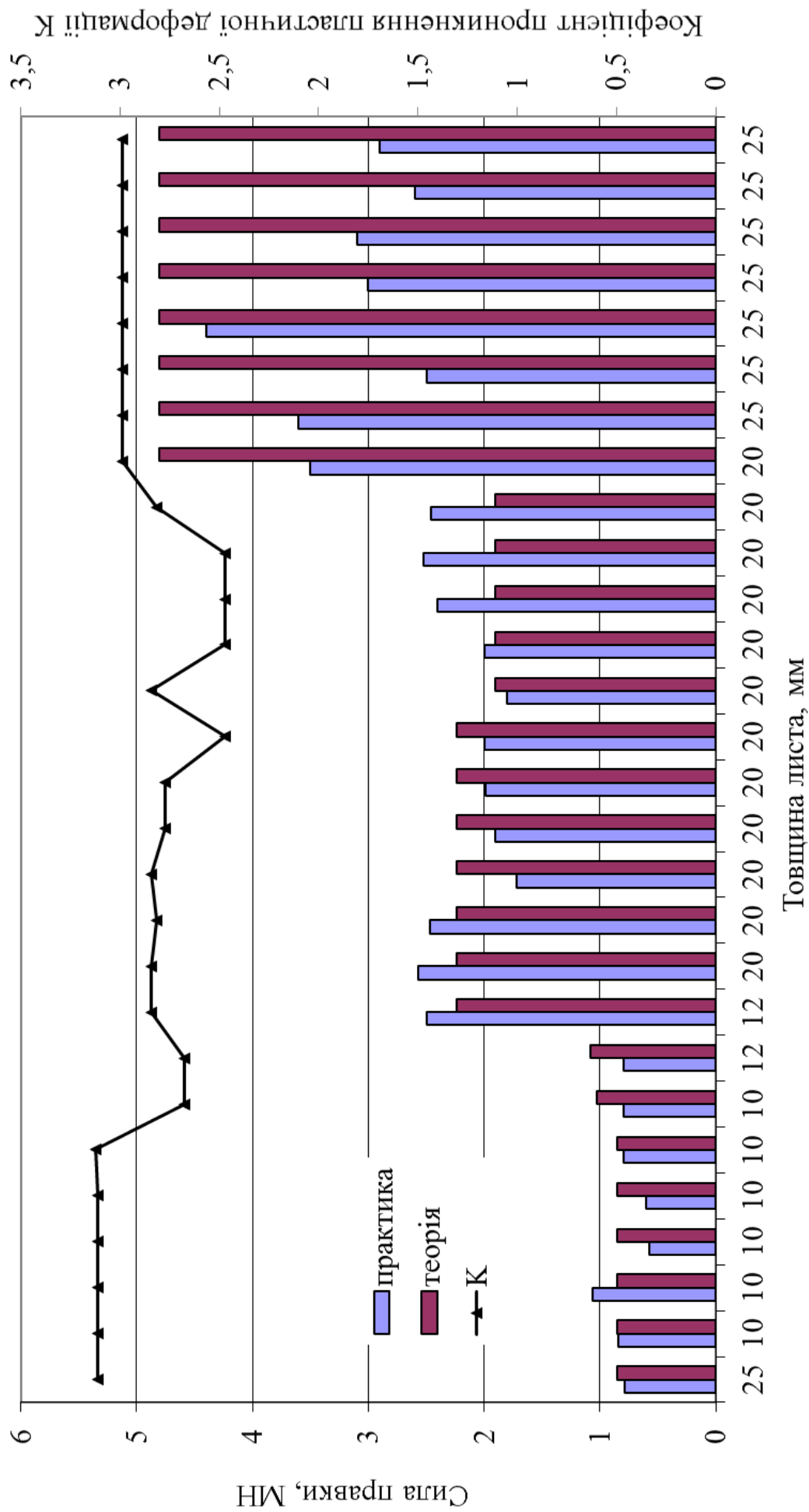


Рисунок 4.21 – Порівняння експериментальних і теоретичних сил правки залежно від товщини для листів зі сталі 03сп

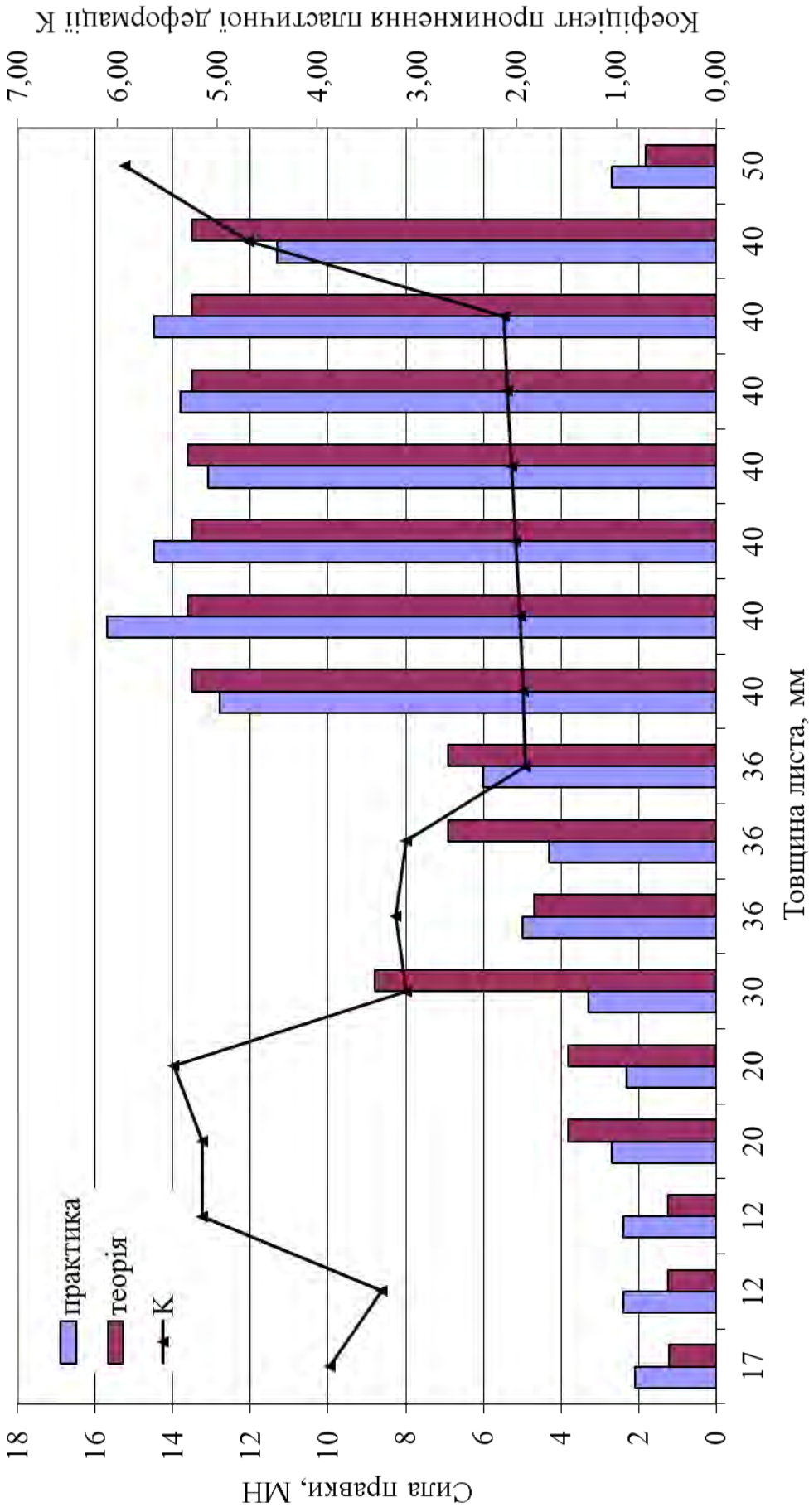


Рисунок 4.22 – Порівняння експериментальних і теоретичних сил правки залежно від товщини для листів зі сталі 09Г2С

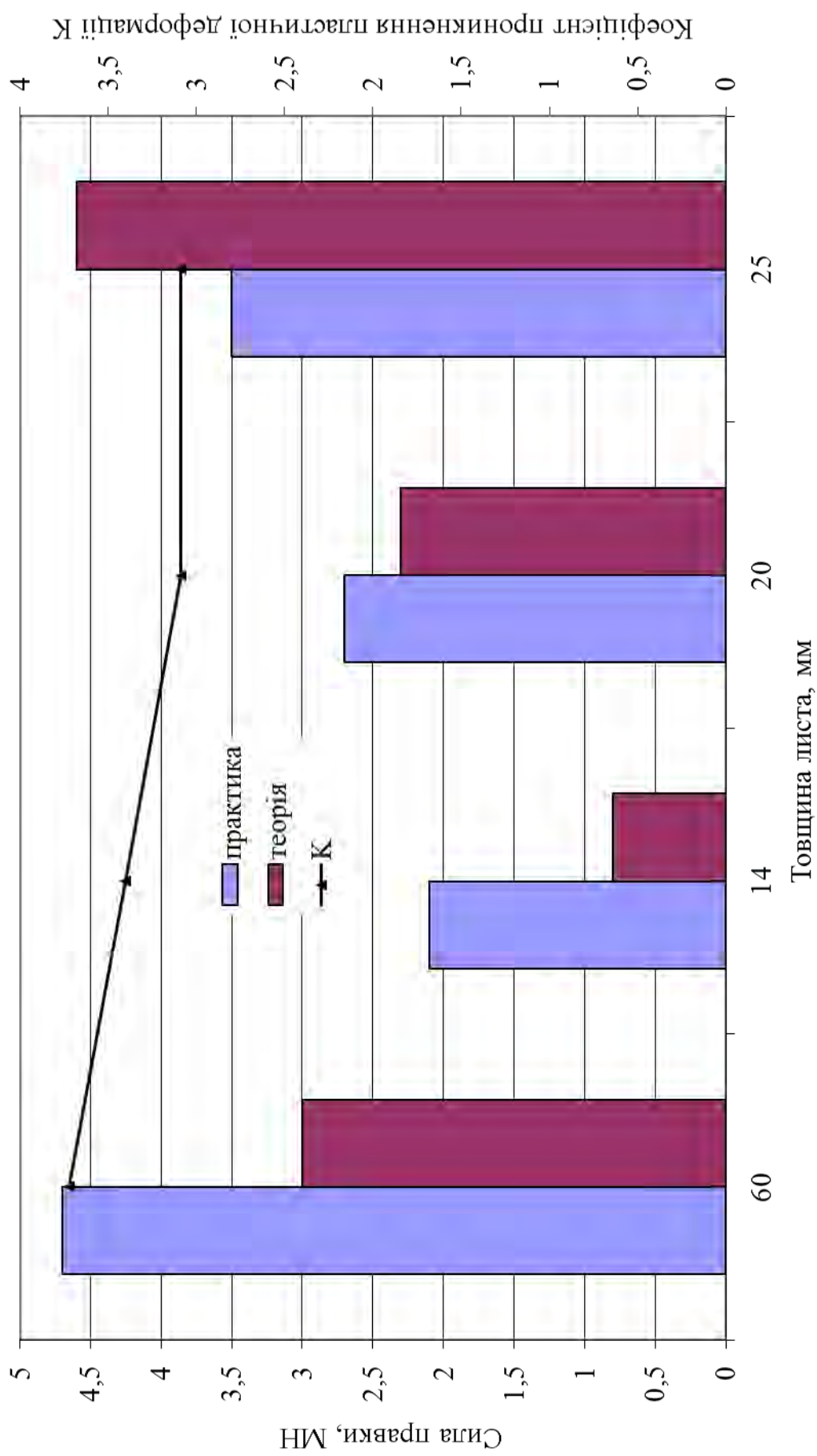
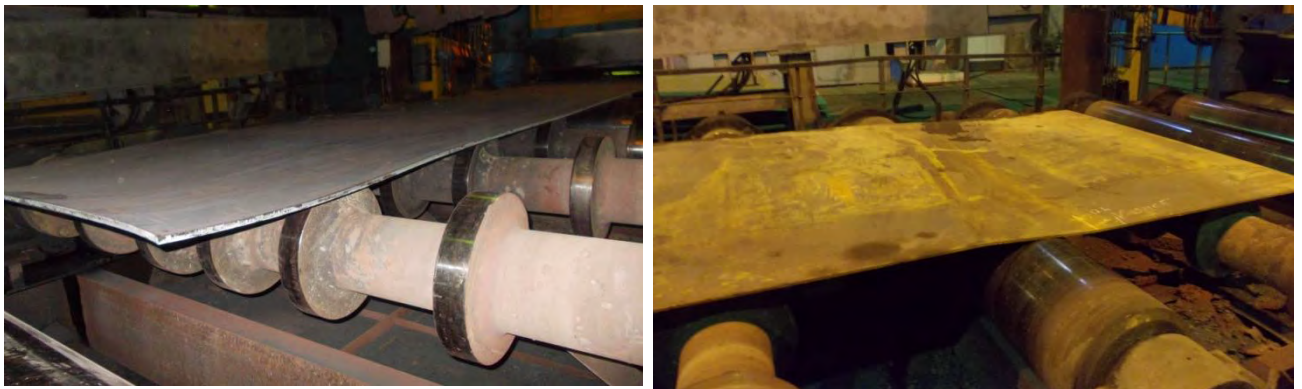


Рисунок 4.23 – Порівняння експериментальних і теоретичних сил правки залежно від товщини для листів зі сталі 30ХГСА

Середні значення похибки визначення сил правки склали для листів зі сталі 03сп 20,8%, зі сталі 09Г2С – -7,3%, зі сталі 30ХГСА – -32,2%. Похибки визначення енергосилових параметрів, крім допущень, покладених в основу математичних моделей, також викликані завданням для розрахунків не фактичної, а номінальної товщини підкату, що пов'язане з відсутністю товщиноміру на стані, а також усередненням механічних властивостей прокату.

Технологічні налаштування, розраховані з використанням математичної моделі в її програмній реалізації, дозволили здійснити якісну правку за один прохід і забезпечили площинність листів, що відповідає вимогам діючих на підприємстві норм і стандартів.

Холодній правці піддавали листи товщиною 8...25 мм, що мали яскраво виражені дефекти площинності такі як: коробуватість і поздовжня хвилястість, що перевищувала 30 мм/м (рисунок 4.24).



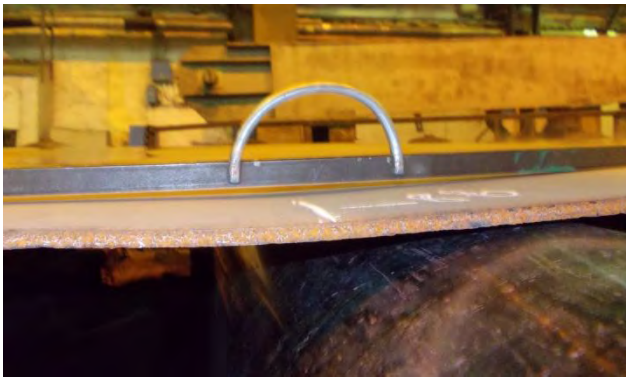
а)

б)

Рисунок 4.24 –Листи товщиною 16 мм (а) і 8 мм (б)
зі сталі 09Г2С до холодної правки

Листи укладали цеховим краном на рольганг перед листопральною машиною, очищали поверхню від забруднень і заміряли товщину в трьох-чотирьох точках по довжині листа, а також геометричні параметри вихідних дефектів площинності. Для вимірів використовували перевірочні лінійки дов-

жиною 1 м і 2 м, штангенциркуль, лінійку та набір щупів. На рисунках 4.25...4.26 показаний принцип вимірів дефектів площинності на прикладі листа товщиною 16 мм зі сталі 3сп. Поверхня листа мала поздовжню хвилю величиною до 32 мм/м, а також коробуватість у хвостовій частині листа порядку 12 мм на ширині 2 м. Зафіксовані дефекти на поверхні листів відзначалися крейдою з вказівкою виду дефекту і його величини.



а)



б)

Рисунок 4.25 – Виміри товщини металу, що виправляється, і вихідних дефектів площинності: а – хвилястості, б – коробуватості



а)



б)

Рисунок 4.26 – Виміри дефектів площинності листа після правки: а – хвилястості, б – коробуватості

У результаті правки площинність оброблених листів була доведена до показників, що задовольняють вимогам ГОСТ і навіть перевищуючих їх (рисунок 4.26). В основному правка виконувалася за один прохід.

При проведенні промислових експериментів як гарячої, так і холодної правки були використанні різноманітні значення коефіцієнтів проникнення пластичної деформації, котрі визначались положенням третього робочого ролика (див. рис. 4.21...4.23). На основі результатів контролю площинності отриманих листів було встановлено, що для гарячої правки найбільш раціональне значення коефіцієнту проникнення пластичної деформації лежить в діапазоні 2,5...4, а для холодної правки – 4...6. Вибір значення цього коефіцієнту в межах рекомендованих діапазонів залежить від вихідної кривизни листів (чим більше кривизна, тем вище значення). Крім цього було встановлено, що для холодної правки листів з високим рівнем коробуватості потрібно два проходи для одержання площинності понад вимоги ГОСТ, а саме нижче 1 мм/м.

Результати експериментальних досліджень на промисловому устаткуванні в умовах листопрокатного цеху ТЛС 2800 Ашинського металургійного заводу підтвердили вірогідність результатів розрахунків параметрів якості прокату, що виправляється, за допомогою розробленої математичної моделі. Проведена правка партії гарячекатаних товстих листів з різних марок сталей товщиною від 8 до 100 мм без зауважень з боку ОТК цеху підтвердили можливість застосування розробленої одномірної математичної моделі в системах автоматизованого керування устаткуванням для гарячої та холодної правки листів.

Висновки

1 Аналіз результатів експериментальних досліджень у лабораторних умовах на спеціально створеній установці листоправильної машини свідчить про якісну та кількісну відповідність результатів розрахункових досліджень і лабораторних експериментів. При цьому погрішність розрахунків сили правки на третьому ролику не перевищила 15,3% при середньоквадратичному відхиленні 5,9%, а на 5-му ролику – 22,4% при середньоквадратичному відхиленні 9,2%, погрішність розрахунків різниці довжин волокон по ширині заготовки для сталевих листів не перевищила 12,9%, а для свинцевих – 11,34%. Для виявлення більш повної картини були також проведені дослідження правки листів у роликах з бочкоподібною формою робочої поверхні, що дозволяє в достатній мірі імітувати вигин по центру ролика. Встановлено, що для випадку правки листа з максимальною вихідною амплітудою хвилі на крайці 4 мм після першого проходу амплітуда хвилі склала 3,3 мм, після другого – 2,7 мм, після третього – 1,8 мм зі середньоквадратичним відхиленням за результатами експериментів відповідно 0,12, 0,11 і 0,09 мм, при цьому погрішність результатів тривимірного моделювання у всіх випадках не перевищила 15%, що свідчить про достатній ступінь вірогідності теоретичної моделі стосовно результуючих параметрів форми листа.

2 У процесі експериментальної правки в промислових умовах був визначений фактичний вплив коефіцієнта проникнення пластичної деформації на результуючу площинність листів. Встановлено, що для гарячої правки найбільш прийнятне значення 2,5...4, у той час як для холодної правки – 4...6 залежно від вихідної кривизни листів (чим більше кривизна, тем вище значення). Також було встановлено, що для холодної правки листів з високим рівнем коробуватості потрібно два проходи (для одержання площинності понад вимоги ГОСТ). У цілому математична модель забезпечує налаштування ЛПМ, що дозволяє в результаті як гарячої, так і холодної правки одержувати якісний металопрокат з

показниками площинності згідно з вимогами сучасних вітчизняних і закордонних стандартів. Середні значення погрешностей визначення сил правки склали для листів зі сталі 03сп 20,8%, зі сталі 09Г2С – -7,3%, зі сталі 30ХГСА – -32,2%. Погрешності визначення енергосилових параметрів, крім допущень, покладених в основу математичних моделей, також викликані завданням для розрахунків не фактичної, а номінальної товщини підкату, що пов'язане з відсутністю товщиноміру на стані, а також усередненням механічних властивостей прокату.

РОЗДІЛ 5
АВТОМАТИЗОВАНЕ ПРОЕКТУВАННЯ
ТЕХНОЛОГІЧНИХ НАЛАШТУВАНЬ ЛИСТОПРАВИЛЬНОЇ
МАШИНИ З ДИФЕРЕНЦІЙОВАНИМ ДОДАТКОМ СИЛИ ПРАВКИ ПО
ШИРИНІ ЛИСТІВ

5.1 Автоматизоване проектування технологічних налаштувань листопрямуючої машини на основі чисельно-аналітичної моделі процесу правки багаторазовим знакозмінним вигином

Для забезпечення якісної правки прокату необхідно знати оптимальні налаштування листопрямуючої машини. Вони залежать від багатьох чинників, зокрема, від вихідної кривизни листа, його геометричних розмірів і механічних властивостей, а також від конструктивних параметрів самої машини. Тому для вдосконалення процесу правки необхідно мати автоматизовану систему для швидкого (в реальних промислових умовах – 0,2 сек) розрахунку налаштування машини в залежності від вихідних параметрів, що задаються вимірювальною апаратурою або, в крайньому випадку, оператором.

В основі такої автоматизованої системи лежить розроблена математична модель (див. розд. 3), а також її програмна реалізація. Розроблений алгоритм математичної моделі дозволяє визначати необхідне для правки поздовжньої кривизни технологічне налаштування правильної машини, що зводиться до визначення координат кожного з рухливих роликів залежно від відомих параметрів металу, що виправляється, геометричних параметрів листопрямуючої машини, а також значення допустимої залишкової кривизни металу після правки. При цьому особливістю даної моделі є можливість застосування такого налаштування роликів листопрямуючої машини, при якому виправляється дефект, пов'язаний з різним подовженням волокон по ширині листа.

Вивчаючи досвід експлуатації устаткування, для полегшення завдання металу в правильну машину перший по ходу металу ролик - верхній доцільно

встановлювати на товщину металу, а значення прогину металу першими роликми на вході в машину [157]:

$$f_3 = \frac{\sigma_s t^2}{KEh}, \quad (5.1)$$

де σ_s – напруження плинності матеріалу прокату, що правиться, МПа;

t – крок роликів правильної машини, мм;

E – модуль пружності, МПа;

h – товщина прокату, мм;

K – коефіцієнт проникнення пластичної деформації.

У якості вихідних даних були використані наступні:

– діаметр роликів d листоправильної машини;

– крок роликів t листоправильної машини;

– кількість n роликів, а також особливість їх розташування*;

– товщина листа h , фізико-механічні властивості матеріалу листа, його напруження плинності σ_s та коефіцієнти, що описують криву зміцнення;

– вихідна кривизна листа χ_0 ;

– заданий коефіцієнт проникнення пластичної деформації K [1; 57];

– максимально припустима кривизна листа після правки $[\chi_1]$.

Ґрунтуючись на зазначених передумовах, отриманих з досвіду експлуатації, та використовуючи вищенаведені вихідні дані, був розроблений наступний алгоритм автоматизованого проектування технологічного налаштування багатороликової листоправильної машини, наведений для конструкції з можливістю правки листів з хвилястістю [161].

* Під особливостями розташування правильних роликів мається на увазі порядок їх розташування у верхній і нижній касетах (верхній або нижній ролик перший по ходу руху металу), можливість регулювання положення вхідного та вихідного роликів, паралельне, похиле або індивідуальне налаштування інших роликів і розташування регульованих роликів – у верхній або нижній касетах

На першому етапі для всього циклу проектування всі нижні ролики лежать в одній площині на рівні правки, а верхні ролики встановлюються на відстані від нижніх, рівній товщині металу, що правиться (див. рис. 5.1, а).

На другому етапі перший ролик залишається без змін, а наступні верхні ролики, починаючи з 2-го, опускаються на величину, рівну розрахунковому прогину f_3 (5.1) (див. рис. 5.1, б).

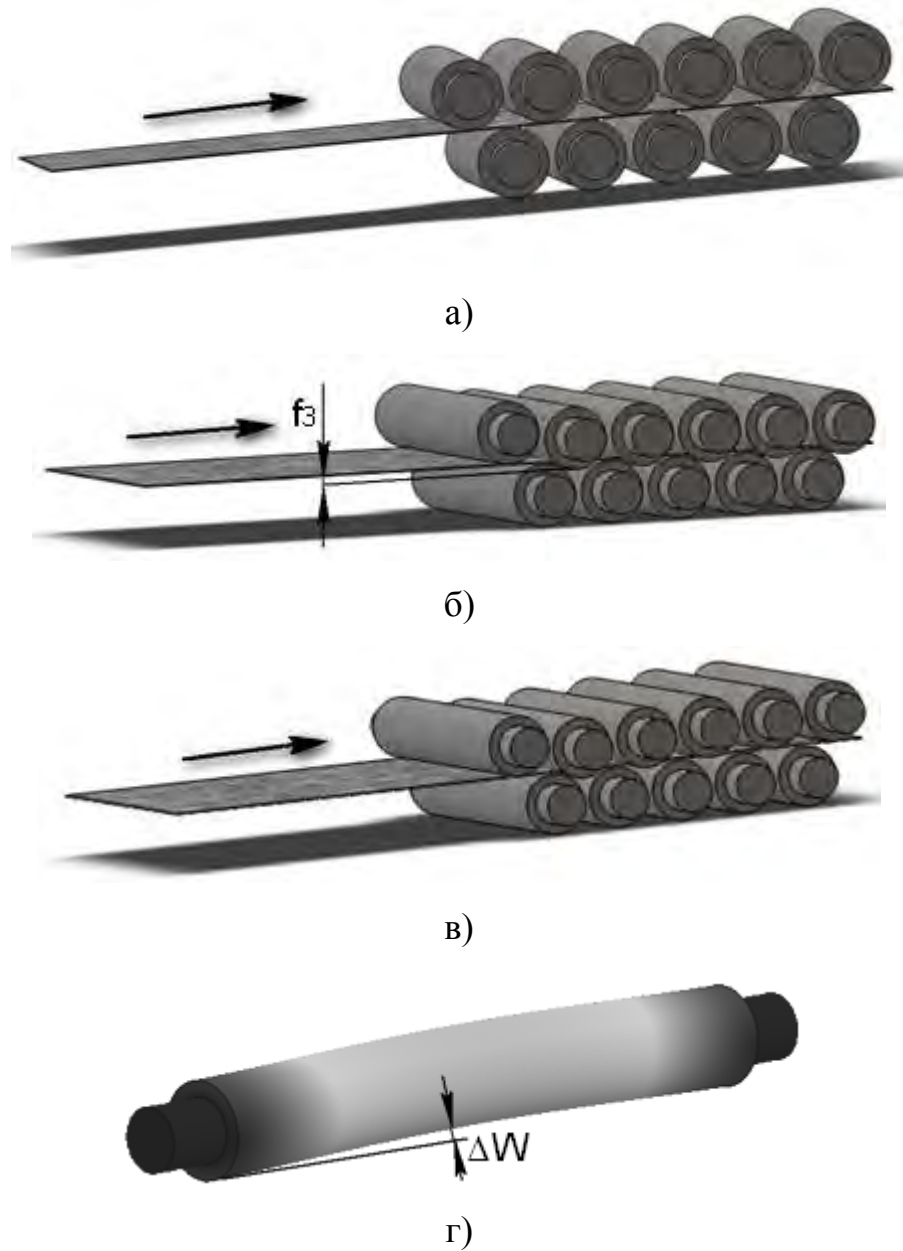
Третій етап полягає в моделюванні процесу правки для отриманих координат правильних роликів. Відбувається перевірка, яка полягає в наступному: коли кривизна металу на виході з машини менше або рівна припустимій, проектування завершується, налаштування вважається прийнятним. Якщо ж кривизна прокату на виході з листоправильної машини перевищує припустиме значення, то ролики № 1 і 3 залишаються на місці, а верхні ролики, починаючи з № 5, починають піднімати на величину, що регламентується точністю позиціонування осей роликів наявним натискним механізмом (див. рис. 5.1, в).

Для отриманих координат знову проводиться повтор третього етапу.

Після того, як залишкова поздовжня кривизна листа ввійде в інтервал припустимої кривизни, перевіряється показник форми листа (див. підрозд. 3.1), і якщо буде потреба – проводять вигин ролику №3 (див. рис. 5.1, г). Величину вигину збільшують з мінімально можливої до максимальної припустимої з умов міцності цього ролику. У випадку задовільного показника форми листа цей етап припиняють, в протилежному випадку при максимальному вигині поточного ролика починають процедуру вигину наступного по ходу ролика.

Укрупнену блок-схему даного алгоритму рішення показано на рисунку 5.2. Програмування даного алгоритму було виконане в лінгвістичному середовищі MS Visual Basic v.6.0. Розроблені програмні засоби представлені в додатку Б.

У рамках виконання роботи дані програмні засоби були адаптовані до процесу гарячої та холодної правки на ЛПМ № 1 ТЛС 2800 Ашинського



а – встановлення роликів на рівень правки; б – опускання роликів на величину вигину f_3 ; в – послідовне піднімання роликів №№ 5, 7,9 для забезпечення потрібної кривизни листа $[\chi_1]$; г – вигин роликів для забезпечення потрібної форми листа

Рисунок 5.1 – Розрахункова схема до алгоритму автоматизованого проектування технологічного налаштування багатороликової листоправильної машини

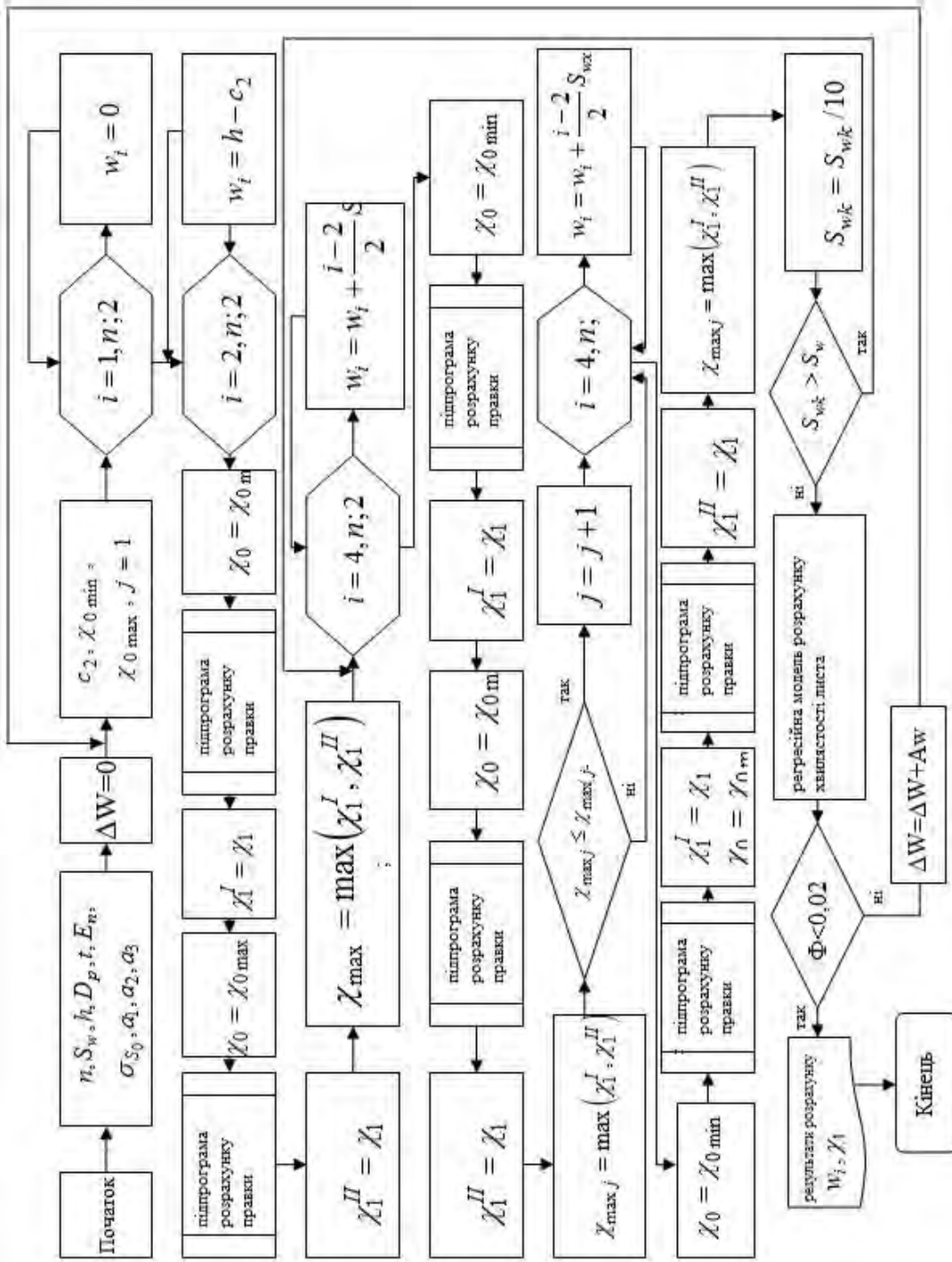


Рисунок 5.2 – Укрупнена блок-схема алгоритму автоматизованого розрахунку технологічного налаштування багаторічної листопривильної машини

металургійного заводу [162]. Програма була виконана згідно з вимогами замовника у вигляді бібліотеки DLL, що динамічно підключається. Опис, обмеження та принцип роботи програмного продукту представлені в додатку В, роздруківка програмного коду – у додатку Г, приклади розрахунків технологічних налаштувань правильних роликів для вибіркового сортаменту стану представлені в додатку Д.

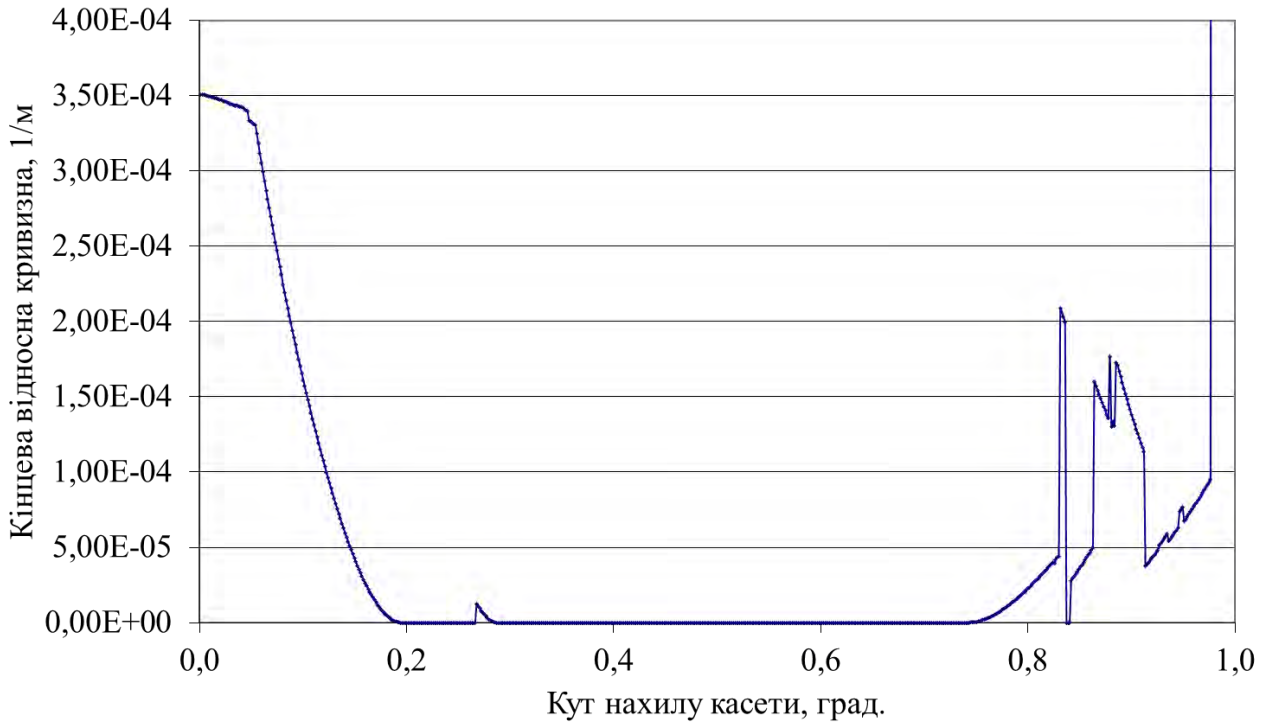
Для перевірки адекватності розробленого алгоритму автоматизованого розрахунку технологічного налаштування багатороликової листопрямильної машини був проведений ряд розрахунків для різного типорозміру листів з різних матеріалів.

Розрахунки були виконані стосовно до холодної правки на листопрямильній машині $13 \times 210 \times 2000$. При розрахунках було прийнято наступні параметри листопрямильної машини:

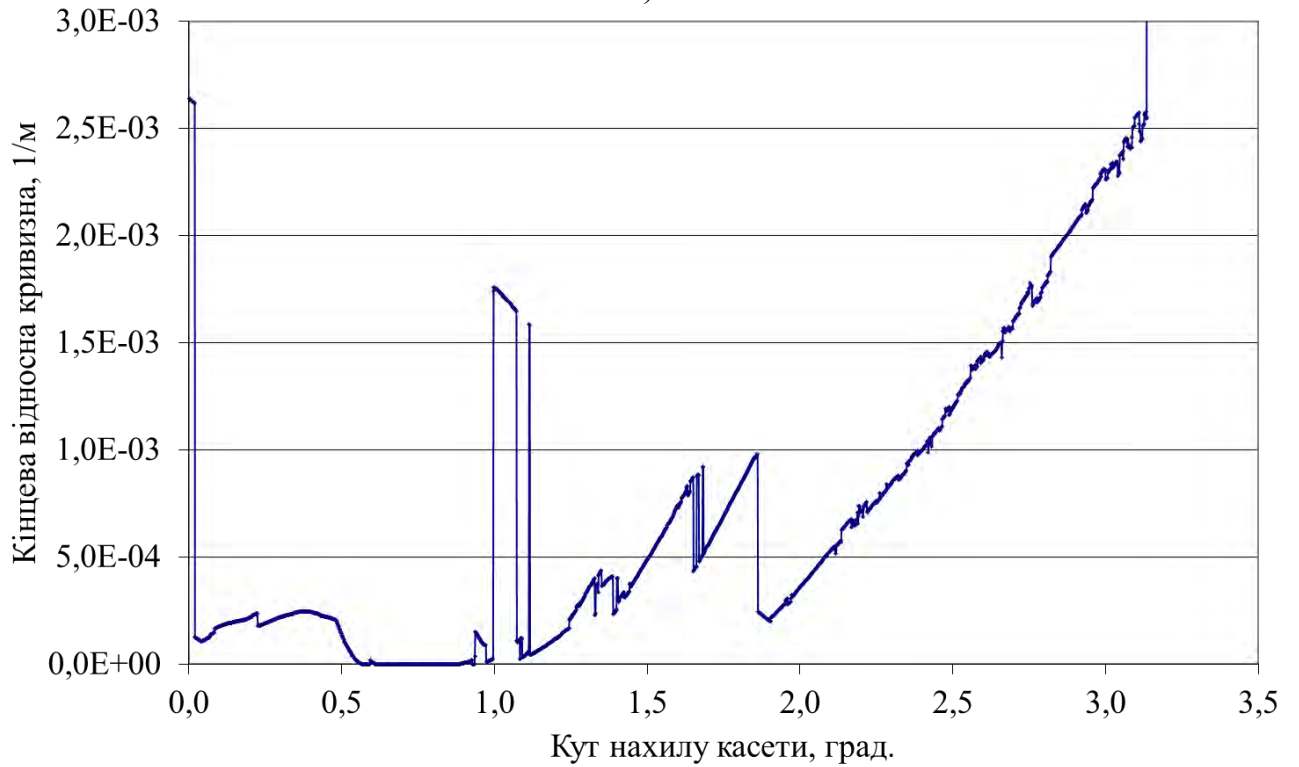
- кількість правильних роликів – 13;
- діаметр правильних роликів – 210 мм;
- крок розташування роликів – 230 мм;
- рухлива траверса – верхня;
- налаштування роликів у рухливій траверсі – індивідуальне;
- кількість роликів у рухливій траверсі – 7.

Приклади розрахункових розподілів залишкової кривизни листів для діапазону товщин від 4 мм до 16 мм наведено на рисунку 5.3.

Тут слід вказати, що з метою візуалізації результатів під кутом нахилу касети приймали комбінацію індивідуальних налаштувань робочих роликів. Як видно з графіків, при збільшенні кута нахилу верхньої касети залишкова кривизна зменшується до свого мінімального значення, близького до нуля, а потім спостерігається її безсистемна хаотична зміна з різким збільшенням. Із представлених розподілів видно, що зі збільшенням товщини металу, що правиться, для досягнення заданої залишкової кривизни листа кут нахилу верхньої траверси збільшується.



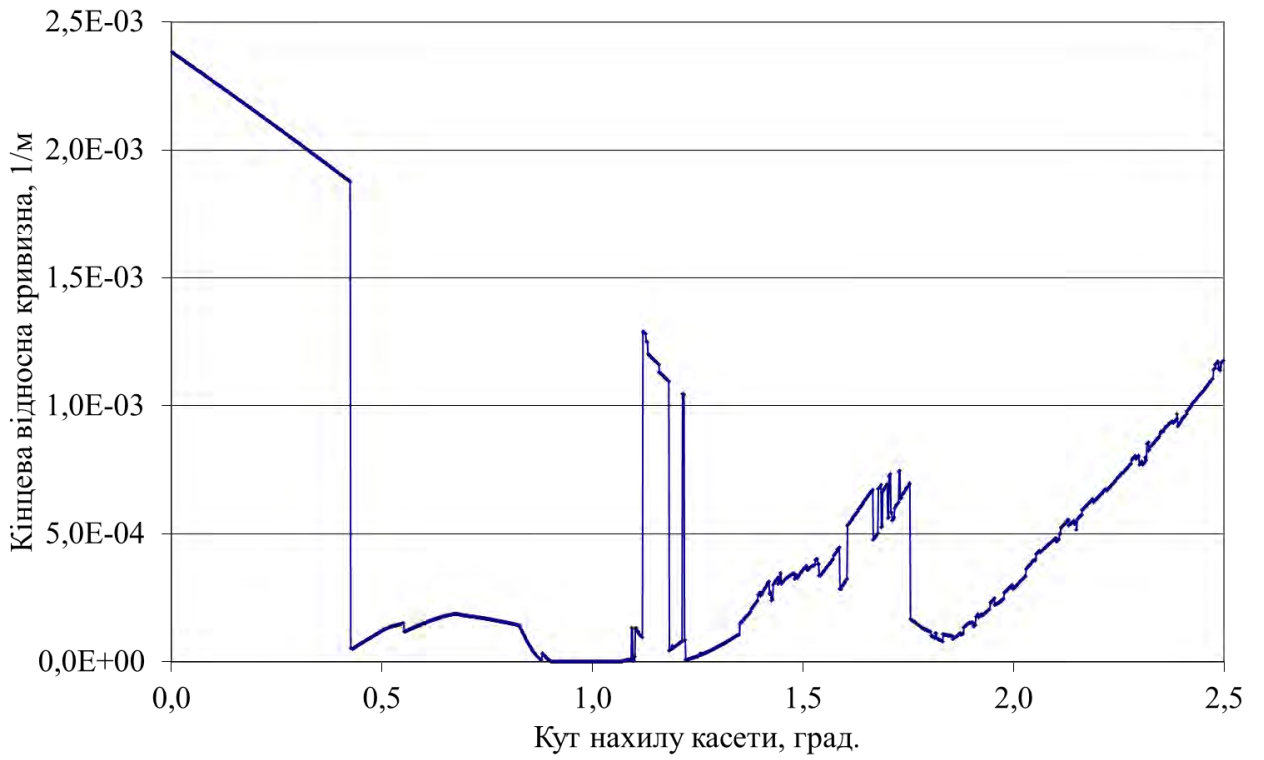
а)



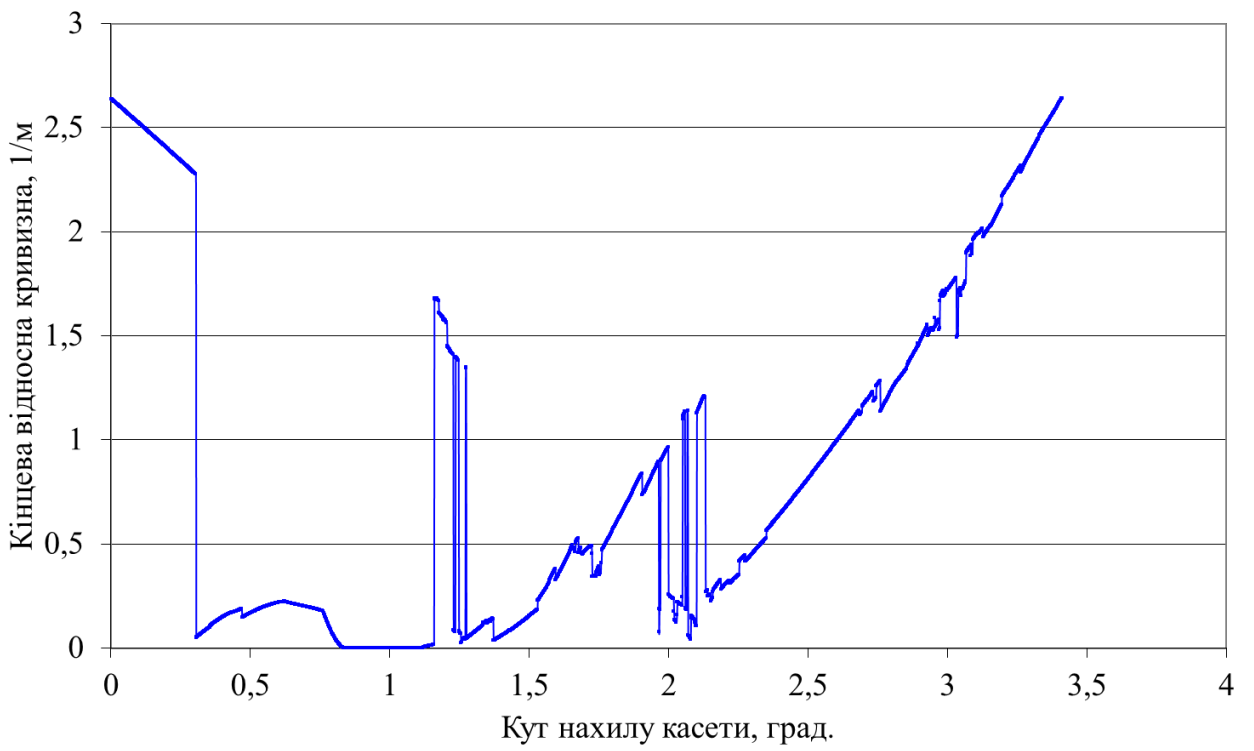
б)

Рисунок 5.3 – Зміна кінцевої відносної кривизни при збільшенні кута нахилу верхньої касети для листів різної товщини:

4 мм (а); 6 мм (б); 8 мм (в); 12 мм (г); 14 мм (д)

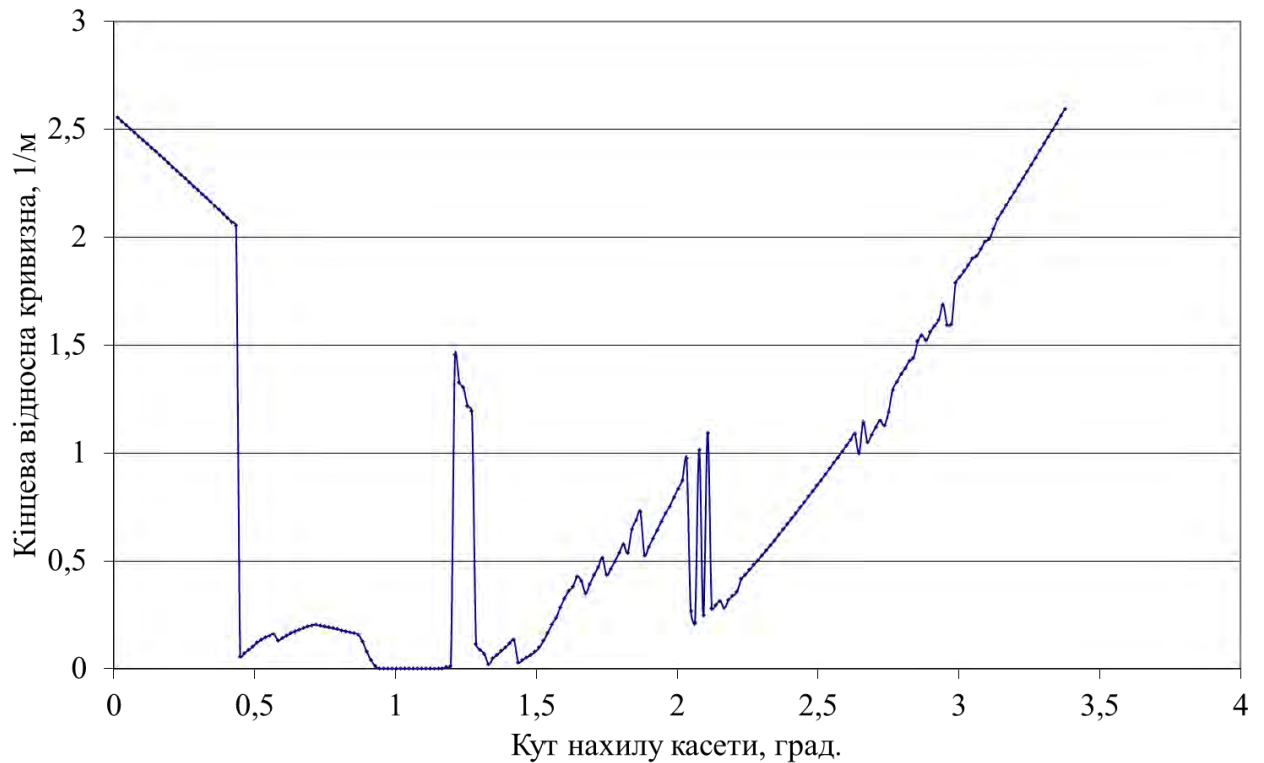


в)



г)

Продовження рис. 5.3, Лист 2



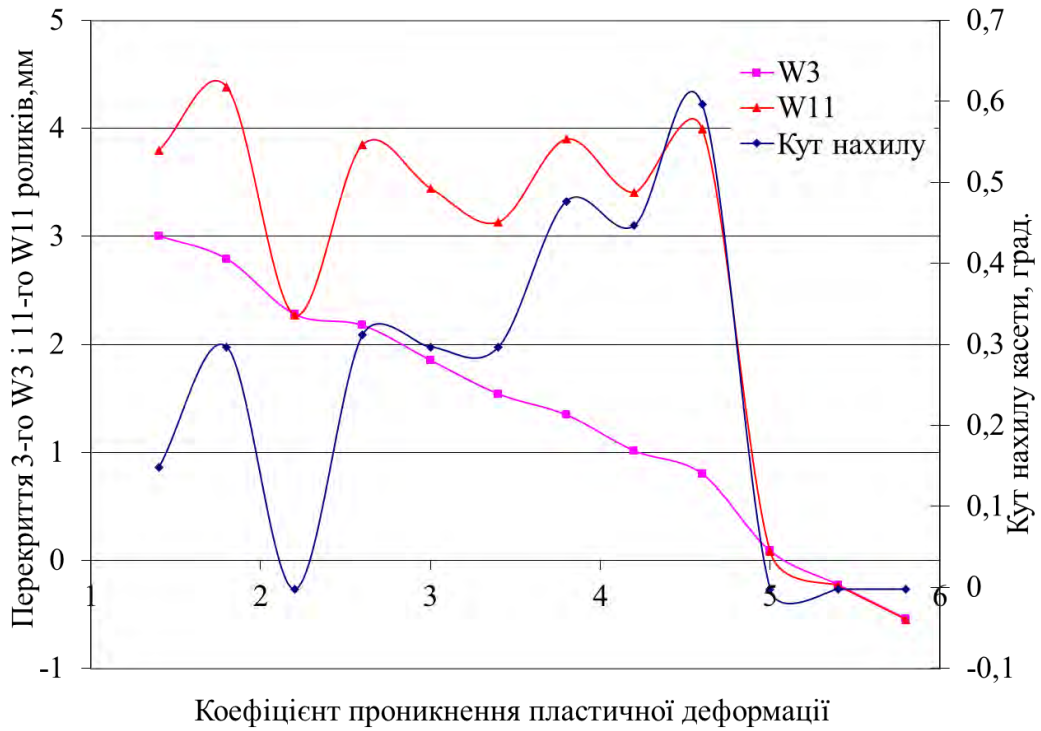
д)

Продовження рис. 5.3, Лист 3

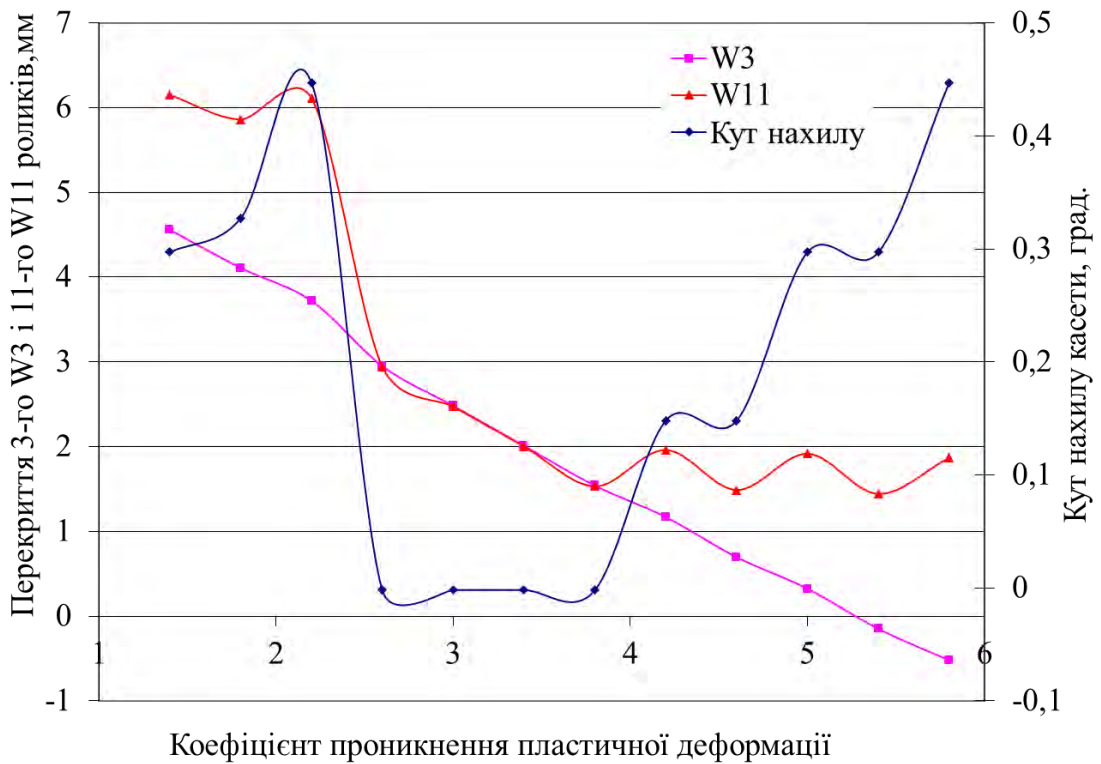
Аналіз представлених залежностей показує наявність єдиного екстремуму результуючої кривизни листа та підтверджує правомірність використовуваного алгоритму та його подальшого використання для розрахунків.

На основі описаного алгоритму були зроблені дослідження з проектування технологічних налаштувань для різних геометричних параметрів листа, що правиться, і аналіз отриманих налаштувань залежно від вихідних параметрів процесу. Приклади отриманих розрахункових розподілів показано на рисунках 5.4...5.5. З проведених розрахунків для різних типорозмірів і аналізу графіка, видно, що оптимальне значення коефіцієнта проникнення пластичної деформації лежить у діапазоні від 4...4,5, причому менше значення відноситься до меншої товщини прокату.

Застосування програмної реалізації описаної математичної моделі з погляду багатокритеріального пошуку екстремумів для знаходження найбільш

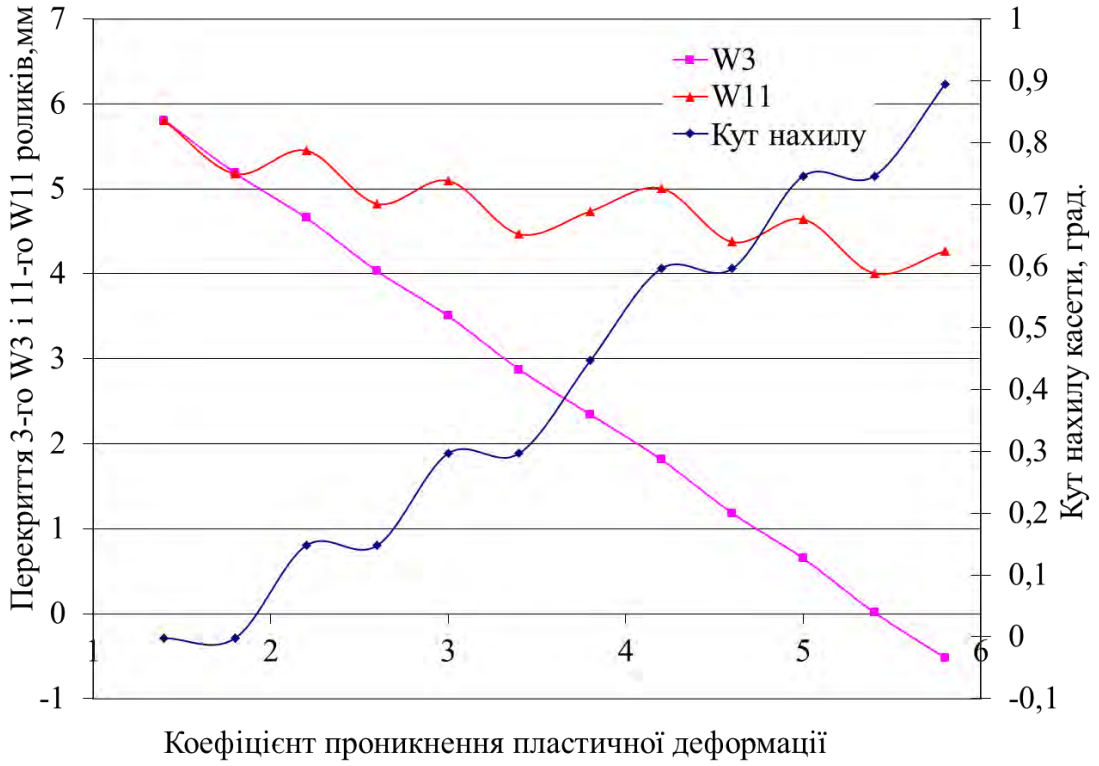


а)

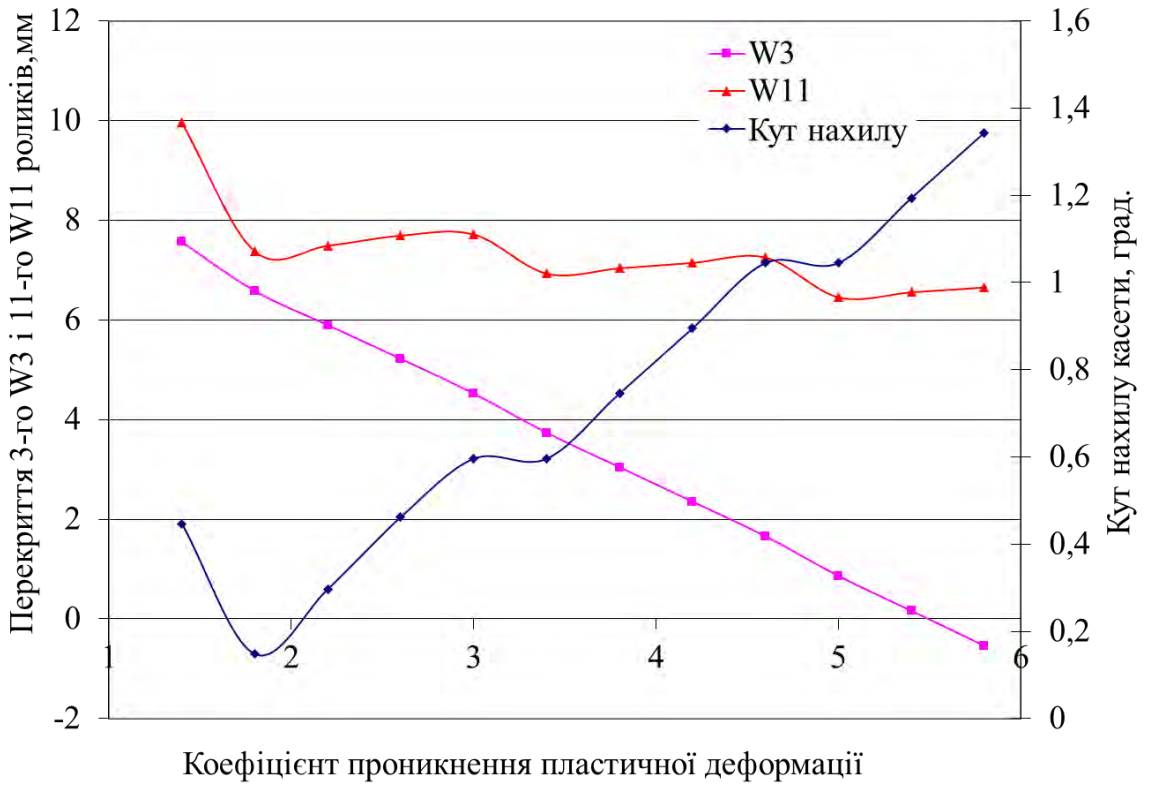


б)

Рисунок 5.4 – Залежність кута нахилу верхньої касети, положення третього W3 і одинадцятого W11 роликів від величини коефіцієнта проникнення пластичної деформації (а – при $h = 4$ мм; б – при $h = 6$ мм; в – при $h = 8$ мм; г – при $h = 10$ мм; д – при $h = 12$ мм; е – при $h = 14$ мм)

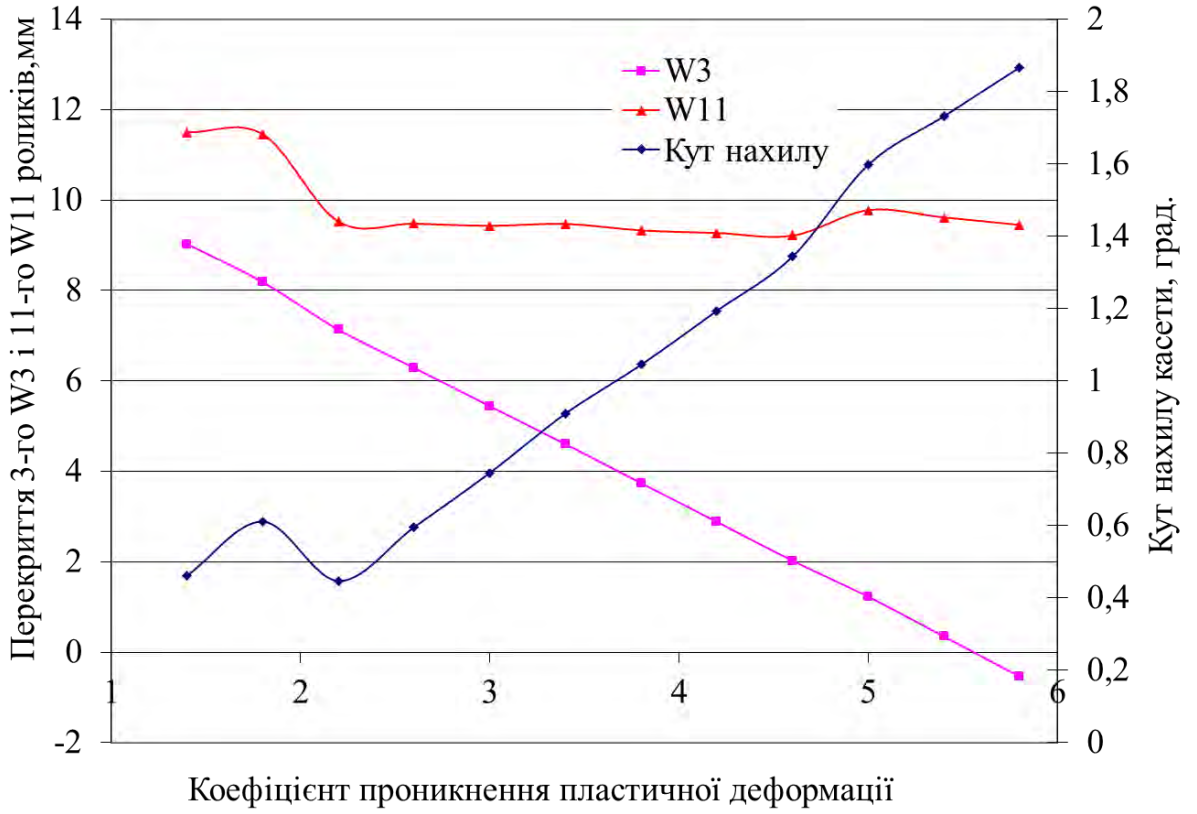


в)

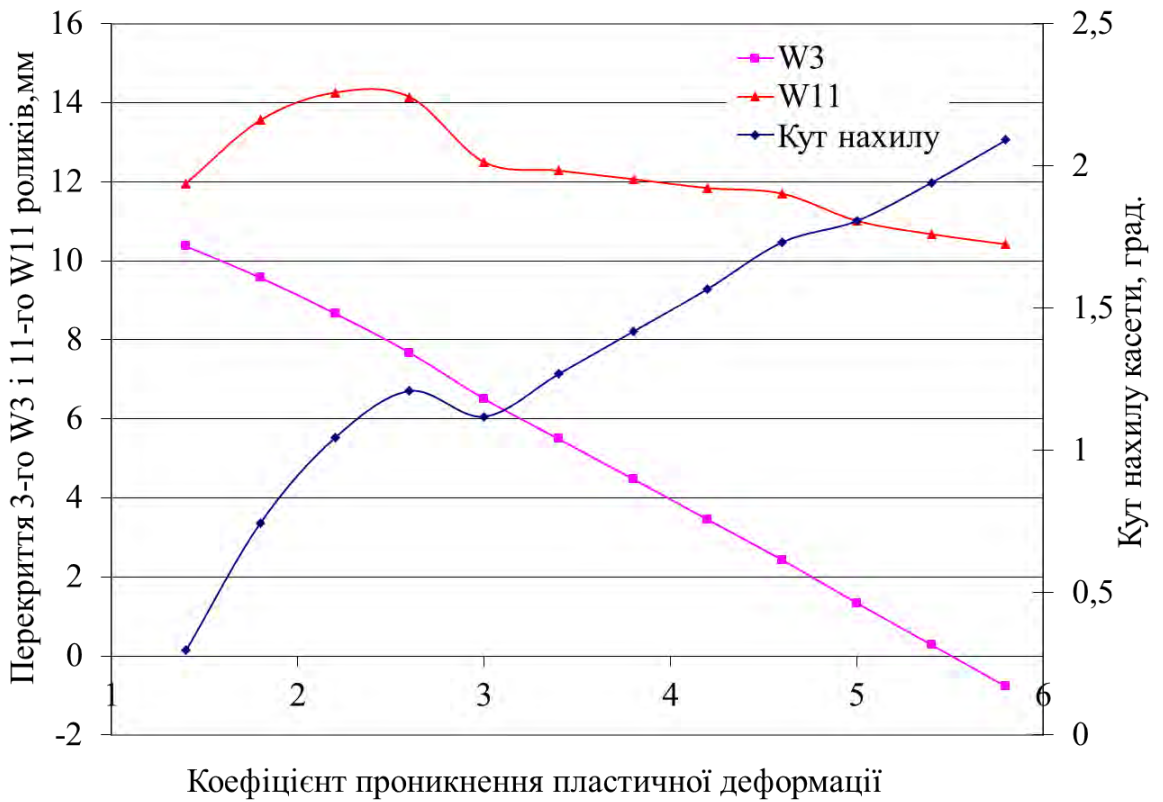


г)

Продовження рис. 5.4. Лист 2



д)



е)

Продовження рис. 5.4. Лист 3

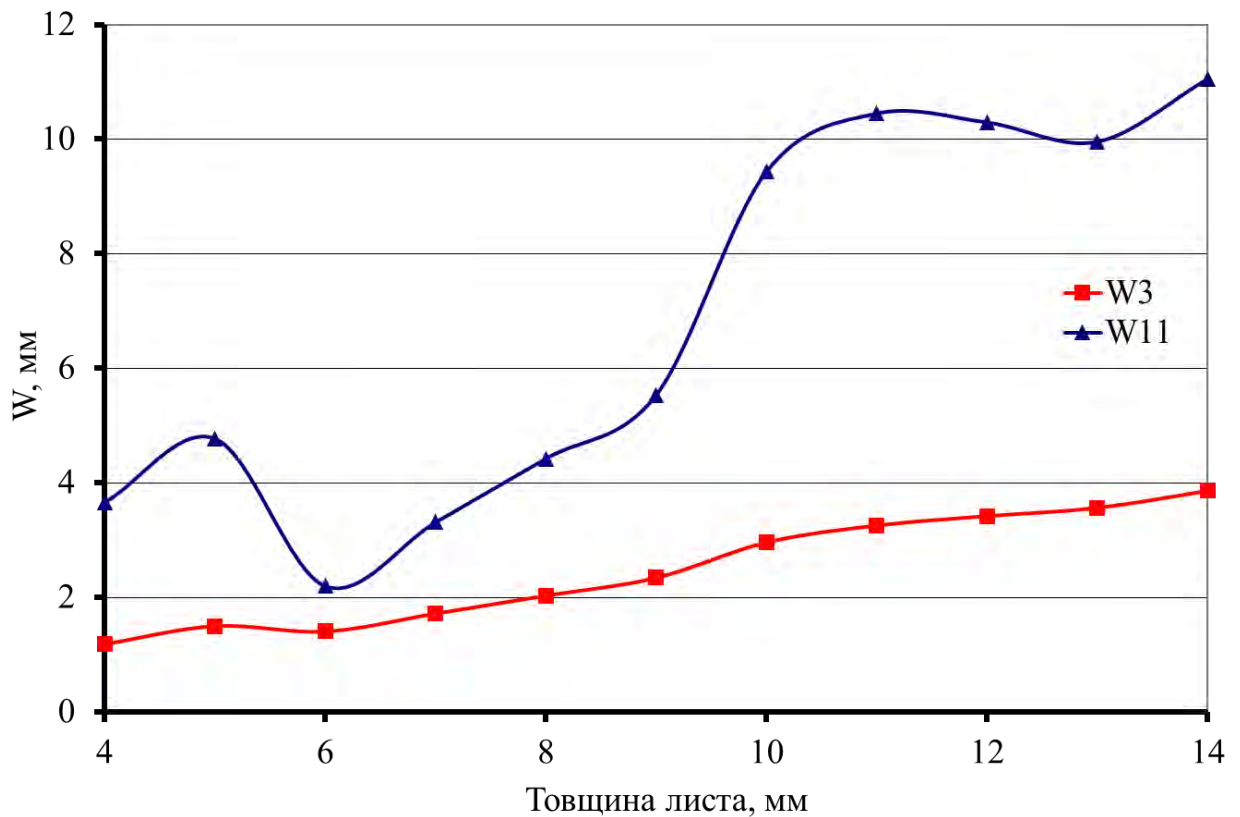


Рисунок 5.5 – Залежність положення 3-го W3 і 11-го W11 роликів від товщини прокату

адекватних параметрів технологічних процесів для заданих вихідних характеристик механічного устаткування та сортаменту металопрокату дозволяє вибрати такий набір технологічних налаштувань, при якому, з одного боку, досягається мінімальний прогин листа й, відповідно, мінімальна величина сили та моменту правки, що є актуальним для рішення задач розширення сортаменту оброблюваного металопрокату на існуючих листопробірних машинах з обмеженими технологічними можливостями, а з іншої сторони, знаходження налаштувань, що забезпечують найкращу якість готової продукції на сучасних листопробірних машинах, здатних реалізувати індивідуальне налаштування пробірних роликів, включаючи врахування показників площинності листа.

З метою зменшення витрат часу на виконання розрахунків можна рекомендувати в цьому випадку виконання проектувальних розрахунків з використанням програмної реалізації розробленої одномірної математичної моделі, а

після одержання результатів виконати уточнюючі розрахунки з використанням методу скінченних елементів у його програмній реалізації на основі прикладного пакета САЕ-системи, що дозволяє оцінити розподіл залишкових напружень у металі, що правиться, як по товщині, так і по ширині листа.

5.2 Автоматизоване проектування технологічних налаштувань листоправильної машини на основі регресійної моделі процесу правки багаторазовим знакозмінним вигином

Скінченно-елементна модель має низку переваг, але займає досить великий машинний час, що ускладнює вирішення задач оптимізаційного плану і застосування їх в автоматичній системі керування. Доцільним в цьому випадку є застосування чисельного планованого експерименту для отримання регресійної моделі. Розрахунки процесу правки листа являють собою складну дослідницьку задачу, що викликана впливом великої кількості факторів на даний процес. Для реалізації процесу моделювання необхідно вибрати значимі фактори. Ці фактори можна розділити на параметри вихідні та необхідні для налаштування машини. До вихідних факторів відносяться: ширина листа (B), його товщина (h) і початкова хвилястість в поперечному напрямку, яку найзручніше виразити в математичному сенсі через різницю довжин волокон або витяжок (λ_0). На правку вихідної хвилястості впливає величина перекриття (W) і різниця перекриттів по ширині бочки робочого ролика (ΔW). Попередні розрахунки показали, що такий параметр матеріалу, як напруження текучості, на правку хвилястості суттєво не впливає. Швидкість деформування, коефіцієнт тертя постійні та не міняються. Таким чином, виділено п'ять основних факторів, що впливають на правку крайової хвилястості (табл. 5.2).

Таблиця 5.2 – Рівні варіювання факторів

Інтервал варіювання та рівні факторів	h	W / h	ΔW	B	λ_0
Основний рівень $x_{i0}=0$	7	0,5	5	2175	1,015
Інтервал варіювання Δx_i	3	0,5	5	675	0,015
Верхній рівень $x_i= +1$	10	1,0	10	2850	1,03
Нижній рівень $x_i= -1$	4	0	0	1500	1,0
Кодове позначення	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5

У якості функції відгуку був обраний параметр λ_k , що показує кінцеву різницю витяжок з краю та посередині листа. Вплив обраних параметрів носить нелінійний характер, тому в результаті планування експерименту необхідно одержати квадратичну модель.

Застосування моделі повнофакторного експерименту приведе до невіривданого числа експериментів. У цьому випадку доцільніше застосовувати дробову модель. Для нелінійної моделі з п'ятьма факторами доцільне застосування плану Хартлі (розд. 2) [141]. Для цієї моделі рівняння регресії має такий вигляд:

$$y = b_0 + b_1 \cdot x_1 + b_2 \cdot x_2 + b_3 \cdot x_3 + b_4 \cdot x_4 + b_5 \cdot x_5 + b_{12} \cdot x_1 \cdot x_2 + b_{13} \cdot x_1 \cdot x_3 + b_{14} \cdot x_1 \cdot x_4 + b_{15} \cdot x_1 \cdot x_5 + b_{23} \cdot x_2 \cdot x_3 + b_{24} \cdot x_2 \cdot x_4 + b_{25} \cdot x_2 \cdot x_5 + b_{34} \cdot x_3 \cdot x_4 + b_{35} \cdot x_3 \cdot x_5 + b_{45} \cdot x_4 \cdot x_5 + b_{11} \cdot x_1^2 + b_{22} \cdot x_2^2 + b_{33} \cdot x_3^2 + b_{44} \cdot x_4^2 + b_{55} \cdot x_5^2.$$

Для реалізації плану Хартлі Na_5 необхідно провести 27 математичних експериментів. Розширена матриця планування експерименту представлена в табл. 5.3. План Хартлі більш економічний, ніж ортогональний і рототабельний центральний композиційний план, і рекомендується при побудові інтерполяційних моделей квадратичного полінома для об'єктів з малим рівнем шумів.

Таблиця 5.3 – Розширена матриця планування експерименту

N	Код					Y _{уг}
	x ₁	x ₂	x ₃	x ₄	x ₅	
1	+1	+1	+1	+1	+1	0,995
2	-1	-1	+1	+1	+1	1,019
3	-1	+1	-1	-1	-1	1,0
4	+1	-1	-1	-1	-1	1,0
5	-1	+1	-1	+1	+1	1,026
6	+1	-1	-1	+1	+1	1,025
7	+1	+1	+1	-1	-1	0,993
8	-1	-1	+1	-1	-1	0,997
9	-1	+1	+1	+1	-1	0,989
10	+1	-1	+1	+1	-1	0,988
11	+1	+1	-1	-1	+1	1,02
12	-1	-1	-1	-1	+1	1,028
13	-1	+1	+1	-1	+1	1,016
14	+1	-1	+1	-1	+1	1,017
15	+1	+1	-1	+1	-1	1,0
16	-1	-1	-1	+1	-1	1,0
17	0	0	0	0	0	1,008
18	+1	0	0	0	0	1,0079
19	-1	0	0	0	0	1,0094
20	0	+1	0	0	0	1,0065
21	0	-1	0	0	0	1,01
22	0	0	+1	0	0	1,0016
23	0	0	-1	0	0	1,012
24	0	0	0	+1	0	1,0066
25	0	0	0	-1	0	1,0096
26	0	0	0	0	+1	1,02
27	0	0	0	0	-1	0,997

Перехід від умовних параметрів до натуральних проводиться по наступних залежностях:

$$x_1 = \frac{h-7}{3}; x_2 = \frac{W/h-0,5}{0,5}; x_3 = \frac{\Delta W-5}{5}; x_4 = \frac{B-2175}{675}, x_5 = \frac{\lambda_0-1,015}{0,015}.$$

У результаті обробки розрахункових даних отримані коефіцієнти рівняння регресії. У табл. 5.4 наведені коефіцієнти для рівняння регресії, що описує залежність параметра λ_k від факторів варіювання.

Таблиця 5.4 – Коефіцієнти рівняння регресії

b_0	b_1	b_2	b_3	b_4	b_5
1,009	$-1,852 \cdot 10^{-3}$	$-1,852 \cdot 10^{-3}$	$-4,59 \cdot 10^{-3}$	$-1,54 \cdot 10^{-3}$	$9,718 \cdot 10^{-3}$
b_{12}	b_{13}	b_{14}	b_{15}	b_{23}	b_{24}
$-5,625 \cdot 10^{-4}$	$-1,187 \cdot 10^{-3}$	$-9,375 \cdot 10^{-4}$	$-1,687 \cdot 10^{-3}$	$-1,312 \cdot 10^{-3}$	$-5,625 \cdot 10^{-4}$
b_{25}	b_{34}	b_{35}	b_{45}	b_{11}	b_{22}
$-1,812 \cdot 10^{-3}$	$-2,188 \cdot 10^{-3}$	$-1,188 \cdot 10^{-3}$	$-1,875 \cdot 10^{-4}$	$-2,96 \cdot 10^{-4}$	$-3,538 \cdot 10^{-4}$
b_{33}	b_{44}	b_{55}			
$-5,632 \cdot 10^{-4}$	$-3,754 \cdot 10^{-4}$	$-3,177 \cdot 10^{-4}$			

Коефіцієнти регресії визначалися по наступних формулах [141]:

$$b_i = O_2 \cdot \sum_{k=1}^N (x_{k,i} \cdot y_k), \quad b_{i,j} = O_4 \cdot \sum_{k=1}^N (x_{k,i} \cdot x_{k,j} \cdot y_k);$$

$$b_{i,i} = O_3 \cdot \sum_{k=1}^N \left\{ \left[(x_{k,i})^2 - \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N (x_{k,i})^2 \right] \cdot y_k \right\};$$

$$b_0 = O_1 \cdot \sum_{k=1}^N y_k - \frac{O_1}{O_2} \sum_{k=1}^m b_{k,k} \cdot \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N (x_{k,i})^2,$$

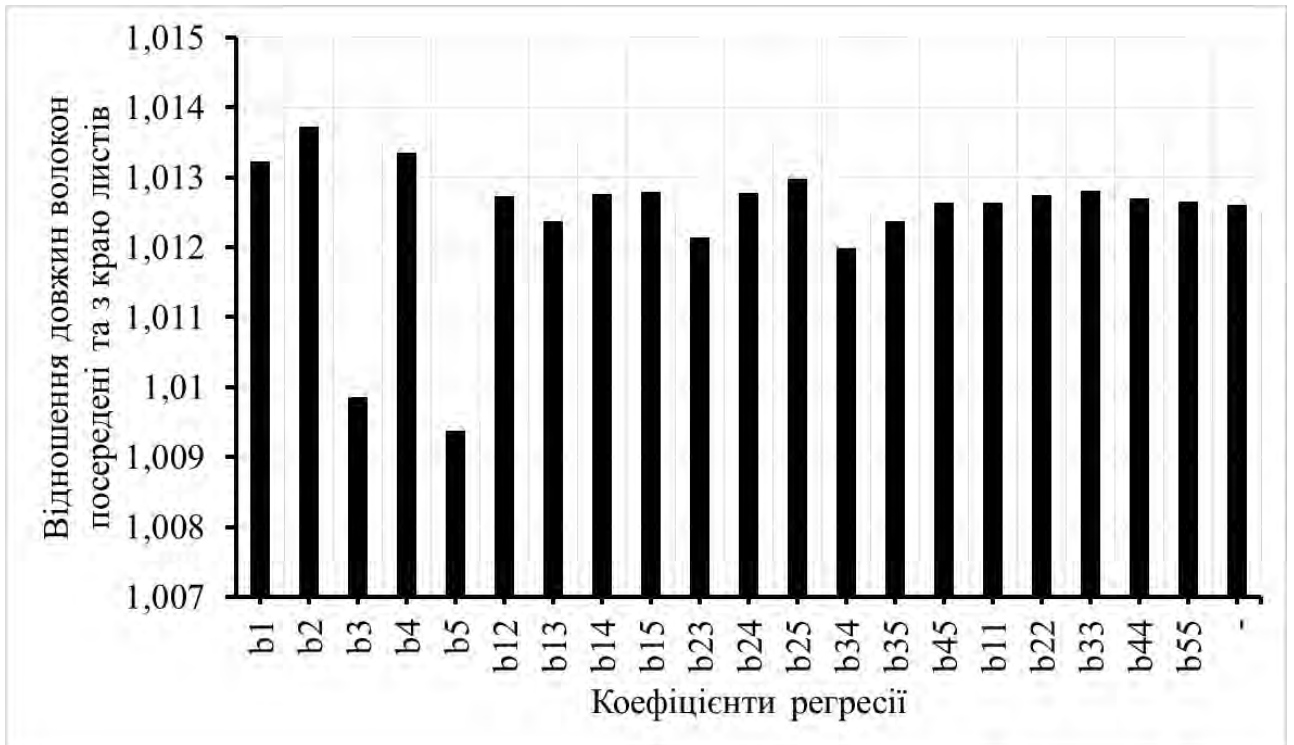
де N – кількість експериментів;

m – кількість факторів, $O_1=0,03704$, $O_2=0,04811$, $O_3=0,07220$, $O_4=0,0625$.

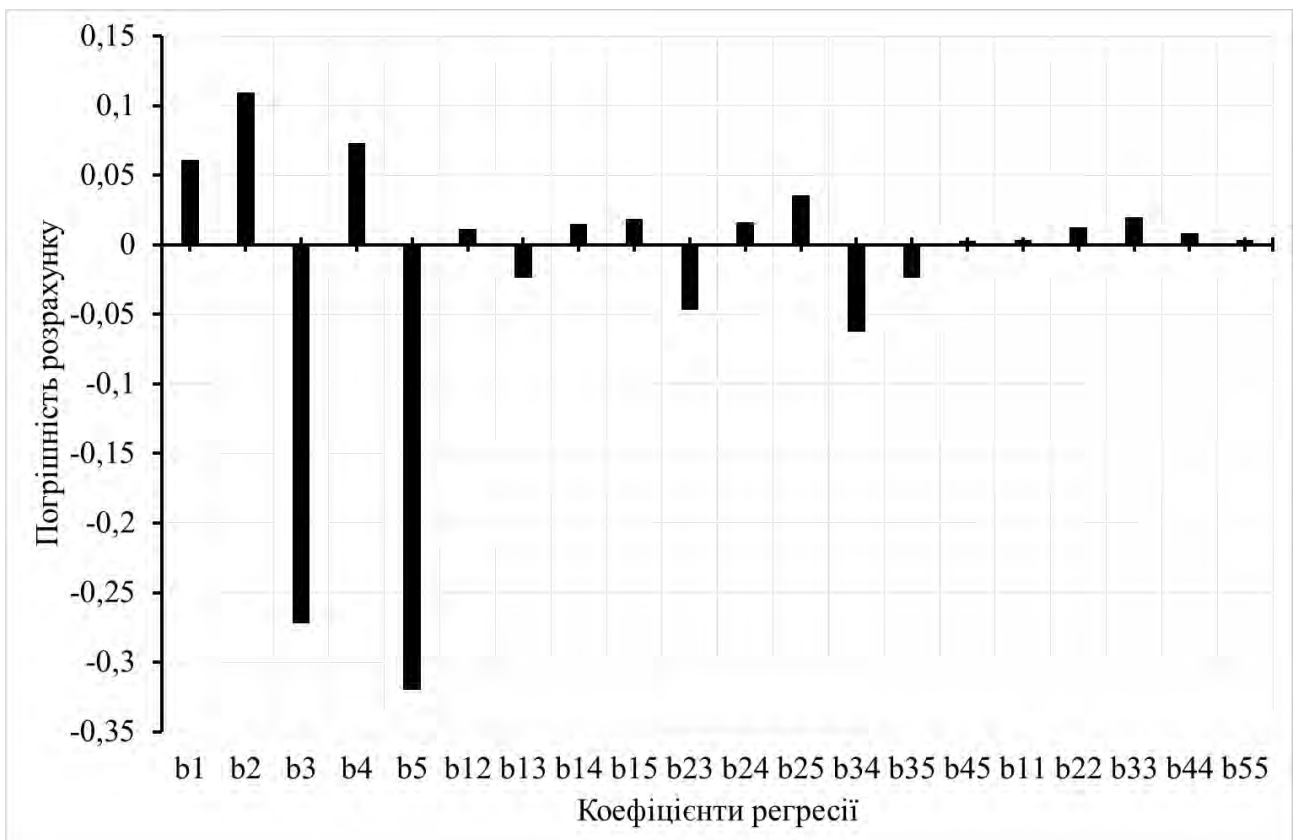
Визначення коефіцієнтів регресійного рівняння здійснювали по розробленій у середовищі РТС Mathcad математичній моделі, представленої в додатках Е...Ж.

Аналіз коефіцієнтів рівняння регресії показує, що на зниження кінцевої різниці витяжок (правки крайової хвилястості) переважно впливає різниця перекриттів. Товщина листа та відносне перекриття на правку листа впливають рівною вагомою мірою. Зокрема аналіз вагомості коефіцієнтів показав, що вплив коефіцієнтів b_{45} , b_{11} , b_{55} незначний і ними можна знехтувати (рис. 5.6).

По отриманій регресійній моделі побудовані графіки залежності різниці витяжок краю та середини листа ($\lambda_k = L_k/L_c$) від геометричних параметрів вихідної заготовки та параметрів процесу правки (рис. 5.7). Встановлено, що істотно на правку листа впливає різниця прогинів ролика, яким здійснюється безпосередньо правка. Зі збільшенням різниці перекриття ΔW , перекриття W , товщини листа h і його ширини b , кінцева різниця довжин волокон посередині і крайкам листа зменшується практично лінійно. Встановлено, що в процесі правки листа шириною 2800 мм, товщиною 4 мм, з вихідною різницею витяжок $\lambda_0 = 1,015$ зі збільшенням прогину ролика ΔW від 0 до 8 мм, різниця витяжок зменшується з 1,014 до 1,008 при перекритті $W=0$ мм і з 1,013 до 1,003 при $W=4$ мм. Також встановлено, що зі збільшенням прогину ролика інтенсивність правки зі збільшенням перекриття також зростає. Так, наприклад, у процесі правки роликком з $\Delta W=0$ мм при збільшенні перекриття різниця витяжок зміниться не суттєво (з 1,014 до 1,013), а у випадку $\Delta W=8$ мм λ_k зменшується від 1,008 до 1,003.



а)



б)

Рисунок 5.6 – Результати визначення вагомості коефіцієнтів регресії в абсолютних (а) та відносних (б) значеннях

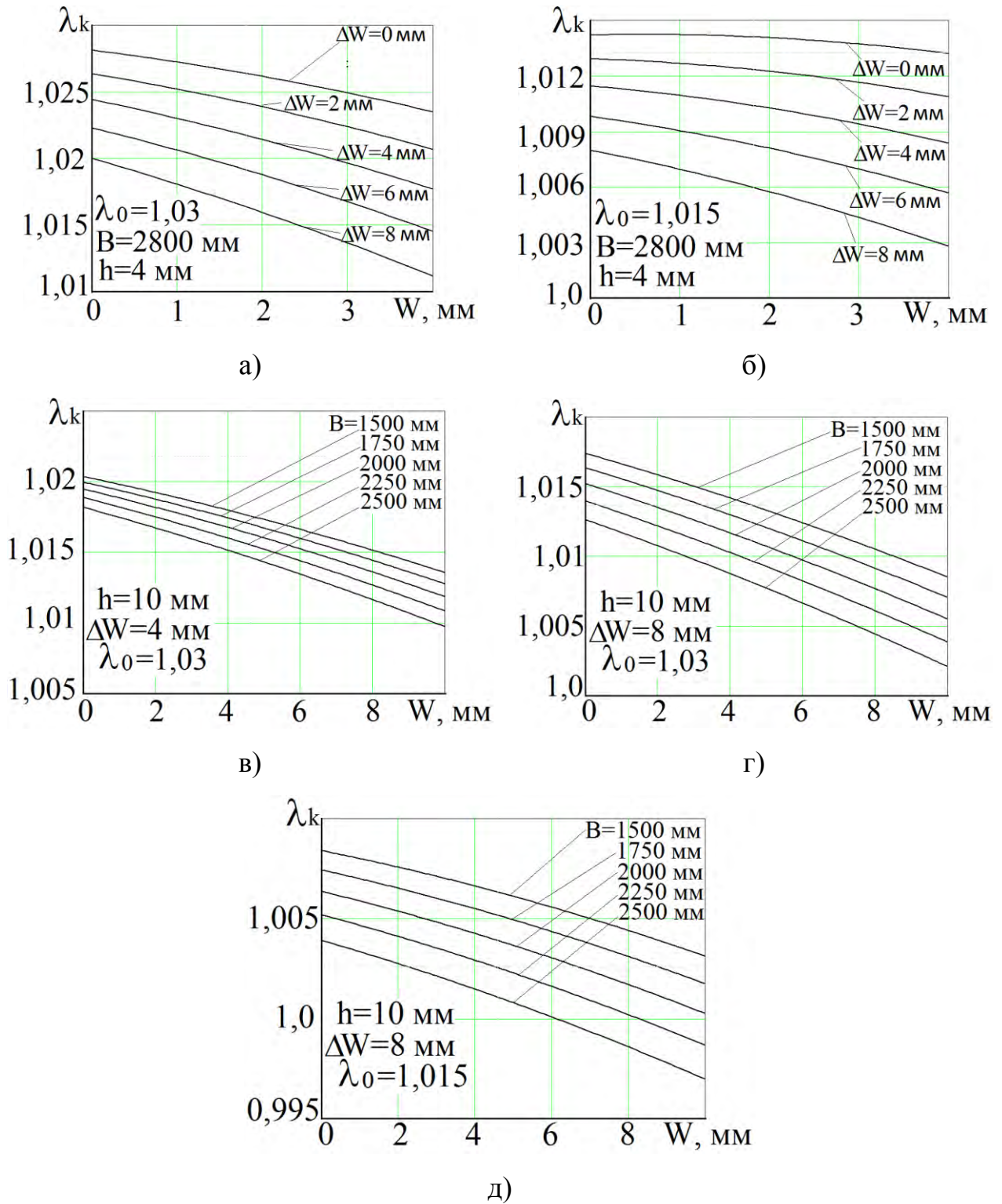


Рисунок 5.7 – Графіки залежності різниці витяжок посередині та краю листа від параметрів правки та параметрів вихідної заготовки: величини згину робочого ролика (а, б); ширини листа (в...г) при різних товщинах листа і вихідній хвилястості в поперечному напрямку

Вихідна різниця витяжок також впливає на правку листа. Зі збільшенням вихідної різниці витяжок зростає і різниця витяжок після правки при тих самих умовах процесу. Так якщо правити лист шириною 2800 мм, товщиною 4 мм, роликком з $\Delta W = 8$ мм і $\lambda_0 = 1,015$, то при перекритті $W = 0$ мм різниця витяжок буде рівною 1,008. Якщо ж $\lambda_0 = 1,03$, то за тих самих умов кінцева різниця витяжок буде рівною 1,02.

Вихідна різниця витяжок також інтенсифікує процес правки листа. Зі збільшенням вихідної різниці витяжок листа збільшується інтенсивність зменшення λ_k при збільшенні перекриття валків.

На одержувану різницю витяжок значно впливає ширина листа, що зазнає правки. Зі збільшенням ширини листа при правці в машині з постійною довжиною роликів і постійним прогином ролика збільшується різниця перекриттів і по центру, і по краю листа, що неминуче веде до зменшення різниці витяжок краю та центру листа після правки. Це підтверджується отриманими графічними залежностями.

Видно, що при виправленні листа товщиною 10 мм роликком з прогином 8 мм і вихідною різницею витяжок $\lambda_0 = 1,015$ зі збільшенням ширини листа від 1500 до 2500 мм при $W = 0$ мм різниця витяжок зменшується від 1,008 до 1,004, що відповідає зменшенню висоти хвилі на 29,4% (при 4 хвилях на 1 м довжини листа). У випадку правки заготовки з $\lambda_0 = 1,03$ за тих самих умов різниця витяжок зменшується від 1,018 до 1,013, що відповідає зменшенню висоти хвилі на 15,1%.

На рис. 5.8...5.12 наведені поля розподілів осьового компонента деформацій, середніх напружень і інтенсивності напружень по поверхні заготовки в процесі правки листів при різних параметрах процесу.

З рис. 5.8 видно, що при виправленні листа товщиною 10 мм величина деформації більше, ніж в листі товщиною 4 мм. Це пояснюється більшим ходом ролика в процесі правки. Аналіз поля розподілу деформацій

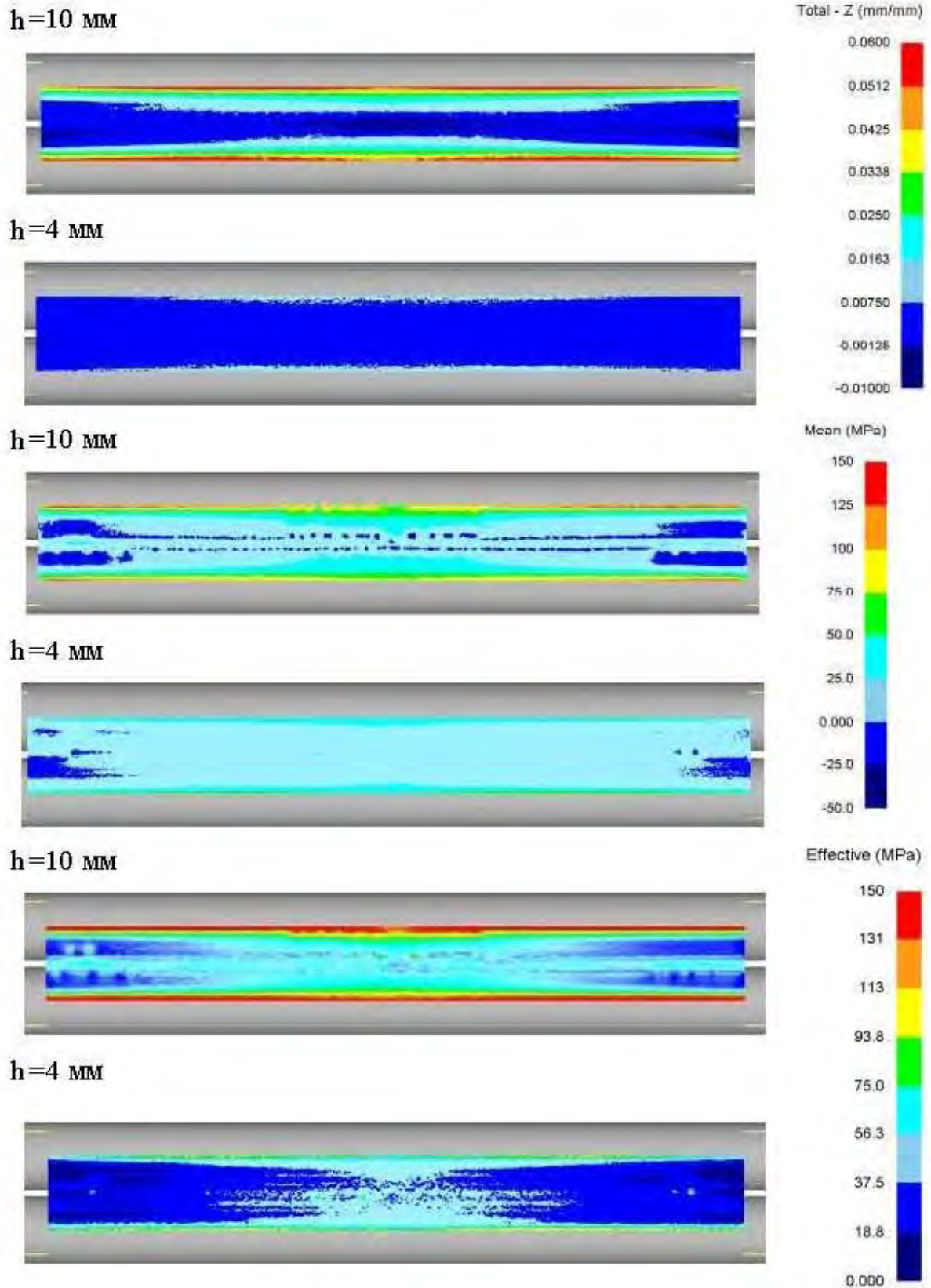


Рисунок 5.8 – Поля розподілу компонентів деформацій, середніх напружень та інтенсивності напружень на поверхні заготовки в процесі правки ($W/h=0,5$, $\Delta W=5$ мм, $B=2175$ мм, $\lambda_0=1,015$), вид зверху

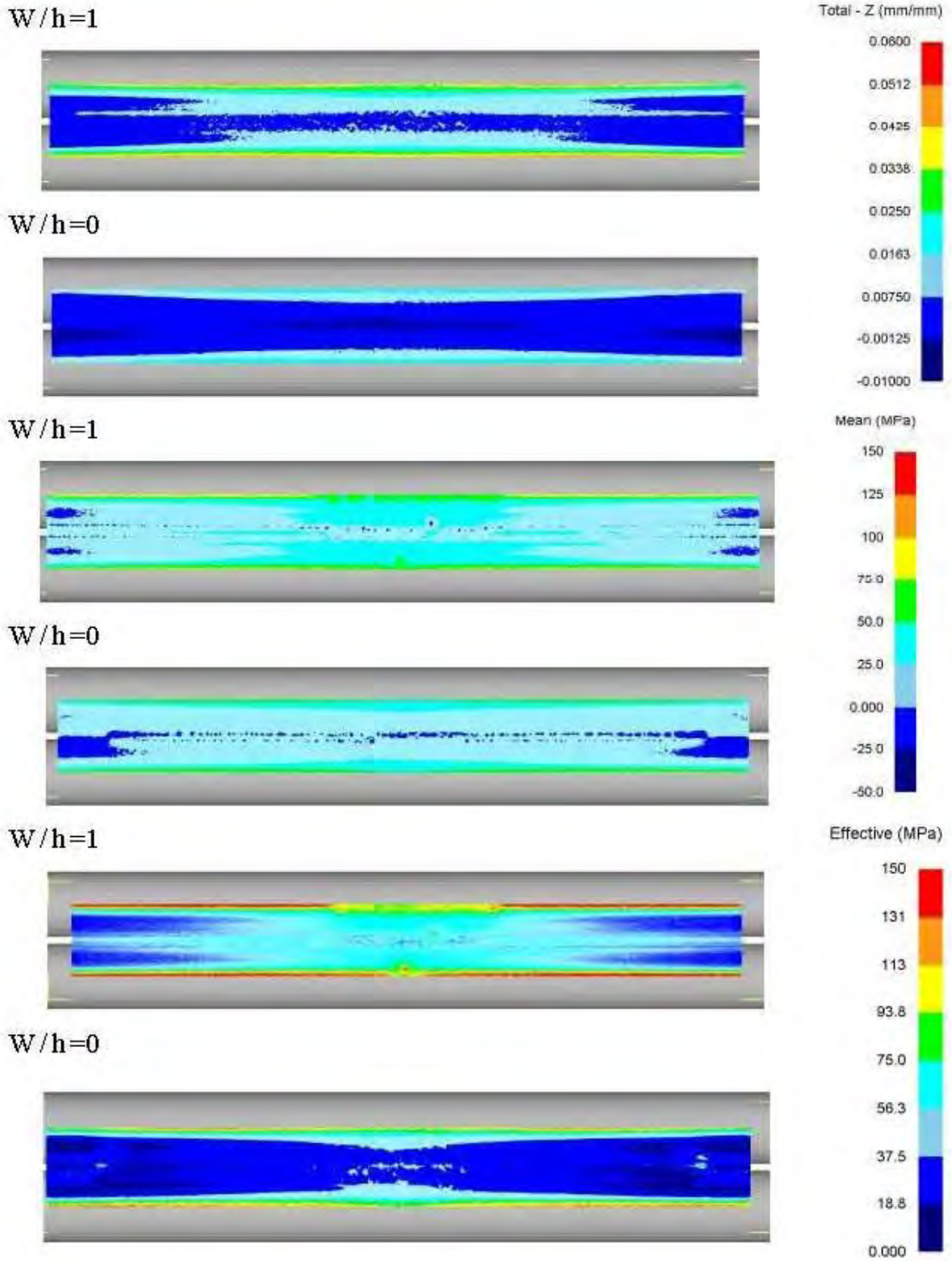


Рисунок 5.9 – Поля розподілу компонентів деформацій, середніх напружень та інтенсивності напружень на поверхні заготовки в процесі правки ($h=7$ мм, $\Delta W=5$ мм, $B=2175$ мм, $\lambda_0=1,015$), вид зверху

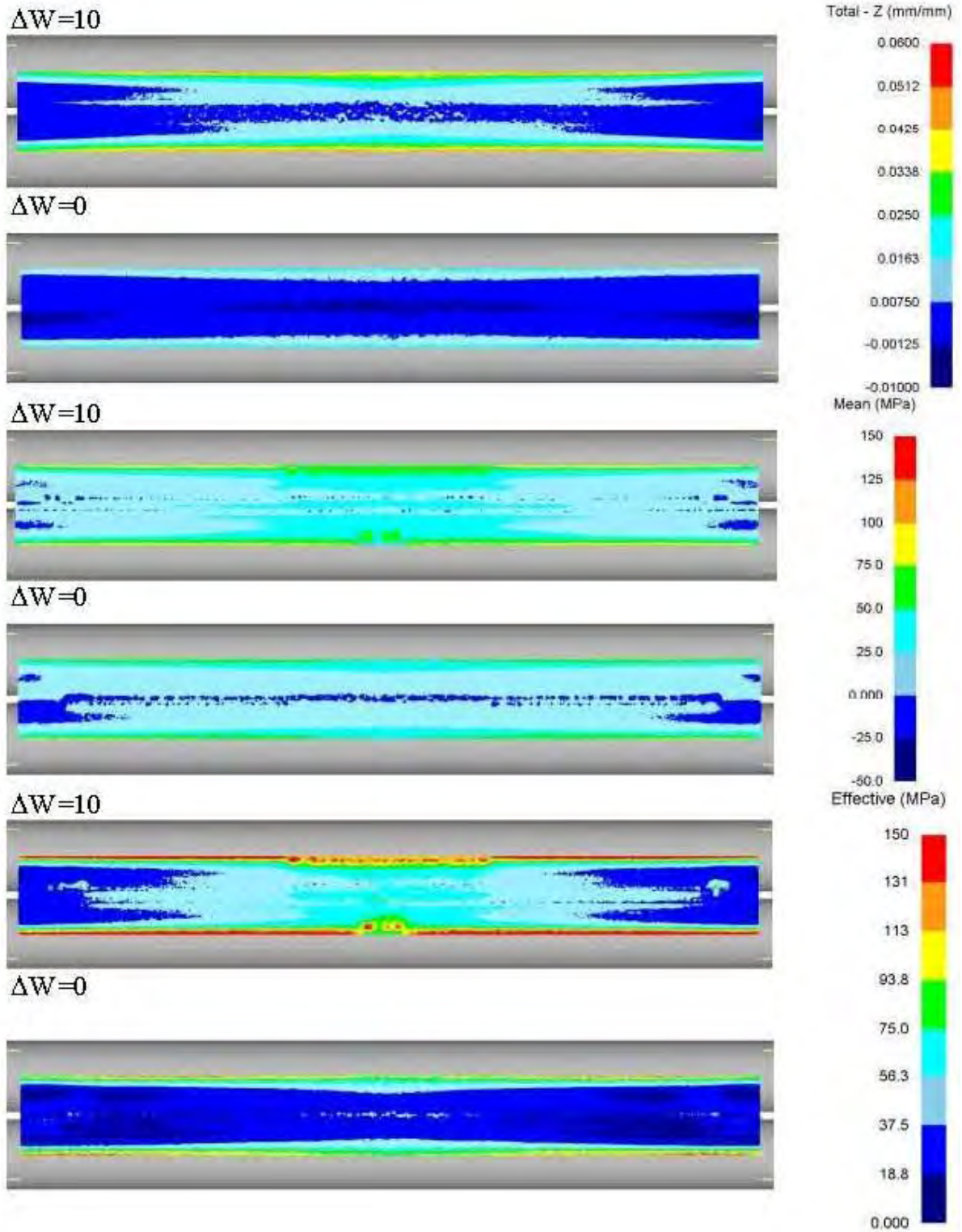


Рисунок 5.10 – Поля розподілу компонентів деформацій, середніх напружень та інтенсивності напружень на поверхні заготовки в процесі правки ($h = 7$ мм, $W / h = 0,5$, $B = 2175$ мм, $\lambda_0 = 1,015$), вид зверху

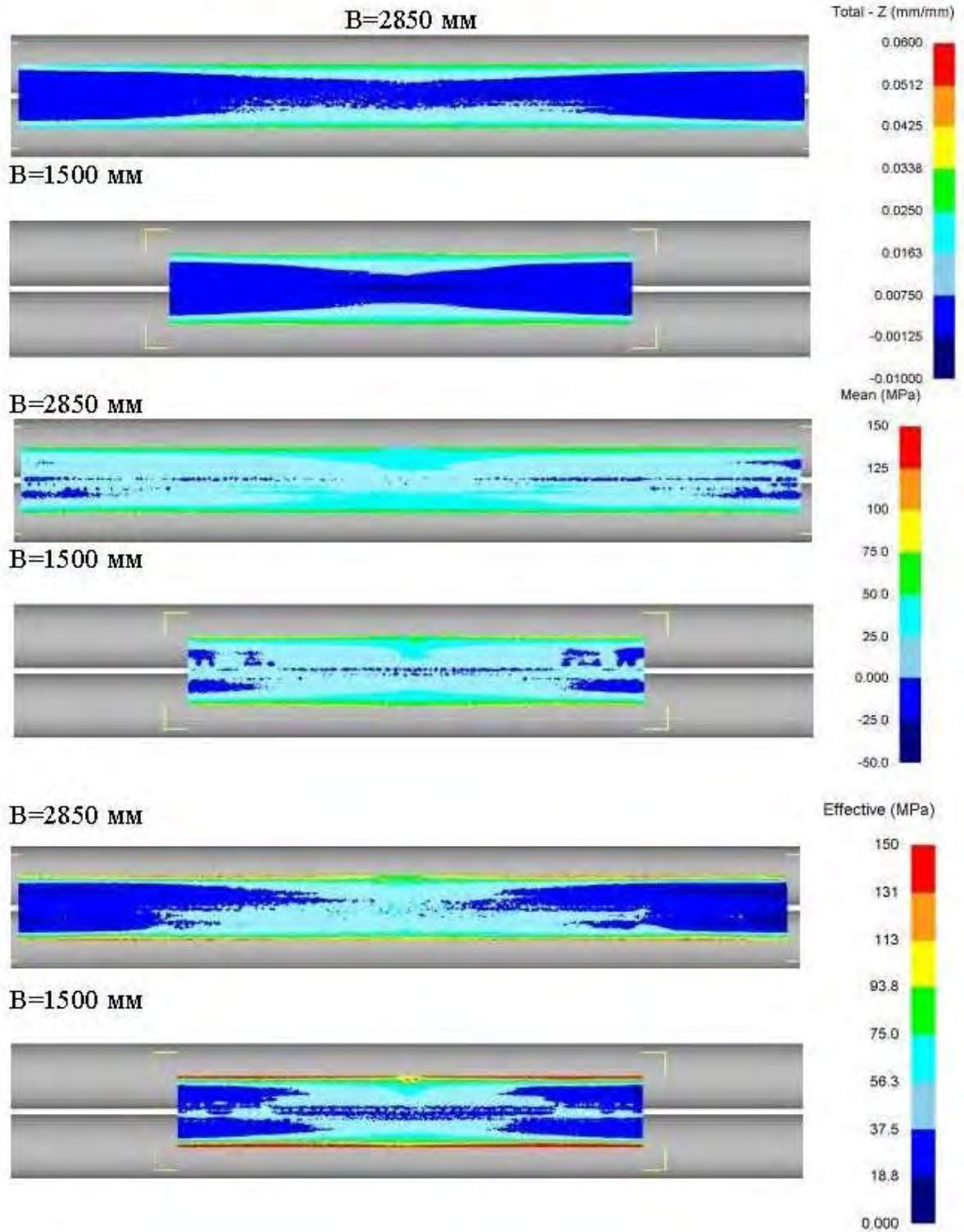


Рисунок 5.11 – Поля розподілу компонентів деформацій, середніх напружень та інтенсивності напружень на поверхні заготовки в процесі правки ($h=7$ мм, $W/h=0,5$, $\Delta W=5$ мм, $\lambda_0=1,015$), вид зверху

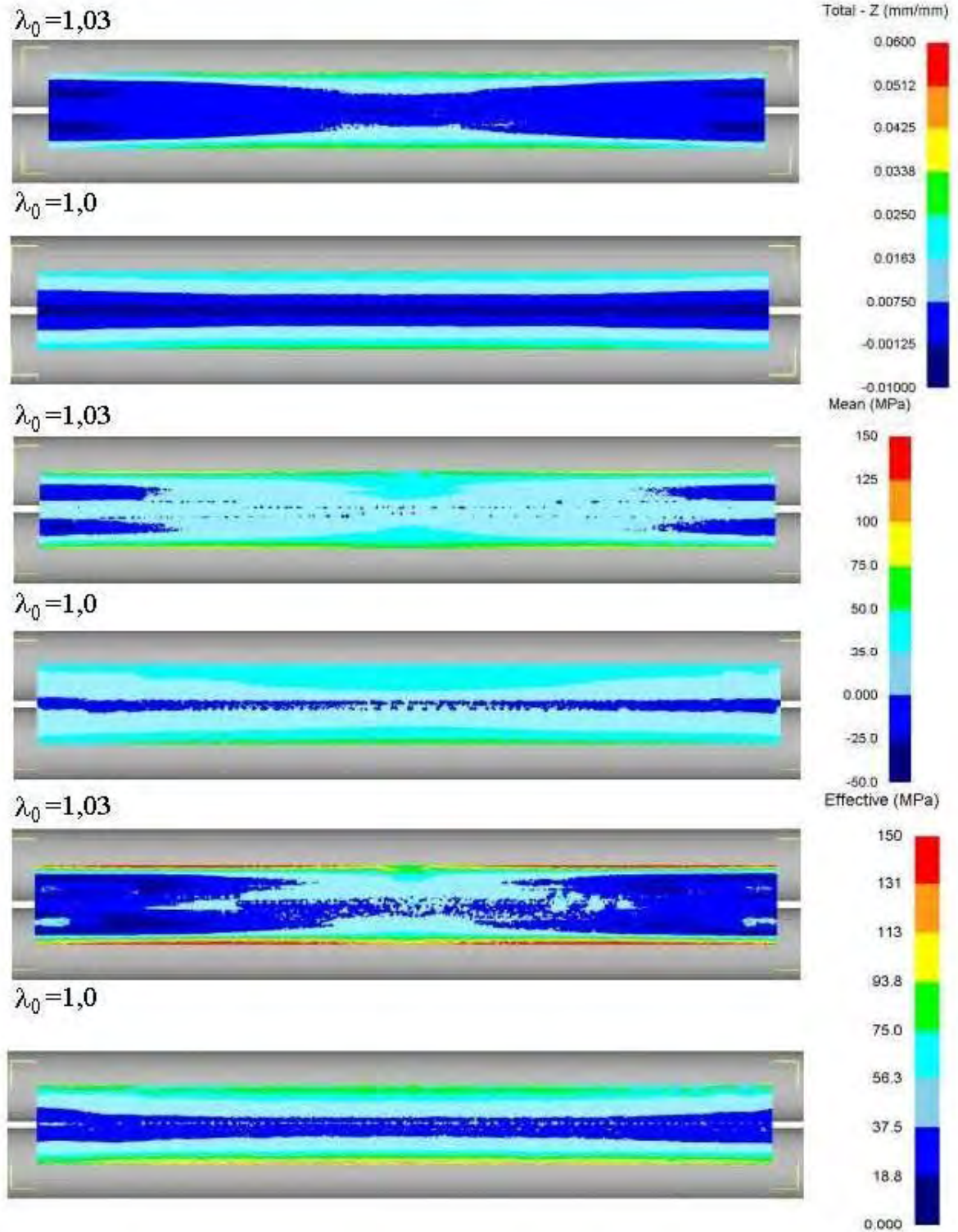


Рисунок 5.12 – Поля розподілу компонентів деформацій, середніх напружень та інтенсивності напружень на поверхні заготовки в процесі правки ($h=7$ мм, $W/h=0,5$, $\Delta W=5$ мм, $B=2175$ мм), вид зверху

дозволяє зробити висновок про те, що волокна металу, розташовані в середній частині листа, деформуються інтенсивніше, ніж волокна металу по краю листа. Це видно по градієнту розподілу деформацій в середній частині листа та по краю.

Інтенсивність напружень, що виникають в заготовці, також вище при виправленні більш товстого листа.

Результати, приведені на рис. 5.9, дозволяють зробити висновок, що відносне перекриття роликів значно впливає на напружено-деформований стан заготовки. Отже при $W/h=1$ більш інтенсивно розтягуються волокна середньої частини листа, ніж при $W/h=0$, про що свідчать значні величини деформацій в заготовці.

На рис. 5.10 показано, що зі збільшенням різниці перекриттів картина розподілу деформацій в заготовці істотно змінюється, більш інтенсивно починають деформуватися волокна середньої частини листа. До такого ж ефекту призводить й збільшення ширини листа (див. рис. 5.11).

На рис. 5.13, 5.14 представлені результати розрахунку площинності стосовно процесу правки листів товщиною від 4 до 14 мм при фіксованому перекритті роликів на величину 3,5 мм, тобто при різних відношеннях W/h (від 0,875 до 0,214) та однаковою амплітудою вихідної хвилястості, рівною $A = 60$ мм / м. З аналізу даних залежностей можна зробити висновок зменшення хвилястості листа можна досягти як збільшенням перекриттів роликів, так і величиною їх згину. При цьому розрахунки показують, що при даній хвилястості одноразовим вигином роликів досягти необхідну хвилястість крайок ($A < 8$ мм / м) не є можливим. Найбільш значущим фактором при цьому є зменшення параметра W/h до рівня 0,25, який досягається, як правило, третім роликом та обмежується нормованим коефіцієнтом проникнення пластичної деформації. При цьому, як показують розрахунки, необхідного рівня площинності ($\Phi = 0,1 \dots 1,0$ мон) можна досягти вигином робочих роликів до величини 1,5...2,0 мм.

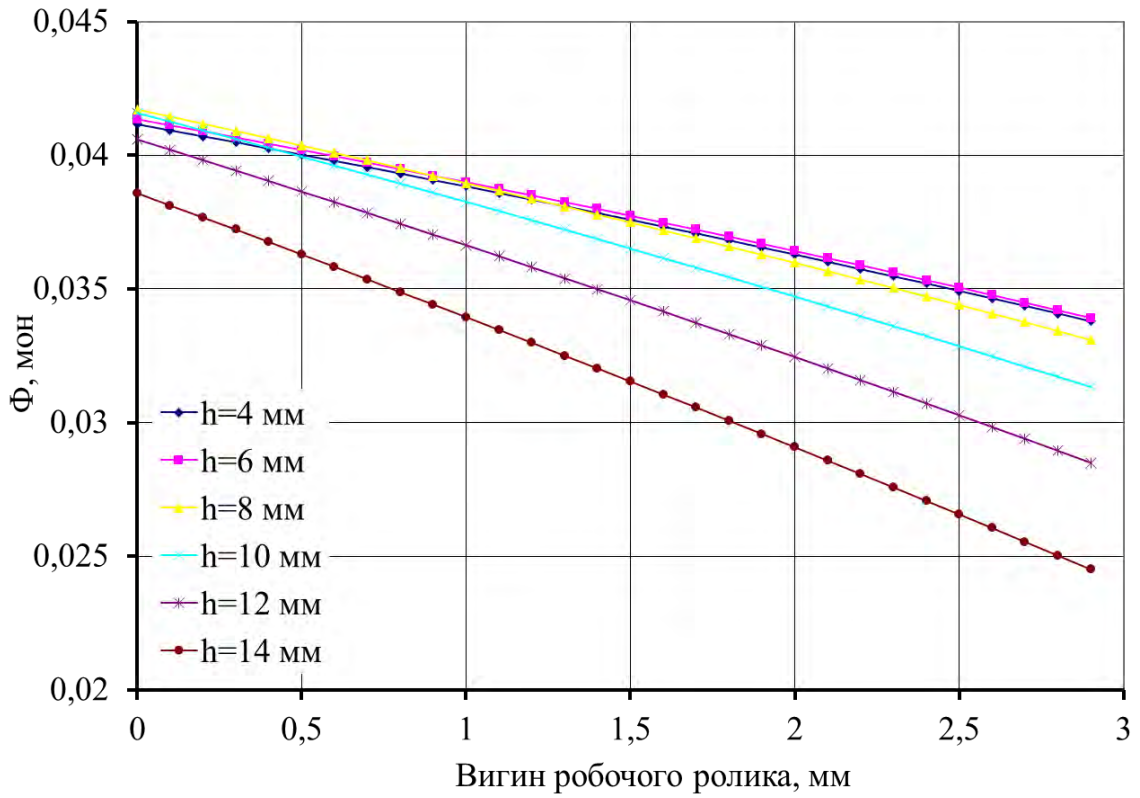


Рисунок 5.13 – Залежність показника площинності листа від вигину робочих роликів

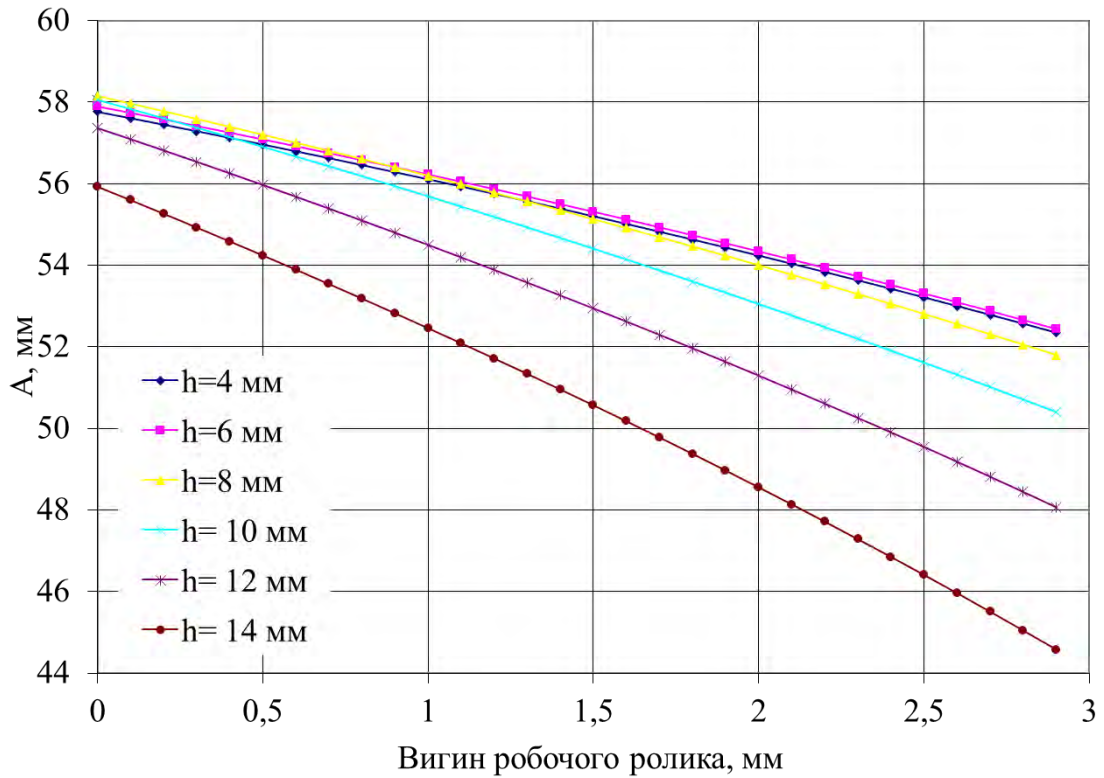


Рисунок 5.14 – Залежність амплітуди крайової хвилястості листа від вигину робочих роликів

5.3 Автоматизоване проектування налаштування вигинів робочих роликів

Відмінною особливістю листопривальної машини з диференційованим додатком сили правки по ширині листа є усунення нерівномірної по ширині хвилястості прокату, що досягається шляхом вигину робочих роликів силами правки на величину, яка визначається положенням опорних роликів. Визначення цих положень і є задачею автоматизованого проектування технологічних налаштувань машини при правці [163].

Знаходження оптимального положення опорних, або вигину по краях бочки робочих роликів здійснювалося за наступним укрупненим алгоритмом:

1 знаходження налаштування робочих роликів, які забезпечують виправлення поздовжньої кривизни прокату (підрозд. 5.1);

2 визначення максимально можливого вигину робочих роликів з умови міцності [30];

3 коригування максимально можливого вигину робочих роликів з умови забезпечення їх контакту з опорними під дією сили правки;

4 почергове, починаючи з 3-го ролика, збільшення з заданим кроком вигину ролика dW від нульового значення до максимально можливого;

5 визначення на основі регресійних залежностей (підрозд. 5.2) показників площинності прокату;

6. порівняння показників площинності прокату з необхідними. При невиконанні вимог виконуються дії з пункту 4. У разі досягнення вигинами роликів максимально можливих величин зменшується коефіцієнт проникнення пластичної деформації та повторюється алгоритм ще раз з пункту 1.

Даний алгоритм був покладений в основу програмних засобів з автоматизованого розрахунку технологічних налаштувань правильної машини, розглянутих в підрозділі 5.1 та представлених в додатку А. Як приклад,

в додатку Ж представлена роздруківка та інтерфейс підпрограми для розрахунку показника форми та амплітуди хвилястості листа.

Як приклад реалізації розроблених програмних засобів на рис. 5.16...5.18 представлені розрахункові розподіли показників форми листа по роликах правильної машини в залежності від положення та вигину робочих роликів.

На рис. 5.16 представлені розподіли при налаштуваннях та вигинах роликів на рівні максимально можливих, при цьому рівень підсумкової площинності та амплітуди хвилястості задовольнив вимогам за якістю листів.

На рис. 5.17 представлені розподіли при вигинах роликів на одному рівні, що визначаються умовою міцності роликів (3 мм), при цьому рівень

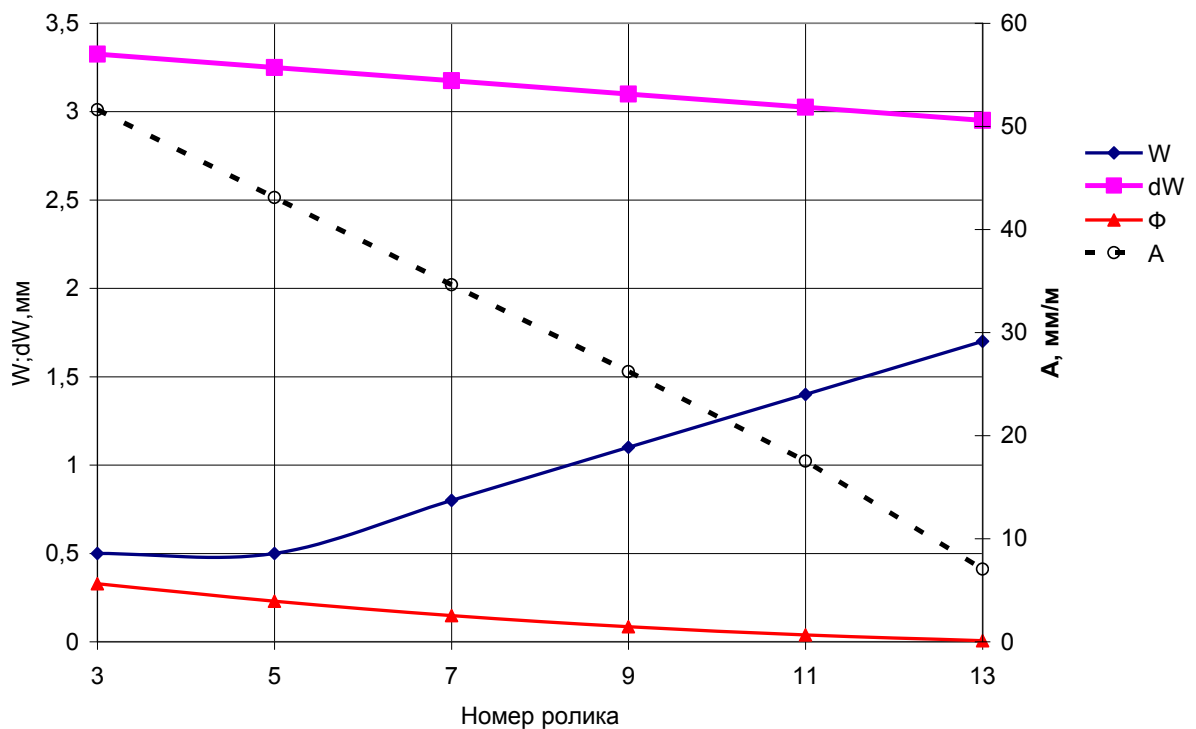


Рисунок 5.16 – Розподіл показника форми листа Φ , амплітуди хвилястості A в залежності від положення W та вигину ΔW робочих роликів при максимально можливих налаштуваннях ($h=5$ мм, $b=2000$ мм)

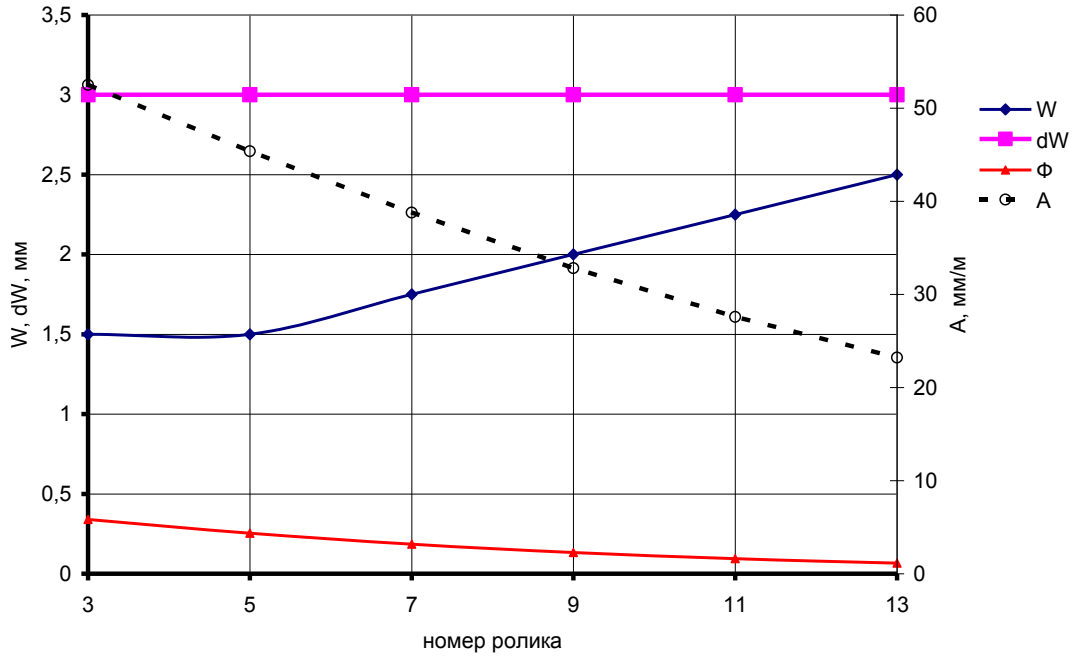


Рисунок 5.17 – Розподіл показника форми листа Φ , амплітуди хвилястості A в залежності від положення W при $\Delta W=3$ мм
($h=5$ мм, $b=2000$ мм)

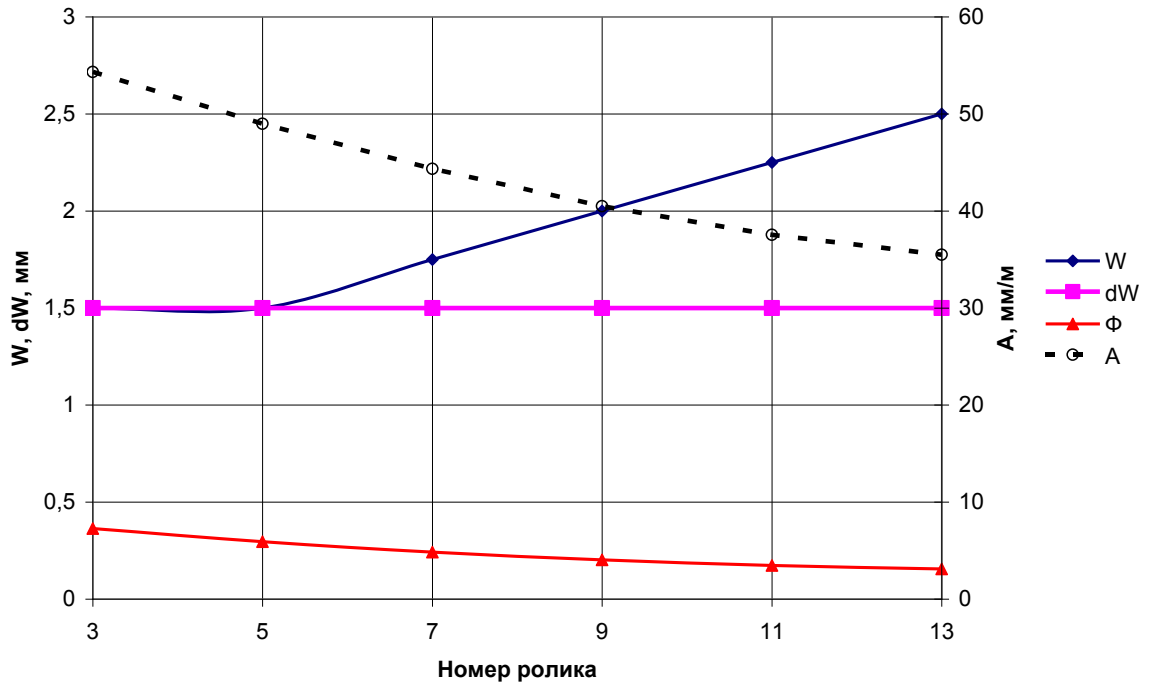


Рисунок 5.18 – Розподіл показника форми листа Φ , амплітуди хвилястості A в залежності від положення W при $\Delta W=1,5$ мм ($h=5$ мм, $b=2000$ мм)

підсумкової площинності задовольнив вимогам за якістю листів, а рівень амплітуд хвилястості був завищений.

На рис. 5.18 представлені розподіли при вигинах роликів на одному рівні, що визначаються умовою забезпечення контакту роликів відповідно мінімальній силі правки ($\Delta W=1,5$ мм), при цьому підсумкова площинність задовольнила вимогам за якістю листів ($\Phi < 1$ мон), а рівень амплітуд хвилястості був неприпустимо завищений.

Аналіз залежностей показників площинності від положення та величини згину робочих роликів дозволяє зробити висновок щодо їх нелінійного характеру і робить необхідним вирішення задач оптимізаційного плану по знаходженню як положення роликів у вертикальній площині, що буде визначати силові характеристики процесу, так і їх вигину, що визначить величину хвилястості листів по ширині.

5.4. Автоматизоване проектування технологічних режимів та удосконалення конструктивних параметрів обладнання багатороликової листопривальної машини товстолистового стану 2850

Для забезпечення високої якості гарячекатаних листів, що піддаються правці вигином, розроблений алгоритм автоматизованого проектування технологічного налаштування роликів листопривальної машини був реалізований в якості програмного продукту на мові програмування Visual Basic v.6.0 та інтегрований в систему автоматизованого управління листопривальної машини правки гарячекатаних листів товстолистового стану 2850 конструкції Новокраматорського машинобудівного заводу (додаток К).

Конструкція даної листопривальної машини (ЛПМ), в порівнянні з аналогом – розглянутою раніше (див. підрозд. 1.2) ЛПМ стану 2300/1700 (рис. 1.13, а, б), представлена на рисунку 5.19.

Відповідно до свого основного технологічного призначення, товстолистовий стан 2850 випускає товсті листи товщиною від 6 до 120 мм з вуглецевих, низьколегованих та легуваних марок сталей. Аналіз енергосилових параметрів процесу правки гарячекатаних листів необхідного сортаменту, виконаний на основі результатів чисельної реалізації отриманих математичних моделей (див. підрозділи 3.2 та 3.3) показав, що найбільша сила правки становить 25 МН, а максимальна сумарна потужність правки не перевищує 700 кВт. Виходячи з цих вихідних передумов і було здійснено проектування механічного, гідравлічного та електричного обладнання листопрямуючої машини даного стану.

Машина має 9 робочих правильних роликів діаметром 360 мм, розташованих з кроком 380 мм. Залежно від товщини листів, що піддаються правці, може бути реалізовано дві схеми налаштувань, а саме, дев'ятироликівна схема – для правки листів товщиною до 25 мм і п'ятироликівна – для правки листів товщиною понад 25 мм. Завдяки наявності механізму горизонтального зсуву нижньої касети в напрямку проходження металу, а також наявності механізмів індивідуального налаштування вертикальних положень правильних роликів, створена можливість мобільного переналагодження машини з дев'ятироликівної схеми правки на п'ятироликівну, що дозволяє збільшити радіус вигину листів і тим самим розширити діапазон товщини металопрокату, що виправляється на машині, а також створити ефективні технологічні параметри вигину, що, в свою чергу, підвищує якість одержуваної готової металопродукції.

На основі розробленої чисельної одномірної математичної моделі (див. підрозділ 3.2) був проведений аналіз можливих режимів правки листів з матеріалів з різними характеристиками міцності. Отримані силові параметри процесу правки за допомогою аналізу твердотільних моделей в САЕ-системі SolidWorks Simulation дозволили визначити найбільш навантажені елементи конструкції при різних поєднаннях вихідних параметрів. В подальшому за допомогою програмного пакета Abaqus CAE (див. під-

розділ 3.3) результати проектування були уточнені з урахуванням вибору основних конструктивних параметрів обладнання, матеріалів деталей заготовок, коефіцієнтів запасів міцності та інших заявлених вимог.

Багатороликова листопрямуюча машина розглянутої конструкції (див. рис. 5.19, б) розташована в лінії товстолистового стану 2850 за установкою охолодження розкатів. Загальні види даної машини представлені на рисунку 5.20, а її технічна характеристика представлена в таблиці 5.5.

Конструкція листопрямуючої машини включає в себе: вузол станин, комплект касет, груповий привід з шпindelним пристроєм, пристрої зміни касет, системи майданчиків обслуговування, системи гідравліки, мастила та електрообладнання.

Вузол станин робочої кліти являє собою замкнену попередньо напружену просторову раму, яка складається зі зварних верхньої і нижньої поперечок, в кутах яких встановлені стійки з суцільнотягнутих товстостінних труб.

Цілісність і жорсткість конструкції забезпечують чотири вузли колон, що містять ковані шпильки. При цьому кожна зі шпильок була зтягнута з силою 10 МН. Вибір величини сили зтяжки здійснювався на підставі результатів розрахунку вузла станин методом скінчених елементів в середовищі SolidWorks Simulation під дією максимальних сил правки, обчислених з використанням чисельної одновимірної математичної моделі процесу правки гарячекатаних листів (див. підрозділ 3.2).

Величина сили зтяжки визначалася з умови нерозкриття стику між сполученими деталями вузла станин. Величина сумарної деформації вузла, а саме розтягування шпильки в сумі зі стиском елементів станини, отримана в результаті розрахунку і дорівнює 4...5 мм, в поєднанні з необхідною силою зтягування шпильки послужили вихідними даними для проектування гідравлічного пристосування для зтягування гайок шпильок вузла колон, виконаного у вигляді гідрогайки.

Таблиця 5.5 – Технічна характеристика багатороликової листопрямильної машини товстолистового стану 2850

Найменування параметру		Значення
Товщина оброблюваних листів, мм		6...120
Ширина, мм		1000...2800
Максимальна межа плинності оброблюваного матеріалу, МПа, не більше (в гарячому стані)		550
Швидкість правки, м/с		0,2...2,5
Кількість робочих роликів, шт		9 (5+4)
Діаметр робочих роликів, мм		360 (350min)
Довжина бочки робочого ролика, мм		2800
Крок робочих роликів, мм		380
Кількість опорних роликів, шт		124(64+60)
Діаметр опорних роликів, мм		370
Сила правки, тах, МН		25
Індивідуальне вертикальне налаштування роликів	Верхніх	€
	Нижніх	€
Горизонтальне налаштування нижніх роликів		€
Індивідуальний привід роликів		€
Система керування і діагностики, Блоки управління приводом Тип шини обміну даних		BALLUFF, Simatic S7-300 Profibus DP



Рисунок 5.20 – Загальні види багатороликової листоправильної машини товстолистового стану 2850

Верхня рухома траверса, спільно з касетою верхньою, має привод вертикального переміщення від чотирьох позиційно керованих гідроциліндрів. Схема позиціонування гідроциліндрів натискного пристрою і роликів верхньої касети показана на рисунку 5.21.

Проектування гідравлічних циліндрів натискного пристрою і всієї системи гідрокерування здійснювалося також на основі даних розрахунків процесу правки з використанням розроблених математичних моделей (див. розд. 3) [158-167]. При цьому до уваги бралися не тільки надійність і довговічність обладнання, але і його здатність до забезпечення необхідної швидкодії, що було продиктовано необхідністю забезпечення необхідної продуктивності стану, яка становить більш 2 млн. тон гарячекатаного листового металопрокату на рік.

Розрахункова схема листоправильної машини, при попередньому затягуванні шпильок силою $P_{\text{зат}} = 10 \text{ МН}$ і навантаженні робочою силою $P_{\text{роб}} = P_{\text{max}} / 4 = 25 / 4 = 6,25 \text{ МН}$, а також результати рішення поставленої задачі у вигляді полів напружень і деформацій вузла станин, отримані з використанням методу скінченних елементів в його програмній реалізації на основі прикладного пакета SolidWorks Simulation [168-172], представлені на рисунках 5.22...5.25. При цьому, зважаючи на симетрію, розглядалася тільки четверта частина конструкції.

З використанням розглянутих розрахункових результатів, отриманих в рамках даного дослідження, був зроблений вибір основних конструктивних параметрів вузла станин (див. рис. 5.22) ЛПМ стану 2850, що забезпечує, у порівнянні з конструкцією-аналогом, більш високий ступінь рівномірності розподілів показників напруженого стану при збереженні жорсткості вузла станин і одночасному зниженні його металоємності на 30%.

Аналогічний комплекс розрахунків був виконаний і для верхньою поперечини багатороликової ЛПМ даної конструкції. В цьому випадку при збереженні жорсткості, зниження металоємності склало до 40% в

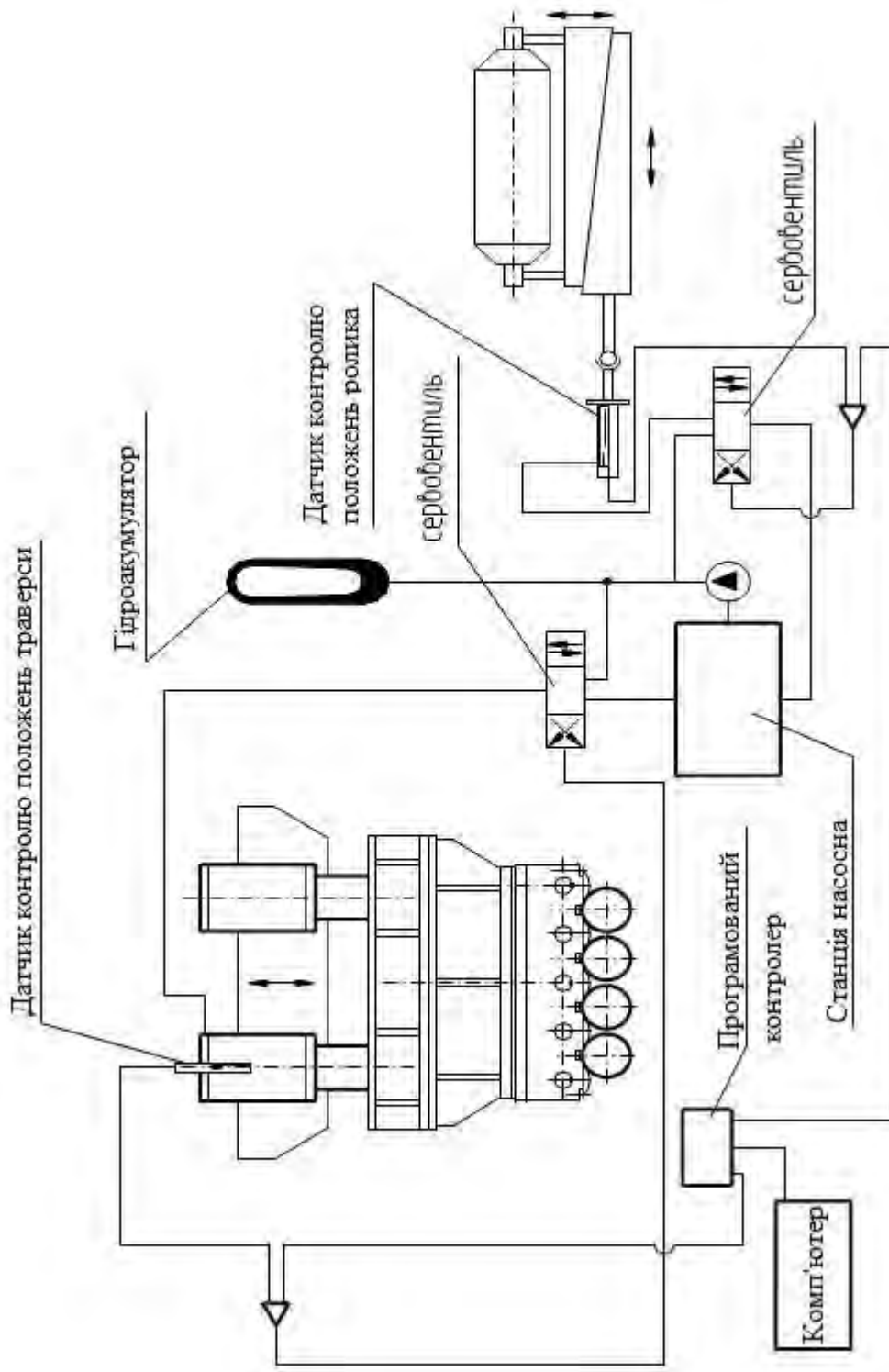


Рисунок 5.21 – Схема гідравлічних пристроїв для позиціонування траверси з верхньою касетою з робочими роликками ЛПМ товстолистового стану 2850

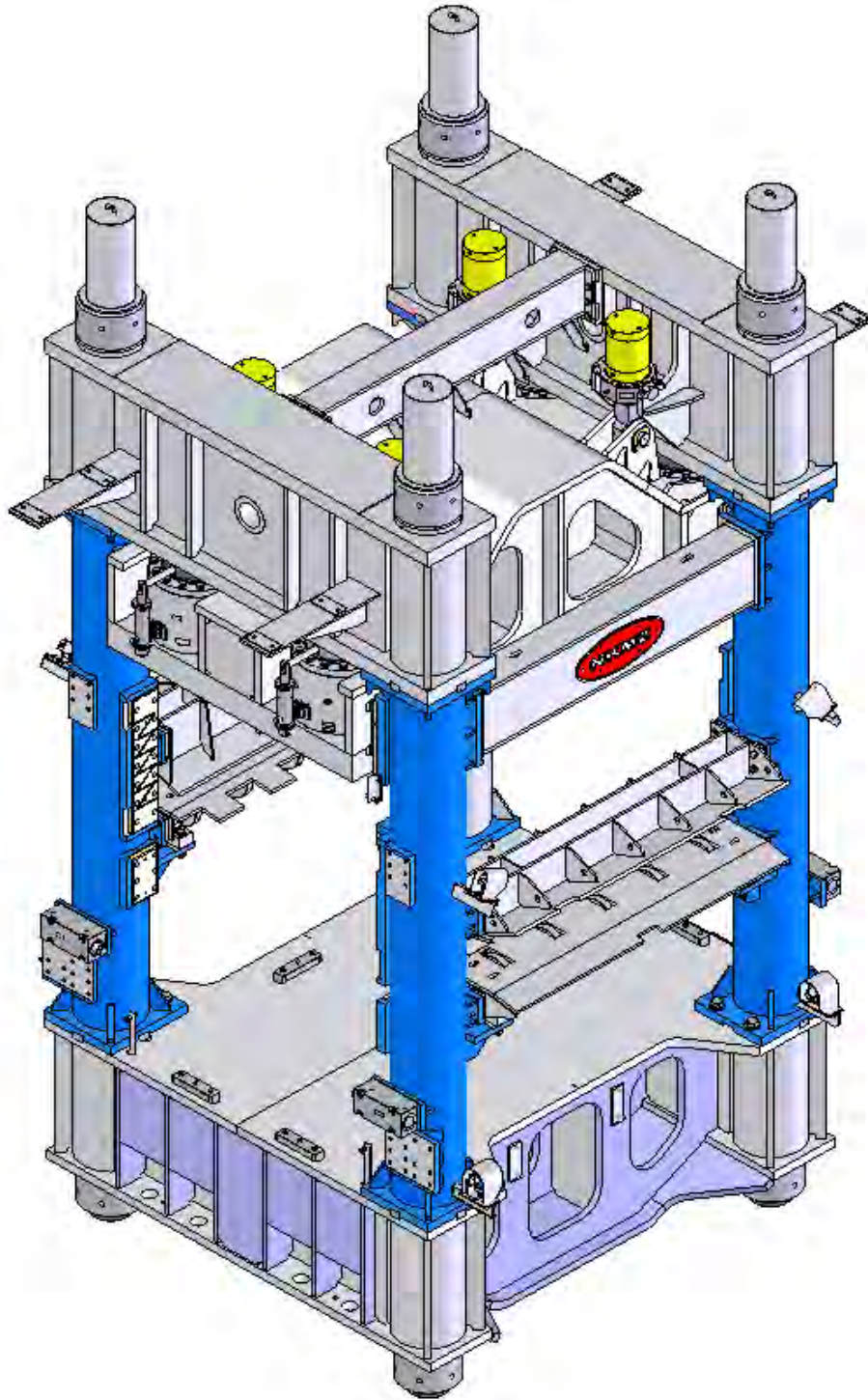


Рисунок 5.22 – Вузол станин ЛПМ стану 2850

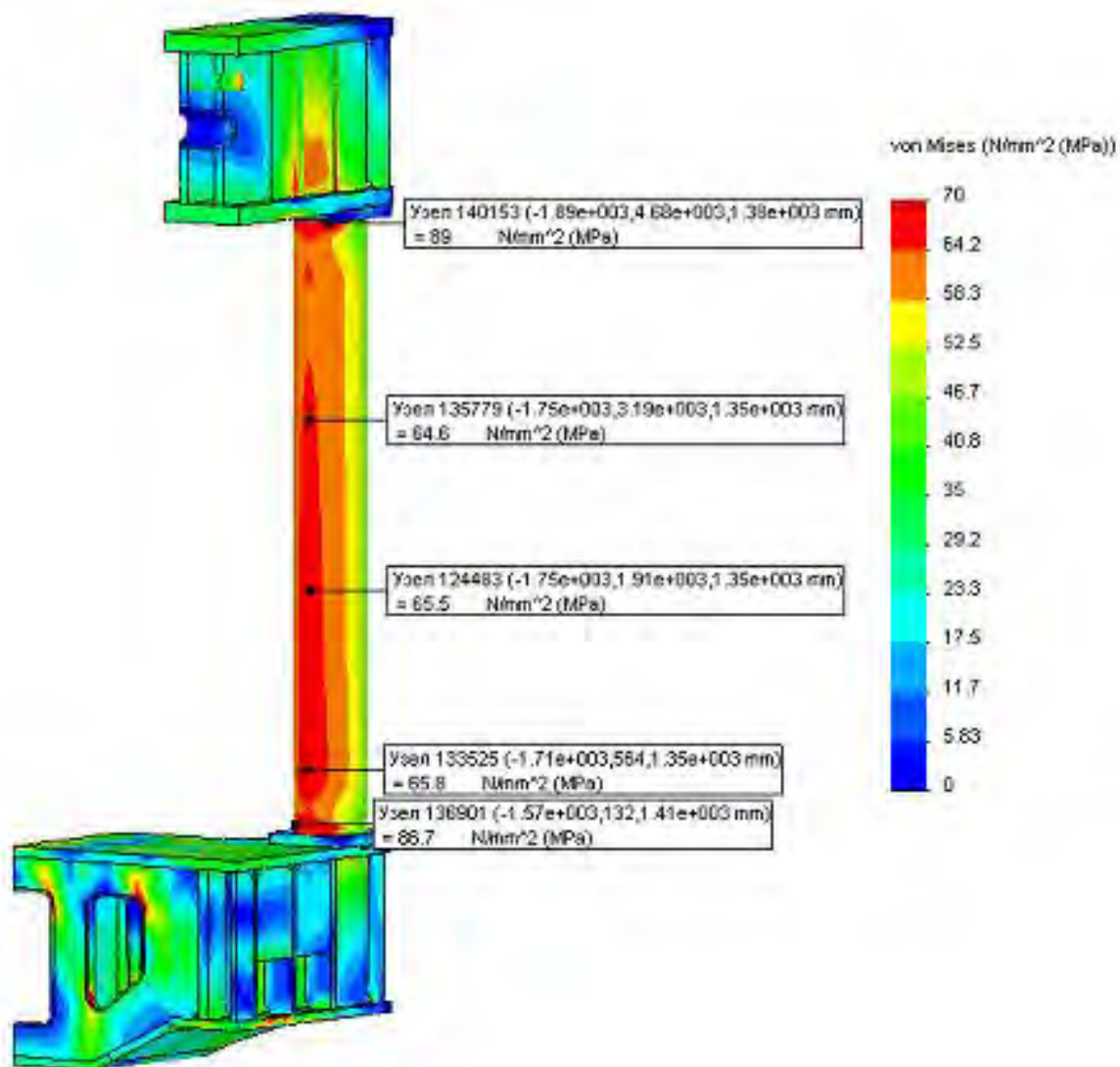


Рисунок 5.23 – Розподіл напружень в конструкції ЛПМ стану 2850 при попередньому затягуванні шпильок силою $P_{зат} = 10$ МН і навантаженні робочою силою $P_{раб} = P_{max} / 4 = 25 / 4 = 6,25$ МН (в силу симетрії розглянута четверта частина конструкції)

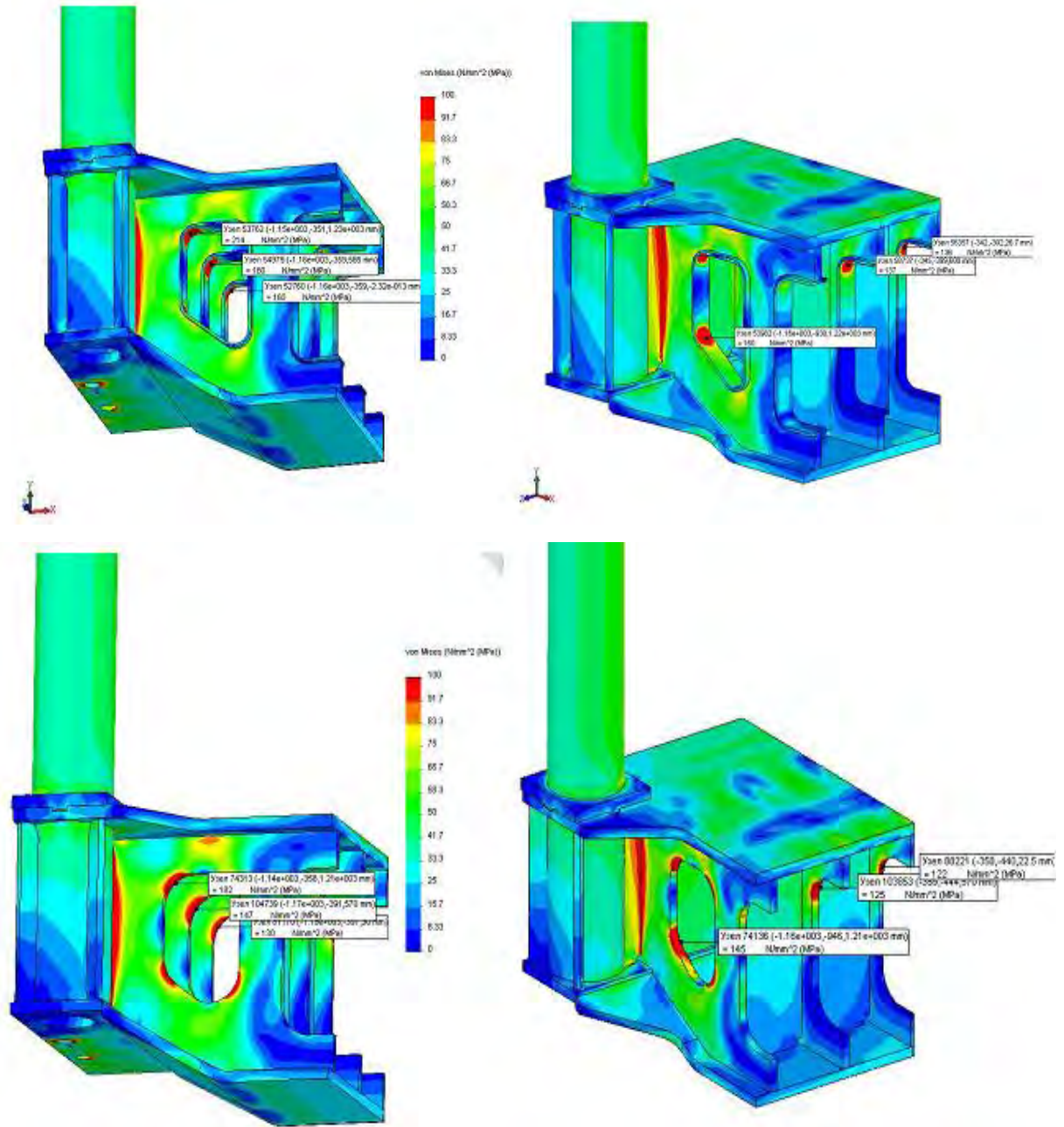


Рисунок 5.24 – Розрахункові розподіли основних показників напружено-деформованого стану конструкції ЛПМ

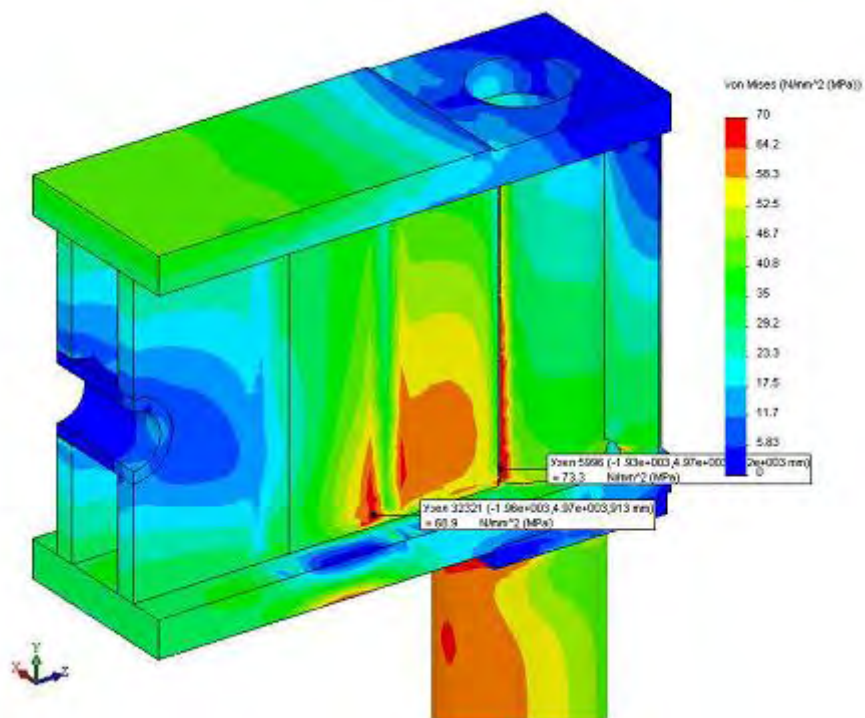
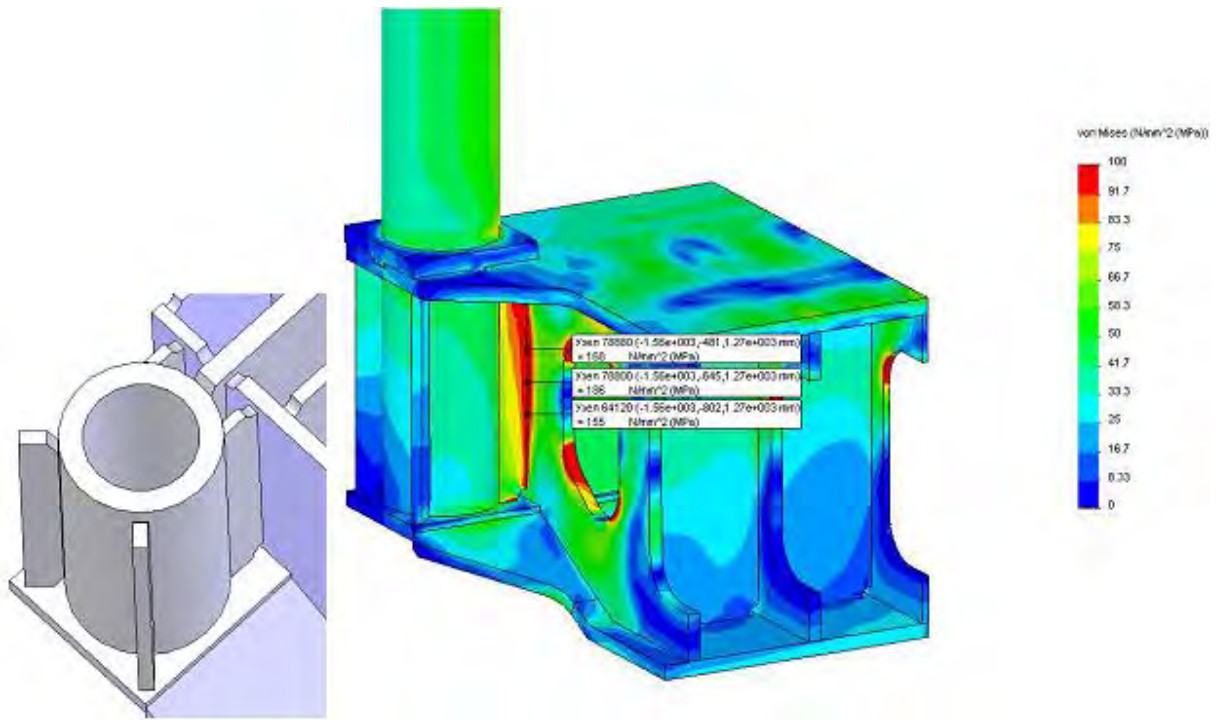


Рисунок 5.25 – Розрахункові розподіли рівнів еквівалентних напружень в конструкції ЛПМ

порівнянні з конструкцією-аналогом. До цього призвела заміна конструкції з кованої на зварену з товстих листів. Конструкція була опрацьована на предмет виключення концентраторів напружень, раціонального розташувань елементів жорсткості, а також застосування матеріалів з відповідними механічними властивостями, зокрема межею плинності та міцності.

Економія в грошовому вираженні при зміні зазначених конструктивних елементів склала 5 460 тис. грн за рівнем цін на кінець 2013 року.

Верхня і нижня касети ЛПМ являють собою зварні металоконструкції. Усередині кожної з касет встановлено шість клинових механізмів налаштування робочих роликів (рис. 5.26), що представляють собою клинові пари, верхні клини яких здійснюють поздовжнє переміщення від штоків гідроциліндрів налаштування, корпуси яких закріплені на рамі касети. Положення штоків гідроциліндрів контролюються датчиками лінійного переміщення, конструктивно заблокованими з гідроциліндрами. Нижні клини пар здійснюють вертикальне переміщення під дією верхніх клинів і пружин врівноваження.

На клинових механізмах розміщені опорні і робочі ролики. Опорні ролики діаметром 370 мм і шириною 140 мм розташовані в шаховому порядку в два ряди на відстані між рядами 120 мм.

Таке розташування опорних роликів дозволяє забезпечити необхідну жорсткість робочого ролика як в напрямку дії сили правки, так і в напрямку руху оброблюваних листів. Робочі ролики діаметром 360 мм спираються на чотирнадцять розташованих в шаховому порядку опорних роликів, при цьому крутний момент до робочого ролику передається від муфти шпindelного пристрою за допомогою евольвентного шліцьового з'єднання на хвостовику ролику. У подушках робочих роликів встановлені дворядні конічні роликотітшипники.

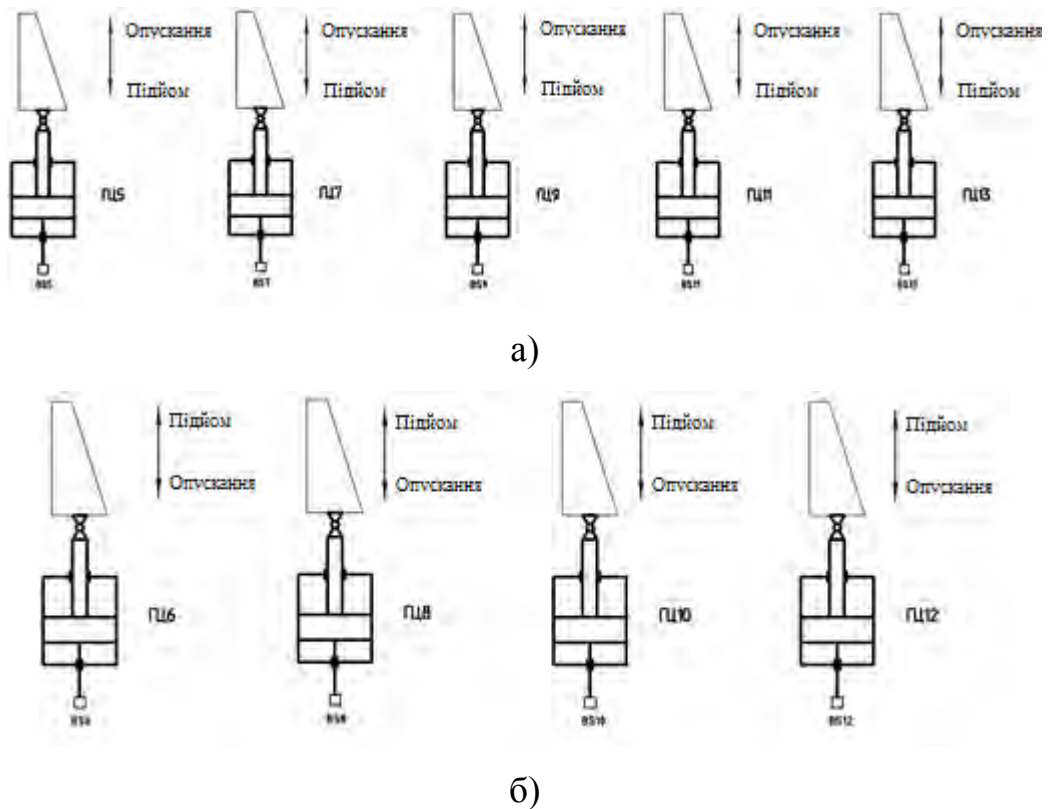


Рисунок 5.26 – Принципові схеми клинових механізмів налаштування робочих роликів верхньої (а) і нижньої (б) касети ЛПМ

Привід обертання правильних роликів здійснюється від двох трифазних електродвигунів асинхронного типу потужністю по 350 кВт кожен. Привід від електродвигунів здійснюється через циліндричні редуктори і шестеренну кліть.

Раціональне розбиття кінематичних ланцюгів на основі розрахункового розподілення крутних моментів на роликах дозволило перерозподілити моменти на двигунах таким чином, щоб максимальною мірою вирівняти робочі навантаження на них безпосередньо в процесі правки.

Для отримання більш точної картини розподілення напружень і переміщень верхньої траверси був виконаний розрахунок. Розрахункова модель, схема накладення обмежень і навантажень, а також результати розрахунку поставленої задачі – поле напружень і поле деформацій верхньої траверси представлені на рисунках 5.27, 5.28.

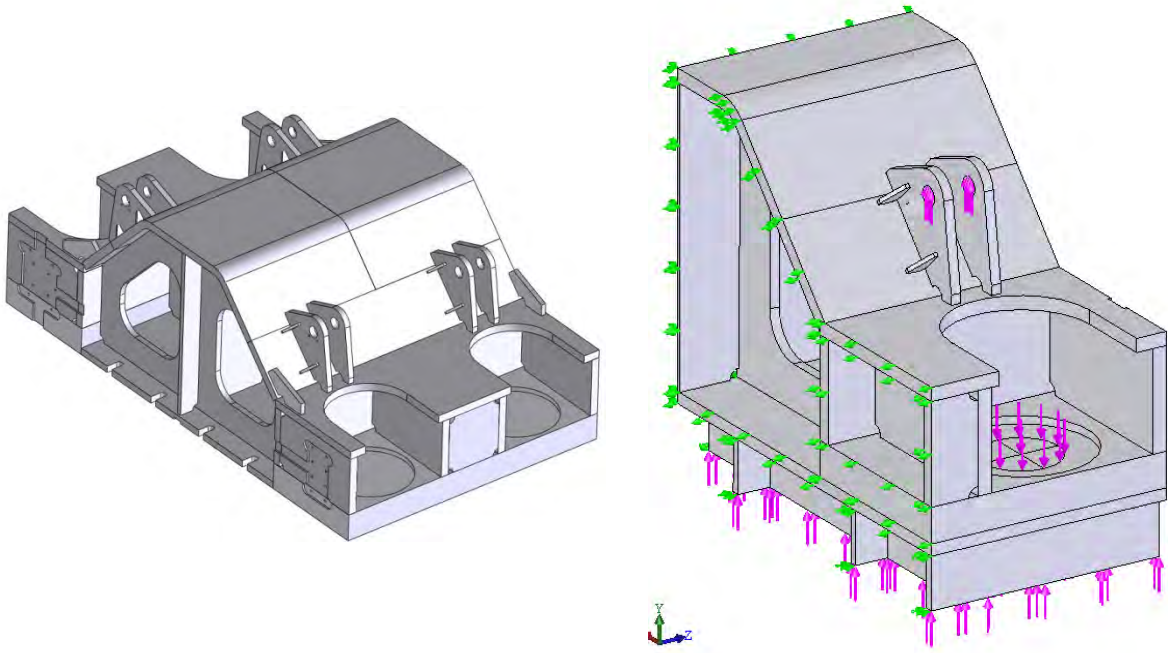


Рисунок 5.27 – Конструкція і схема накладення обмежень і навантажень верхньої траверси багатороликової ЛПМ стану 2850

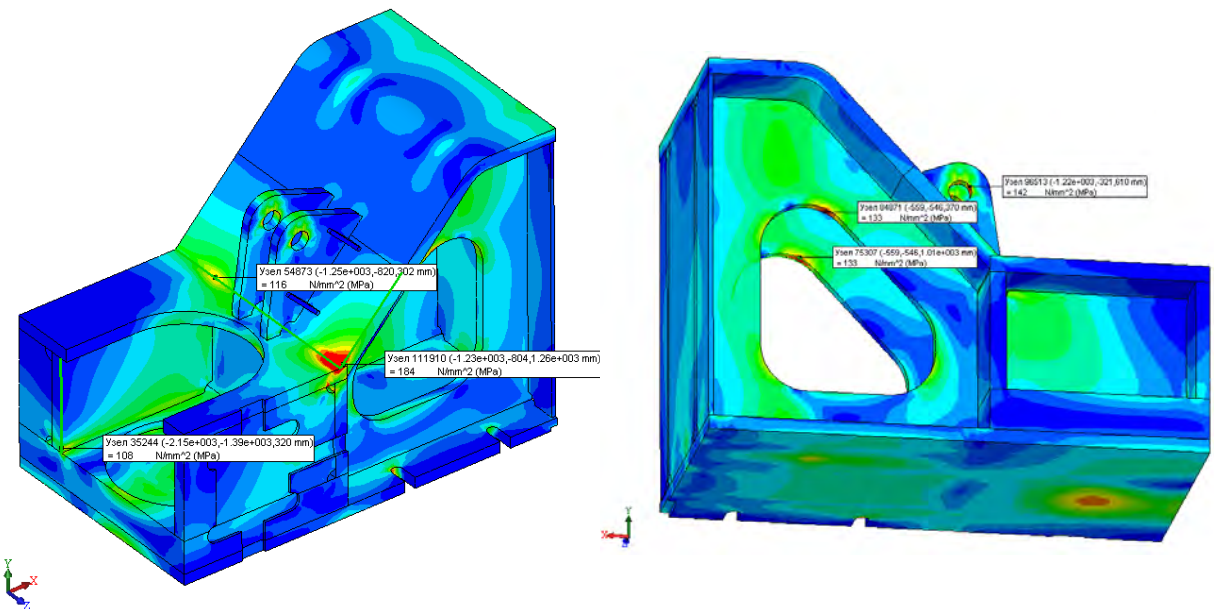


Рисунок 5.28 – Розрахункові розподілення напруженого (а) і пружно-деформованого (б) станів верхньої траверси багатороликової

ЛПМ стану 2850

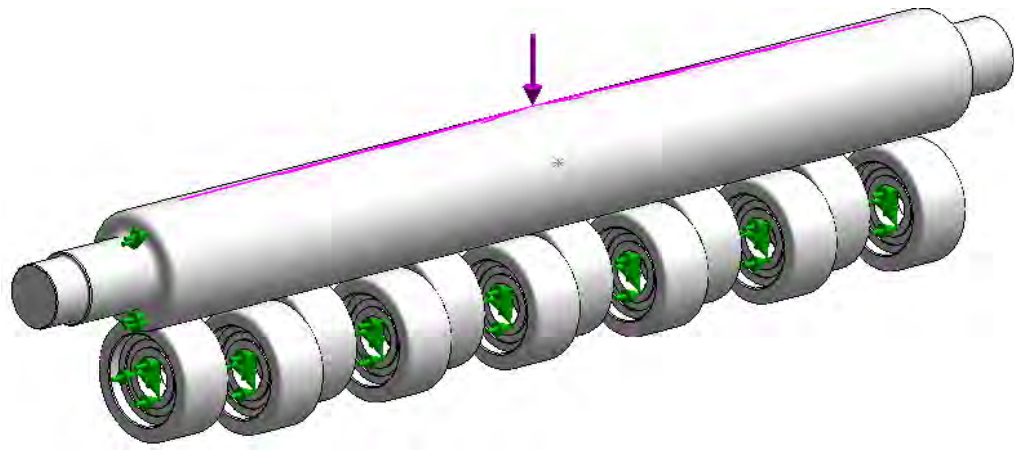
Розрахункова модель вузла робочого і опорних роликів, схема розбиття моделі на сітку скінченних елементів і накладення обмежень, а також результати розрахунку поставленої задачі – поле напружень, показані на рисунках 5.29...5.30.

Перший і останній, дев'ятий, робочі ролики, як показали результати виконаних розрахунків, є найменш навантаженими, внаслідок чого було прийняте рішення використати не чотирнадцять, а вісім опорних роликів. Даний захід призвів також до зниження фінансових витрат на експлуатацію ЛПМ внаслідок зменшення кількості імпортних покупних підшипників високої вартості.

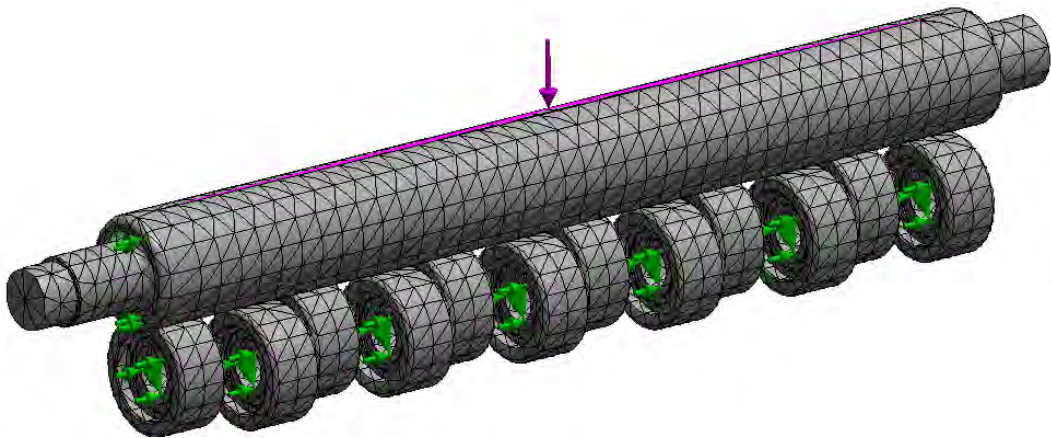
На основі аналізу результатів розробленої системи автоматизованого проектування технологічних налаштувань листоправильної машини (див. підрозд. 5.1) була розроблена загальна концепція системи управління ЛПМ стану 2850, яка виглядає наступним чином:

- за допомогою різних систем прокатного стану збираються вихідні дані про метал, що оброблюється: фактична товщина прокату з чистової кліті надходить від системи управління прокатного стану; фактична температура металу вимірюється за допомогою безконтактного пірметра, який встановлений безпосередньо на виході установки охолодження розкатів; інформація про сортамент металу і його механічні властивості в залежності від фактичної температури, ступеня і швидкості деформації при прокатці в чистової робочої кліті визначається системою «верхнього рівня», що відповідає за моделювання процесу прокатки в кліті стану;

- по протоколу зв'язку отримані дані передаються в систему керування багатороликової листоправильної машини, яка по алгоритмам, розглянутим в рамках підрозділів 3.1, 3.2 і 5.1, виконує проектувальний розрахунок перекриттів робочих роликів;



а)



б)

Рисунок 5.29 – Розрахункова модель (а) і схема розбиття на сітку скінченних елементів вузла робочих і опорних роликів ЛПМ стану 2850

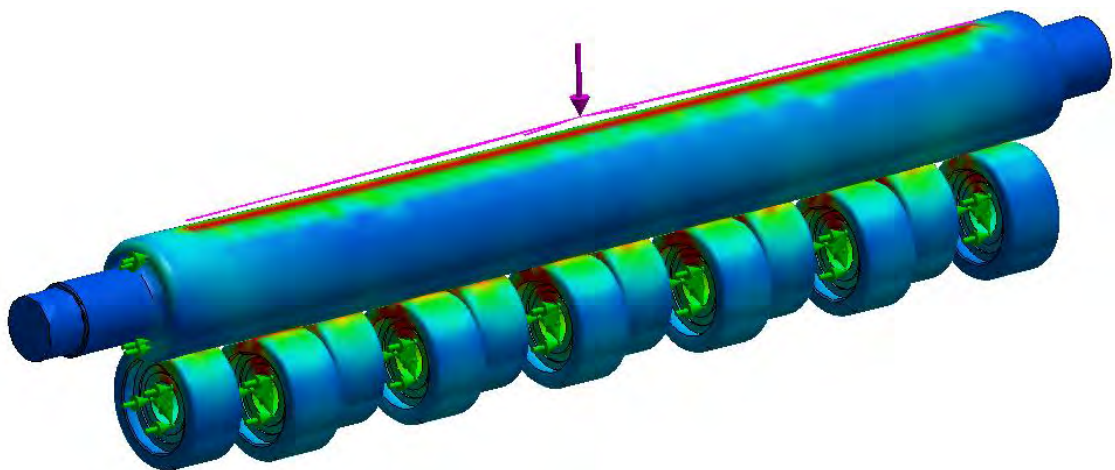


Рисунок 5.30 – Розрахункові розподіли ізополей напружень в вузлі робочих і опорних роликів ЛПМ стану 2850

– отримані розрахункові технологічні налаштування відпрацьовуються процесорно керованими гідравлічними приводами переміщення траверси і роликів, після закінчення налаштування дається дозвіл на подачу листа.

У вихідному положенні верхня касета піднята в крайнє верхнє положення, робочі ролики опущені на 10 мм від крайнього нижнього положення. Налаштування ЛПМ складається з двох операцій:

- налаштування машини на товщину листа;
- налаштування роликів верхньої касети.

Налаштування ЛПМ на товщину листа передбачає установку верхньої касети на рівень, при якому відстань між рівнем верхніх точок твірних нижніх валків і рівнем нижніх точок твірної верхніх валків у вихідному їхньому становищі дорівнює товщині листа. Налаштування виконується переміщенням верхньої траверси з верхньої касетою за допомогою натискних гідроциліндрів.

Налаштування може здійснюватися в трьох режимах: автоматичному, напівавтоматичному і в ручному. При цьому в автоматичному режимі отримання даних про лист, що піддається правці, (товщина, марка стали і температура листа на підході до ЛПМ) проводиться від системи верхнього рівня (АСУ ТП агрегату). У напівавтоматичному режимі ці ж дані вводяться оператором з пульта керування.

За цими даними програмна модель системи керування проводить розрахунок прогинів металу і здійснюється налаштування робочих роликів відповідно до результатів автоматизованого проектування.

В ручному режимі - оператор з пульта керування задає координати положення кожного ролика індивідуально. Після цього виконується установка роликів відповідно до введених координат.

Крім цього, для випробування після монтажу і ремонту, передбачається можливість переміщення кожного механізму ЛПМ при його ру-

чному включенні з одночасним відображенням поточної координати на екрані.

Після налаштування ЛПМ переходить в режим правки металу. Режим правки включає правку листів на швидкості від 0,2 до 2,5 м / с.

Під час правки відбувається підтримка заданого зазору між касетами за сигналами датчиків за допомогою натискного пристрою і швидкості переміщення штоків гідроциліндрів близько 0,5 мм / с. Крім того, оператор має можливість вручну ввести зміни за швидкістю обох приводних груп валків і за зазором касет.

Представлений в рамках даного підрозділу аналіз технічних рішень, поряд з результатами математичного моделювання процесу правки відносно товстих листів (див. підрозділи 3.2 і 3.3), були використані в якості вихідних даних на проектування, а також при розробці практичних рекомендацій з удосконалення технологічних режимів роботи та конструктивних параметрів обладнання багатороликової листопральної машини товстолистового стану 2850 конструкції Новокраматорського машинобудівного заводу (див. додаток Д).

В рамках роботи було розроблено конструкцію комплекту касет для багатороликової ЛПМ агрегату поперечного різання конструкції НКМЗ. На рисунку 5.31 представлено тривимірну модель нового комплекту касет.

В новій конструкції з'явилась можливість здійснювати вигин робочих роликів нижньої касети завдяки розташуванню блоків з опорними роликами на парах клинів, один з яких є приводним і переміщується вздовж напрямку переміщення металу, а інший, безпосередньо контактуючий з блоком опорних роликів, вздовж вертикальної площини.

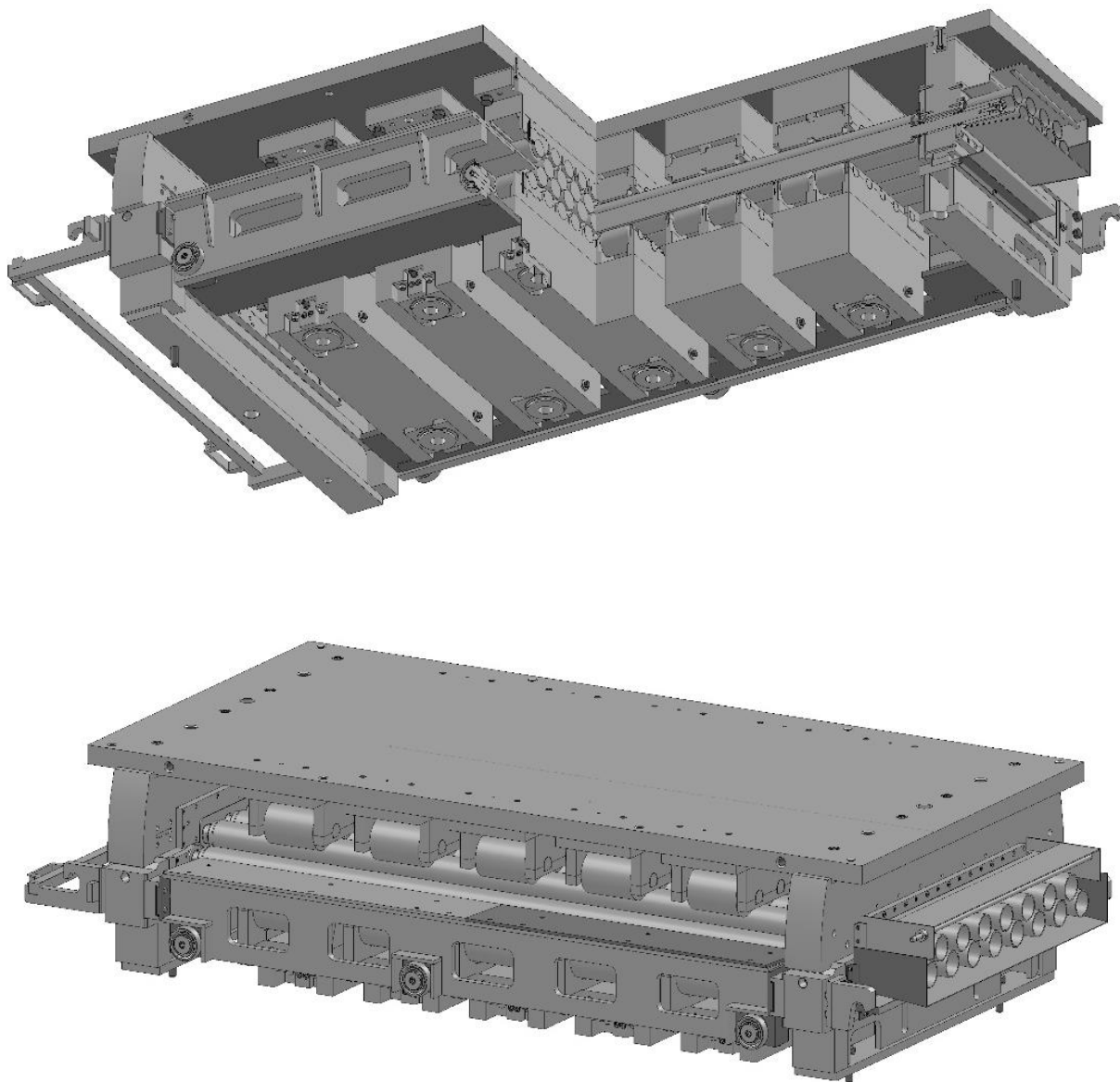


Рисунок 5.31 – Новий комплект касет багатороликової ЛПМ агрегату поперечного різання конструкції НКМЗ

Завдяки розрахованому вертикальному переміщенню кожного з п'яти блоків опорних роликів вони встановлюються, утворюючи необхідну, в залежності від заданої початкової кривизни, опорну поверхню для робочих роликів. Таке рішення дозволило знизити кількість відбра-

кованої продукції за показником площинності та підвищити надійність роботи агрегату в цілому завдяки зниженню рівня коробуватості металу, що раніше також впливало і на прохідність полоси через машини агрегату. Вибір основних конструктивних параметрів нового комплексу касет здійснювався з використанням виконаних результатів досліджень [158-167; 173-176].

Висновки

1 На основі отриманих чисельних математичних моделей розроблені алгоритми і вирішені програмно задачі з автоматизованого проектування технологічних параметрів листопривальної машини, які апробовані і впроваджені на діючому промисловому обладнанні та дозволяють в масштабі реального часу працювати в системі АСУ ТП ЛПМ. Від'ємною рисою цих алгоритмів є пошук раціонального для заданого сортаменту листів коефіцієнту проникнення пластичної деформації та визначення положення робочих роликів при їх індивідуальному налаштуванні.

2. На основі результатів реалізації тривимірної скінченно-елементної моделі процесу правки розроблені регресійні моделі з застосуванням методу планованого експерименту, що дозволили вирішити задачі оптимізаційного плану з впливу технологічних параметрів процесу правки з вигином робочих роликів на виправлення дефектів листів і в повздовжньому, і в поперечному напрямку. Встановлено, що хвилястість листа зменшується при збільшенні вигину та перекриття роликів, максимально припустимі значення котрих обмежуються умовами міцності та захвату, при цьому

розрахунки показують, що при певній хвилястості одноразовим вигином роликів досягти необхідну хвилястість крайок згідно стандартам не є можливим. Найбільш значущим фактором при цьому є зменшення параметра W / h до рівня 0,25, який досягається, як правило, третім роликом та обмежується нормованим коефіцієнтом проникнення пластичної деформації. При цьому, як показують розрахунки, необхідний рівень площинності ($\Phi = 0,1 \dots 1,0$ мон) можна досягти вигином робочих роликів на рівні 1,5...2,0 мм.

3. На основі автоматизованого проектування технологічних режимів і конструктивних параметрів обладнання для реалізації процесів правки гарячекатаних листів розроблені практичні рекомендації, спрямовані на підвищення ефективності технологій шляхом зниження енергоємності процесу, зменшення металоємності обладнання та розширення сортаменту оброблюваних листів на листопрямильних машинах. З використанням результатів, отриманих в рамках даного дослідження, був зроблений вибір основних конструктивних параметрів вузла станин і верхньої поперечини ЛПМ стану 2850, що забезпечило при збереженні жорсткості зниження металоємності конструкції на 30...40%. Економія в грошовому еквіваленті від удосконалення даної ЛПМ склала 320 тис. грн.

4. Стосовно до умов реалізації різних технологічних схем процесу правки гарячекатаних листів уточнені вихідні дані на проектування та виконані проекти комплекту касет з можливістю вигину робочих роликів для листопрямильної машини агрегату поперечного різання конструкції НКМЗ.

5. Результати роботи у вигляді методик розрахунку, програмних засобів, а також відповідних рекомендацій з удосконалення технологічних режимів і конструктивних параметрів механічного обладнання машин для правки гарячекатаних листів використані на ряді металургійних підприємств і в навчальному процесі.

ВИСНОВКИ

1. Підвищення якості та зниження собівартості листового металопрокату робить актуальним удосконалення діючих і створення нових високоефективних технологій і обладнання для правки листів на основі розвитку методів автоматизованого розрахунку і проектування, підвищення ступеня наукової обґрунтованості прийнятих технічних рішень, а також на основі розробки, дослідження і впровадження конкретних практичних рекомендацій. Розвиток теоретичних методів розрахунку правки на багатороликових листопрямильних машинах заснований на уточненні моделей шляхом більш точного опису фізичних явищ, умов і геометрії процесу. Розвиток технологій процесу правки листів заснований на розширенні видів дефектів листів, що виправляються, зокрема, усунення крім поздовжньої кривизни ще й поперечної, що можливо в сучасних конструкціях листопрямильних машин за допомогою контролюваного вигину робочих роликів. В даний час цей напрям вивчено недостатньо, що обумовлює актуальність проведення дослідження процесу правки гарячекатаних листів.

2. Вперше на основі теоретичного аналізу процесів правки на багатороликових прямих машинах з диференційованим додатком сил правки по ширині листа шляхом аналітичного, скінченно-елементного і регресійного моделювання встановлено, що вигин робочого ролика впливає на виправлення поперечної кривизни листа, зокрема, для забезпечення нормованого стандартами якості по хвилястості листів, достатньо в більшості випадків вигину одного ролика, причому для листів товщиною 8 ... 12 мм при ширині 1000 ... 2000 мм – величина необхід-

ного для правки крайової хвилястості вигину роликів не перевищує 2 мм.

3. В результаті експериментальних досліджень підтверджено можливість правки крайової хвилястості профільованими роликками, а також можливість отримання нормованої кривизни при одному профільованому ролику. Експериментальні дослідження показали достатню збіжність з теоретичними результатами за залишковою кривизною, відносна похибка теоретичних і експериментальних результатів складає 16%, в той же час для енергосилових параметрів похибка перевищує 20% з більш високими чисельними значеннями теоретичних результатів.

4. На основі отриманих чисельних математичних моделей розроблені алгоритми і вирішені програмно задачі з автоматизованого проектування технологічних параметрів листопральної машини, апробовані і впроваджені на діючому обладнанні і дозволяють в масштабі реального часу працювати в системі АСУ ТП ЛПМ.

5. На основі автоматизованого проектування технологічних режимів і конструктивних параметрів обладнання для реалізації процесів правки гарячекатаних листів розроблені практичні рекомендації, спрямовані на підвищення ефективності технологій шляхом зниження енергоємності процесу, зменшення металоємності обладнання та розширення сортаменту оброблюваних листів на листопральних машинах.

6. Стосовно до умов реалізації різних технологічних схем процесу правки гарячекатаних листів уточнені вихідні дані на проектування та виконані проекти листопральної машини гарячої і холодної правки товстолистого стану 2850 конструкції НКМЗ і комплекту касет з можливістю вигину робочих роликів для листопральної машини агрегату поперечного різання конструкції НКМЗ. Результати роботи у вигляді методик розрахунку, програмних засобів, а також відповідних рекоме-

ндацій з удосконалення технологічних режимів і конструктивних параметрів механічного обладнання машин для правки гарячекатаних листів використані на ряді металургійних підприємств і в навчальному процесі.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Слоним А. З. Правка листового и сортового проката / А. З. Слоним, А. Л. Сонин. – М. : Metallurgiya, 1981. – 232 с.
2. Чмелев А. А. Оценка формы прокатных листов и полос / А. А. Чмелев, В. Л. Мазур ; Ин-т чер. металлургии. – Днепропетровск, 1984. – 14 с. – Рус. – Деп. в Черметинформации 19.02.85, № 2785.
3. Pearson W. K. J. Shape Measurement and Control / W. K. J. Pearson // Journal of the Institute of Metals. – 1964-1965. – Vol. 93. – pp. 173–178.
4. Николаев В. А. Технология прокатки листов и полос : учебное пособие / В. А. Николаев. – К. : УМК ВО, 1990. – 168 с.
5. Wetzel S. Welligkeit von Bandern und Blechen aus Metall, speziell aus Aluminium / S. Wetzel // Blech RohreProfile. – 1977. – № 9. – P. 313–319 ; № 10. – P. 391–395.
6. Железнов Ю. Д. Прокатка ровных полос и листов / Ю. Д. Железнов. – М. : Metallurgiya, 1971. – 198 с.
7. Совершенствование производства холоднокатаной листовой стали / Ю. Д. Железнов [и др.]. – М. : Metallurgiya, 1982. – 232 с.
8. Взаимосвязь непоказности холоднокатаных полос с серповидностью узких лент после продольной резки / В. П. Полухин [и др.]. // Изв. вузов. Черная металлургия. – 1984. – № 11. – С. 62–64.
9. Мысиков Б. В. Контроль плоскостности полосы в процессе холодной прокатки цветных металлов / Б. В. Мысиков, О.В. Миронова // Цветные металлы. – 1986. – № 1. – С. 66–69.
10. Кривенцов А. М. Исследование серповидности при прокатке / А. М. Кривенцов / Конструирование и исследование современных прокатных станков : сб. науч. трудов. – М. : ВНИИметмаш. – 1985.

11. Головлев В. Д. Выпучивание листового металла при правке растяжением / В. Д. Головлев, В. Г. Моисеев // Кузнечно-штамповочное пр-во. – 1970. – № 5. – С. 13–16.

12. ГОСТ 21014-88. Термины и определения дефектов поверхности. Взамен ГОСТ 20847-75, ГОСТ 21014-75; введ. 1990-01-01. – М. : Изд-во стандартов, 1995.

13. Мазур В. Л. Предупреждение дефектов листового проката / В. Л. Мазур, А. Н. Добронравов, П. П. Чернов. – К. : Техніка. – 1986. – 142 с.

14. Косарев В. А. Модели оценки качества продукции при отделке толстых листов / В. А. Косарев, С. В. Солодов // Изв. вузов. Черная металлургия. – 2006. – № 7. – С. 65–66.

15. Мюкке Г. Дефекты формы горячее- и холоднокатаных полос и способы оценки / Г. Мюкке, К. Ф. Кархаузен, П.-Д. Пюц // Производство проката. – 2002. – № 7. – С. 30–36.

16. Особенности зарубежных и отечественных классификаторов дефектов поверхности листового проката / А. И. Добронравов, Е. В. Карпов, А. В. Кушнарев, К. А. Лисичкина // Труды I конгресса прокатчиков. – М. : Черметинформация. - 1996. – С. 205–208.

17. Неплоскостность полос и расчет усилия правки / А. А. Чабоненко, Д. Н. Огарков, В. И. Кузьменко, В. И. Андрющенко // Производство проката. – 1999. – № 1. – С. 32–36.

18. Ніколаєв В. О. Технологія виробництва сортового та листового прокату : підручник. Частина II / В. О. Ніколаєв, В. Л. Мазур. – Запоріжжя : ЗДІА, 2000. – 220 с.

19. Железнов Ю. Д. Статистические исследования точности тонколистовой прокатки / Ю. Д. Железнов, С. А. Коцарь, А. Г. Абиев. – М. : Металлургия, 1974. – 240 с.

20. Механизм образования местной коробоватости на жести / А. В. Кушнарев, Р. В. Файззулина, Р. И. Черкасский, О. Н. Молева // Производство проката. – 2002. – № 1. – С. 20–22.

21. Неравномерность деформации и геометрические параметры волнистости кромки полосы при прокатке / М. И. Куприн [и др.]. // Изв. вузов. Черная металлургия. – 1991. – № 8. – С. 29–31.

22. Куприн М. И. Неравномерность деформации и геометрические параметры коробоватости полосы при прокатке / М. И. Куприн, Л. П. Судакова, Л. Д. Девятченко // Изв. вузов. Черная металлургия. – 1991. – № 2. – С. 40–43.

23. ГОСТ 19903–74. Прокат листовой горячекатаный. Сортамент. – М. : Изд-во стандартов, 1987. –14 с.

24. Specification EN 10029:91. Стандарт EN 10029:91. Горячекатаные стальные листы толщиной 3 мм и более. Предельные отклонения размеров, формы и веса. – Europe, 1991. – 109 p.

25. Specification ASTM A6/A6M-91b. Standard Specification for general requirements for rolled steel plates, shapes, sheets peeling, and bars for structural use. Стандарт ASTM A6/A6M-91b. Общие требования к прокатанным толстым листам, профилям, сортовому прокату и упаковке листов для конструкционного использования. – USA, 1991. – 51 p.

26. Недорезов И. В. Роликовые правильные машины АО «Уралмаш» и пути их совершенствования / И. В. Недорезов, Б. Я. Орлов, А. Х. Винокур-ский // Труды первого Конгресса прокатчиков. – Магнитогорск, 23-27 октября, 1995. – М., 1996. – С. 38–42.

27. Шинкин В.Н. Упрощенный метод расчета изгибающих моментов стального листа и реакций рабочих роликов в многороликовой правильной машине // Известия Высших Учебных Заведений. Черная Металлургия. – 2017– т. 60. – №10. – С. 777-784. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2017-10-777-784>

28. Машины и агрегаты металлургических заводов. В 3 т. Т 3. Машины и агрегаты для производства и отделки проката : учебник для

вузов / А. И. Целиков [и др.]. – М. : Metallurgia, 1981. – 376 с.

29. Машиностроительная энциклопедия. В 40 т. Т. 4, 5. Машины и агрегаты металлургического производства / Н. В. Пасечник [и др.]. ; под общ. ред. Синицкого В. М., Пасечника Н. В. – М. : Машиностроение, 2000. – 912 с.

30. Королев А. А. Механическое оборудование прокатных и трубных цехов / А. А. Королев. – М. : Metallurgia, 1987. – 480 с.

31. Белобров Ю. Н. Современные листопрямительные машины / Ю. Н. Белобров, В. Г. Смирнов, А. И. Титаренко // Metallurg. – 2002. – № 9. – С. 50–52.

32. Пономарев Н. И. Создание и исследование роликовых правильно-натяжных машин для полосового проката : автореф. дис. ... канд. техн. наук. – М., 1977. – 24 с.

33. Кусакин Г. Л. Агрегат непрерывной правки полос / Г. Л. Кусакин. – М. : ЦНИИТЭИтяжмаш, 1980. – 1-80-15.

34. Дунаевский В. И. Машины для правки тонкого листового и полосового проката / В. И. Дунаевский, В. Д. Нотченко. – М. : ЦНИИТЭИтяжмаш, 1986. – 36 с.

35. Титаренко А. И. Совершенствование технологических режимов и конструктивных параметров оборудования агрегатов для протяжной термо-деформационной обработки тонких холоднокатаных лент из цветных металлов и сплавов : автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Краматорск. – 1993. – 16 с.

36. Головлев В. Д. Исследование правки растяжением листового металла / В. Д. Головлев // Конструирование, расчет и исследование прокатных станов : сб. науч. тр. – М. : ВНИИметмаш, 1987. – 126 с.

37. Щур И. А. Правка тонких листов из алюминиевых сплавов / И. А. Щур. – М. : ВИЛС, 1970. – 98 с.

38. Щур И. А. Правка тонких полос из алюминиевых сплавов / И. А. Щур, Т. А. Разумова. – М. : ВИЛС, 1970. – 59 с.

39. Третьяков А. В. Дрессировка и качество тонкого листа / А. В. Третьяков, Е. М. Третьяков, Г. Н. Мигачева. – М. : Metallurgia, 1977. – 232 с.

40. Опыт промышленного использования прокатки-волочения для правки полос / В. И. Выдрин [и др.]. // Сталь. – 1982. – № 5. – С. 54–55.

41. Дунаевский В. И. Линия непрерывной правки полос растяжением с изгибом / В. И. Дунаевский, Л. М. Россошенко. – М. : ЦНИИТЭИтяжмаш, 1982. – 1-82-12.

42. Дунаевский В. И. Совершенствование конструкций машин для правки растяжением с изгибом / В.И. Дунаевский, В.А. Самойлов, В.В. Кравченко // Тез. докл. XIII областной научн.-техн. конф. мол. спец. при Свердловском ПО 'УРАЛМАШ'. – Свердловск, 1988. – С. 15.

43. Исследование эффективности правки нагартованных холоднокатаных полос электротехнической стали методом растяжения с изгибом / Е. Г. Зиновьев [и др.]. // Труды I конгресса прокатчиков. – М. : Черметинформация, 1996. – С. 209–215.

44. Берингер Ю. Правка растяжением с изгибом электротехнической листовой стали / Ю. Берингер, В. Сильвасши // Черные металлы. – 1996. – № 5. – С. 20–26.

45. Самойлов В. А. Конструктивные схемы прокатно-правильных станов / В. А. Самойлов // Машины и технология для нанесения покрытий и обработки поверхности проката : сб. науч. тр. – М. : ВНИИметмаш, 1988. – С. 26.

46. Листоправильная машина горячей и холодной правки толстых листов из материалов с высоким пределом текучести / В. Г. Смирнов, Ю. Н. Белобров, А. И. Титаренко, И. А. Евгиненко // Совершенствование процессов и оборудования обработки металлов давлением в металлургии и машиностроении : сб. науч. тр. – Краматорск : ДГМА, 2000. – С. 429–433.

47. Современные линии отделки толстолистовых станов для производства трубного штрипса / Ю. Н. Белобров, В. А. Плотников,

Ю. Г. Бондарь, А. И. Титаренко // Черная металлургия. – 2004. – № 1. – С. 16–20.

48. Белобров Ю. Н. Современные листопрямительные машины / Ю. Н. Белобров, В. Г. Смирнов, А. И. Титаренко // Металлург. – 2002. – № 9. – С. 50–52.

49. Развитие методов расчета технологий и оборудования процессов правки широкого сортамента толстых листов / Ю. Н. Белобров, В. Г. Смирнов, А. И. Титаренко, А. В. Шестопапов // Удосконалення процесів та обладнання обробки тиском у металургії і машинобудуванні : тематич. зб. наук. пр. – Краматорськ-Слов'янськ : ДДМА, 2003. – С. 67–72.

50. Новые разработки в технологии и оборудовании для горячей правки толстых листов / Ю. Н. Белобров [и др.]. // Удосконалення процесів та обладнання обробки тиском у металургії і машинобудуванні : зб. наук. пр. – Краматорськ : ДДМА, 2006. – С. 228–231.

51. Белкин Е. Л. Методика расчета технологических параметров правки изделий на роликотравильных машинах / Е. Л. Белкин, В. Г. Козлов, Г. Г. Карабанов // Вестник машиностроения. – 1992. – № 5. – С. 66–67.

52. Modeling of the leveling process and application to heavy plate mills and strip finishing mills. Моделирование процесса правки и его использование в линиях отделки толсто- и тонколистовых станов / J. Y. Bourgon, O. Guillard, B. Guillard, K. Eberwein, M. Boillot // METEC Congr. '94 : 2nd Eur. Cont. Cast. Conf. and 6th Int. Roll. Conf., Düsseldorf, June 20–22 – 1994 : Proc. Vol. 2. – Düsseldorf, 1994. – С. 112–119.

53. Hot and cold plate leveler. Information of Danieli & C. S.p.A. , 2006. – 62 p.

54. Правильная машина для холодной правки листов. Проспект фирмы «SMS», 1999.

55. Шинкин В. Н. Расчет технологических параметров правки

стального листа на одиннадцатироликовой листопрямительной машине линии поперечной резки фирмы Fagor Arrasate / В. Н. Шинкин // Производство проката. – 2014. – № 8. – С. 26–34.

56. Zhifang Lui. A new model for the plate leveling process based on curvature integration method / Zhifang Lui, Yongqin Vang, Xingchun Yan // International Journal of Mechanical Sciences. – 2012. – 54. – P. 213–224.

57. Остринский А. С. Определение расчетных параметров листовых роликовых правильных машин / А. С. Остринский // Труды ВНИИМЕТМАШ : сб. науч. пр. – № 18. – С. 7–32.

58. Винокурский А. Х. Исследование силовых и геометрических параметров при отгибании полосой роликов окалиноломателей и натяжных устройств : дисс. ... канд. техн. наук : 05.02.02 : защищена 02.06.75 : утв. 29.06.76. – Свердловск, 1975. – 226 с.

59. Луговской В. М. Теория расчета листопрямительных машин и автоматизация их проектирования / В. М. Луговской // Труды ВНИИМЕТМАШ. – М. : Metallurgia, 1970. – № 26. – С. 8–30.

60. Самойлов В. А. Расчет напряженно-деформированного состояния полосы при правке растяжением с изгибом / В. А. Самойлов, А. Б. Егоров // Совершенствование процессов и машин обработки проката : тр. ВНИИМЕТМАШ. – М. : ВНИИМЕТМАШ, 1988. – С. 94–99.

61. Самойлов В. А. Определение деформации полосы при растяжении с изгибом / В. А. Самойлов, А. Б. Егоров // Машины и технологии для нанесения покрытий и обработки поверхности проката : тр. ВНИИМЕТМАШ. – М. : ВНИИМЕТМАШ, 1988. – С. 123–126.

62. Самойлов В. А. О взаимосвязи силовых факторов и кривизны в процессе деформирования проката растяжением с изгибом / В. А. Самойлов, А. Б. Егоров // Изв. вузов. Черная металлургия. – 1989. – № 7. – С. 148–149.

63. Самойлов В. А. Алгоритм расчета параметров процесса

правки растяжением с изгибом / В. А. Самойлов, А. Б. Егоров // Совершенствование металлургических машин. – М. : ВНИИМЕТМАШ, 1989. – С. 102–104.

64. Титлянов А. Е. Алгоритм расчёта параметров процесса правки на роликовых машинах / А. Е. Титлянов, Б. С. Литвак // Сб. науч. тр. МИСиСа. – 1977. – № 100. – С. 106–108.

65. Коновалов Ю. В. Расчет параметров листовой прокатки : справочник / Ю. В. Коновалов, А. Д. Остапенко, В. Н. Пономарев. – М. : Металлургия, 1986. – 430 с.

66. Бровман М. Я. Применение теории пластичности в прокатке / М. Я. Бровман. – М. : Металлургия, 1991. – 265 с.

67. Третьяков А. В. Механические свойства металлов и сплавов при обработке давлением / А. В. Третьяков, В. Н. Зюзин. – М. : Металлургия, 1973. – 224 с.

68. Полухин П. И. Сопротивление пластической деформации металлов и сплавов : справочник / П. И. Полухин, Г. Я. Гун, А. М. Галкин. – М. : Металлургия, 1983. – 352 с.

69. Соколов Л. Д. Сопротивление металлов пластической деформации / Л. Д. Соколов. – М. : Металлургия, 1973. – 284 с.

70. Андреюк Л. В. Определение давлений металла на валки при горячей прокатке сталей и сплавов широкого сортамента / Л. В. Андреюк // Теория прокатки // Теоретические проблемы прокатного производства : материалы всесоюзн. науч. техн. конф. – М. : Металлургия, 1975. – С. 383–385.

71. Андреюк Л. В. Аналитические зависимости сопротивления деформации металла от температуры и степени деформации / Л. В. Андреюк, Г. Г. Тюленев // Сталь. – 1972. – № 9. – С. 545–547.

72. Misaka Y. Technol. Plast / Y. Misaka, T. Yoshimoto // J. Japan Soc. – 1967. – vol. 8. – 414

73. Федоринов В. А. Математическое моделирование напряжений, деформаций и основных показателей качества при прокатке относительно широких листов и полос : монография / В. А. Федоринов, А. В. Сатонин, Э. П. Грибков. – Краматорск : ДГМА, 2010. – 156 с.

74. Сатонин А. В. Численное конечно-разностное математическое моделирование напряженно-деформированного состояния металла при реализации различных технологических схем обработки давлением // Удосконалення процесів та обладнання обробки тиском в металургії і машинобудуванні : зб. наук. пр. – Краматорськ : ДДМА, 2001. – С. 559–564.

75. Грушко А. В. Развитие феноменологических основ создания карт металлов и сплавов применительно к процессам их холодной обработки давлением : автореф. ... д-ра техн. наук / А. В. Грушко. – Краматорск : ДГМА, 2013. – 41 с.

76. Грудев А. П. Внешнее трение при прокатке / А. П. Грудев. – М. : Metallurgiya, 1973. – 285 с.

77. Чертавских А. К. Трение и технологическая смазка при обработке металлов давлением / А. К. Чертавских, В. К. Белосевич. – М. : Metallurgiya, 1968. – 362 с.

78. Контактное взаимодействие металла и инструмента при прокатке / П. И. Полухин [и др.]. – М. : Metallurgiya, 1974. – 200 с.

79. Контактное трение в процессе обработки металлов давлением / А.Н. Леванов [и др.]. – М. : Metallurgiya, 1976. – 416 с.

80. Василев Я. Д. Анализ моделей напряжений трения при прокатке / Я. Д. Василев, А. В. Дементиенко, Д. В. Коноводов // Удосконалення процесів та обладнання обробки тиском в металургії та машинобудуванні : зб. наук. пр. – Краматорськ : ДДМА, 2001. – С. 532–537.

81. Василев Я. Д. Разработка новой модели напряжений трения при прокатке / Я. Д. Василев // Теоретические проблемы прокатного

производства : труды IV Международной научно-технической конференции. – Днепропетровск : НМЕТАУ, Metallургическая и горнорудная промышленность. – 2000. – № 8,9. – С. 28–32.

82. Ганеев Ю. М. Универсальный метод определения изгибающего и крутящего моментов при правке и гибке заготовок / Ю. М. Ганеев // Оборудование сортовых и толстолистовых прокатных станов. – М. : ВНИИМЕТМАШ, 1989. – С. 65–69.

83. Кучеряев Б. В. Инженерная оценка некоторых кинематических параметров процесса правки на ролико-правильных машинах / Б. В. Кучеряев, А. И. Федосеев // Изв. ВУЗов. Черная металлургия. – 1991. – № 1. – С. 46–49.

84. Optimisation de la préparation de planéité des bobines et des femilles après train à bandes. Оптимизация восстановления плоскостности полос и листов после полосового стана/ P. Gevers, J. Y. Bourgon, F. Ferrauto, O. Guillard, P. Caut, O. Fradin, H. Garnier, B. Chapman // Rev. met. (Fr.). – 1995. – 92, № 10-11. – С. 1235-1242. – Фр.

85. Finstermann G. Simulation der Biegerichtung von eindimensional gekrummten Bandern in Mehrrollenrichtmaschinen (Teil 1 – Theorie). Моделирование правки гибкой одномерно искривленных полос на многовалковых правильных машинах. Ч. I. Теория/ G. Finstermann, W. Schwenzfier, F. D. Fischer // Berg – und Huttenmann. Monatsh. – 1991. – № 7. – С. 240–249.

86. Fu Wen-zu. Roll gap calculated. Роликовый зазор вычислен / Fu Wen-zu, Fan Ling-shu // Iron and Steel International. – 1985. – № 1. – С. 14–15.

87. Дунаевский В. И. Конструкция, технология и методы расчета машин для правки листового проката / В. И. Дунаевский. – К : УМК ВО, 1992. – 86 с.

88. Дунаевский В. И. Перераспределение крутящих моментов при правке на роликовых правильных машинах / В. И. Дунаевский, Л. Л. Лапшев, Н. И. Пономарев // *Металлургическая и горнорудная промышленность*. – К. : Институт технической информации, 1964. – № 6. – С. 38–39.

89. Мисака Есисука. Исправление формы стальной полосы на правильной машине с натяжением / Мисака Есисука, Масун Такэси // *Сосей то како*. – 1976. – 17, № 191. – С. 988–994.

90. Roberts Z. M. On The Mechanics of the Tension-Levelling Process / Z. M. Roberts, T. Sheppard // *Jornal of the Institute of Metals*, Oct. – 1971. – V. 99. – P. 293–301.

91. Sheppard T. Stress/strain Relationships for Strip-shape Correction Processes / T. Sheppard, Z.M. Roberts // *Journal of the Institute of Metals* Quly. – 1971. – Vol. 99. – P. 223–228.

92. Коровицкий Е. Л. Определение мощности привода машин для правки проката прямоугольного сечения / Е. Л. Коровицкий // *Изв. вузов. Черная металлургия*. – 1984. – № 6. – С. 129–133.

93. Хайкин Б. Е. Двухпараметрическая модель упрочнения металлов и сплавов при холодной деформации / Б. Е. Хайкин // *Изв. вузов. Черная металлургия*. – 1985. – № 11. – С. 69–74.

94. Зильберг Ю. В. О влиянии знакопеременного изгиба на протяженность площадки текучести / Ю. В. Зильберг, В. Г. Братутин, Т. А. Карнаух // *Изв. вузов. Черная металлургия*. – 2002. – № 5. – С. 69–70.

95. Зильберг Ю. В. Влияние знакопеременного изгиба на прочностные свойства низкоуглеродистой стали / Ю. В. Зильберг, В. Г. Братутин // *Удосконалення процесів та обладнання обробки тиском у машинобудуванні та металургії : зб. наук. пр.* – Краматорськ : ДДМА, 2002. – С. 263–268.

96. Planage en tolèrie forte. Modelisation et application industrielles. Правка толстых листов. Математическое моделирование и его применение / J. Y. Bourgon, D. Dreistadt, O. Guillard, L. Irastorza // *Rev. met (Fr.)*. – 1993. – 90. – № 4. – С. 537–544.

97. Управление продольными напряжениями в толстых листах контролируемой прокатки / О. Н. У. Киа, W. Y. Choo, R. Chang, J. Н. Киа, S. С. Shin // *Дзайре то пуросэсу = Curr. Adv. Mater, and Proc.* – 1990. – 3, № 5. – С. 1370. – Яп., Место хранения Черметинформация.

98. Исследование деформации металла в роликотправильной машине / М. С. Подгайский, А. А. Дубиня, Т. М. Наливайченко, А. Б. Максимов // *Вестник машиностроения*. – 1986. – № 11.

99. Guericke W. Voraussetzungeg und Moglichkeiten von Mikrorechnen. Предпосылки и возможности автоматического регулирования роликовых правильных машин с использованием микроЭВМ / W. Guericke, S. Buchmann, V. Riefenstahl // *Wissenschaftliche Zeitschrift der Technischen Hochschule Otto von Guericke, Magdeburg*. – 1983. – № 1/2. – S. 167–173.

100. Brunig M. Ein Finite-Element-model zur numerischen Simulation des Rollenrichtens von schweren Profilen. Конечно-элементная модель для численного моделирования роликовой правки тяжелых профилей / M. Brunig // *Institut fur Konstructiven Ingenieurbau. Ruhr-Universitat*. – Mitteilung. – № 89 – 5. – Bochum, 1989. – 142 s.

101. Richard P. Mathematical modeling of the cold leveling process for steel plates. Математическое моделирование процесса холодной правки стальных плит / P. Richard, Jr. Smith // *Proceeding of the 36-th Mechanical Working and Steel Processing Conference, Baltimore, MD, October 17-18, 1994*. – USA, 1995.

102. Шестопапов А. В. Разработка уточненной математической модели процесса правки относительно толстых листов и полос / А. В. Шестопапов, И. Л. Синельников, А. А. Сатонин // *Сборник*

тезисов IV международной научно-практической конференции молодых ученых и специалистов «Интеллект молодых – производству 2005». – Краматорск : НКМЗ, 2005. – С. 25–27.

103. Математическое моделирование напряженно-деформированного состояния металла при горячей правке на многороликовых правильных машинах / А. В. Сатонин, А. В. Шестопапов, Е. Б. Кулаченко, А. А. Кулаченко, А. А. Сатонин // Восточноевропейский журнал передовых технологий. – 2006. – № 5/2(23) – С. 38–43.

104. Титаренко А. И. Автоматизированный расчет и проектирование технологических режимов процессов холодной и горячей правки относительно толстых листов на многороликовых правильных машинах / А. И. Титаренко, Э. П. Грибков, О. А. Гаврильченко // Обработка материалов давлением : сб. науч. тр. – Краматорск : ДГМА, 2009. – № 1 (20). – С. 123–128.

105. Анализ влияния температуры и геометрических характеристик на энергосиловые параметры при реализации процесса горячей правки относительно толстых листов / А. В. Сатонин, А. И. Титаренко, А. В. Шестопапов, О. А. Гаврильченко // Обработка материалов давлением : сб. науч. тр. – Краматорск : ДГМА, 2008. – № 1 (19). – С. 115–119.

106. Теория обработки металлов давлением (Вариационные методы расчета усилий и деформаций) / И. Я. Тарновский [и др.]. – М. : Metallургия, 1963. – 672 с.

107. Колмогоров В. Л. Механика обработки металлов давлением / В. Л. Колмогоров. – М. : Metallургия, 1986. – 688 с.

108. Колмогоров В. Л. Определение напряженно-деформированного состояния полосы вариационным методом / В. Л. Колмогоров, А. В. Выдрин // Изв. вузов. Черная металлургия. – 1988. – № 8. – С. 46–49.

109. Компьютерное моделирование процессов обработки металлов давлением / В. Н. Данченко [и др.]. – Днепропетровск : Системные технологии, 2005. – 448 с.

110. Зенкевич О. Конечные элементы и аппроксимация / О. Зенкевич, К. Морган. – М. : Мир, 1986. – 318 с.

111. Liu G. R. The Finite Element Method: A Practical Course / G. R. Liu, S. S. Quek. – Department of Mechanical Engineering, National University of Singapore, 2003. – 348 p.

112. Weides G. Optimisation of the forging process of profiled discs for low pressure turbine rotors by FEM simulation / G. Weides, N. Blaes, D. Bokelmann // 17 International Forgemasters Meeting, Santander, Spain, (3–7 Nov. 2008). – 2008.

113. Голенков В. А. Методы математического моделирования и новые задачи ОМД / В. А. Голенков, П. Г. Морев, С. Ю. Радченко // Удосконалення процесів і обладнання обробки тиском в машинобудуванні та металургії : тематич. зб. наук. пр. – Краматорськ : ДДМА, 2008. – С. 15–19.

114. Биба Н. В. Применение программы моделирования процессов ОМД QFORM для обучения и исследовательской работы в университетах / Н. В. Биба, Ю. А. Гладков, О. А. Белокуров // Удосконалення процесів і обладнання обробки тиском в машинобудуванні та металургії : тематич. зб. наук. пр. – Краматорськ : ДДМА, 2008. – С. 9–14.

115. DEFORMTM 3D Version 10.0 User's Manual (<http://home.zcu.cz/~sbenesov/Deform3Dlabs.pdf>), 2009. – 288p.

116. Манилык Т. Практическое применение программного комплекса ABAQUS в инженерных задачах. Версия 6.5 / Т. Манилык, К. Ильин. — М. : МФТИ, ТЕСИС, 2006. – 99 с.

117. Алямовский А. А. SolidWorks/COSMOSWorks. Инженерный анализ методом конечных элементов / А. А. Алямовский. – М. : ДМК Пресс, 2004. – 432 с.

118. Конечно-элементное математическое моделирование напряженно-деформированного состояния металла и основных показателей качества при горячей правке на многороликовых правильных машинах / А. И. Титаренко, А. В. Шестопапов, А. А. Сатонин, О. А. Гаврильченко // Розвиток методів розрахунку, удосконалення технологій та обладнання процесів тиском. Матеріали науково-практичної конференції. – Краматорськ : ДДМА, 2007. – С. 15.

119. Сатонин А. В. Моделирование процесса правки толстых листов на многороликовых правильных машинах с использованием метода конечных элементов / А. В. Сатонин, А. В. Шестопапов, О. А. Гаврильченко // Тезисы докладов Международной научно-технической конференции «Прогрессивные технологии пластической деформации металлов» посвященной 100-летию со дня рождения выдающегося ученого-практика В. М. Клименко. – Донецк : Норд Компьютер, 2008. – С. 32.

120. Testing and Modeling of Roll Levelling Process / E. Silvestre, E. S. de Argandoña, L. Galdos, J. Mendiguren // Key Engineering Materials. 2014 – Vols. 611-612. – pp. 1753–1762.

121. Flatness defects after bridle rolls: a numerical analysis of leveling / N. Mathieu, R. Dimitriou, A. Parrico, M. Potier-Ferry, H. Zahrouni // International Journal of Material Forming. – 2013. – Vol. 6. – Issue 2. – pp. 255–266.

122. Petruška J. A New Model for Fast Analysis of Leveling Process / J. Petruška, T. Návrat, F. Šebek // Advanced Materials Research. – 2012. – Vol. 586, pp. 389–393.

123. Lemoine X. Bauschinger effect correspondence of experimental tests / X. Lemoine, A. Aouafi // International Journal of Material Forming. – 2008. – Vol. 1. – Supplement 1. – pp. 241–244.

124. Testing and modelling the behaviour of steel sheets for roll levelling applications / B. Dratz, V. Nalewajk, J. Bikard, Y. Chastel // International Journal of Material Forming. – 2009. – Vol. 2. – Supplement 1. – pp. 519–522.

125. Гаврильченко О. А. Трехмерное конечно-элементное моделирование процесса правки толстых листов на многороликовых правильных машинах / О. А. Гаврильченко // Наука и практика: проблемы, идеи, инновации : сборник тезисов. IV Международная научно-практическая конференция. – Чистополь : Филиал ИНЭКА, 2009. – С. 95–97.

126. Применение математической модели технологической настройки листопрямительной машины №1 ТЛС 3000 Алчевского металлургического комбината для правки термоупрочненных раскатов из трубных марок сталей / А. В. Сатонин [и др.]. // Удосконалення процесів та обладнання обробки тиском у машинобудуванні та металургії : зб. наук. пр. – Краматорськ : ДДМА, 2008. – С. 335–339.

127. Новик Ф. С. Оптимізація процесів технології металів методами планування експериментів / Ф. С. Новик, Я. Б. Арсов. – М. : Машинобудування. – Софія : Техніка, 1980. – 304 с.

128. Колесников А. Г. Особенности физического моделирования контролируемой прокатки / А. Г. Колесников, А. В. Мунтин, А. Г. Зинягин // Заготовительные производства в машиностроении. – 2013. – №. 1. – С. 32-35.

129. Контролируемая прокатка / В. И. Погоржельский, Д. А. Литвиненко, Ю. И. Матросов, А. В. Иваницкий. – М. : Металлургия, 1979. – 184 с.

130. Повышение качества и совершенствование марочного сортамента толстолиствого проката для газопроводных труб / Ю. И. Матросов [и др.]. // *Металлург.* – 2001. – № 2. – С. 37–40.

131. Коновалов Ю. В. Справочник прокатчика : справочное издание. В 2 к. К. 1. Производство горячекатаных листов и полос / Ю. В. Коновалов. – М. : Теплотехник, 2008. – 640 с.

132. Шестопалов А. В. Повышение качества и расширение сортамента толстолиствого металлопроката на основе совершенствования технологии и оборудования для его горячей правки : дисс. ... канд. техн. наук : 05.03.05 : защищена 26.06.07 ; утв. 11.10.07 / Шестопалов Андрей Владимирович. – Краматорск, 2007. – 211 с.

133. Новые разработки в технологии и оборудовании для горячей правки толстых листов / Ю. Н. Белобров, А. В. Шестопалов, А. В. Сатонин, А. А. Сатонин // *Прогрессивные технологии и оборудование в машиностроении и металлургии : сб. науч. тр.* – Липецк : ЛГТУ, 2006. – Ч. 2. – С. 35–39.

142. Золотухин Н. М. О подобии процессов горячего деформирования металлов / Н. М. Золотухин // *Кузнечно-штамповочное производство.* – 1960. – № 3. – С. 1–3.

143. Чекмарев А. П. Методы исследования процессов прокатки / А. П. Чекмарев, С. А. Ольдзиевский. – М. : Металлургия, 1969. – 274 с.

144. Шевакин Ю. Ф. Технологические измерения и приборы в прокатном производстве / Ю. Ф. Шевакин, А. М. Рытиков, Н. И. Касаткин. – М. : Металлургия, 1973. – 367 с.

145. Чиченев Н. А. Методы исследования процессов обработки металлов давлением / Н. А. Чиченев, А. Б. Кудрин, П. И. Полухин. – М. : Металлургия, 1977. – 312 с.

146. Айвазян С. А. Статистическое моделирование зависимостей / С. А. Айвазян. – М. : Металлургия, 1968. – 227 с.

147. Яблочкин А. Л. Общая теория статистики / А. Л. Яблочкин. – М. : Статистика, 1976. – 344 с.
148. Крамер Г. Математические методы статистики / Г. Крамер. – М. : Мир, 1975. – 648 с.
149. Бронштейн И. Н. Справочник по математике (для инженеров и учащихся вузов) / И. Н. Бронштейн, К. А. Семендяев. – М. : Наука, 1981. – 720 с.
150. Batty F. A. Heavy plate levelers / F. A. Batty, K. T. Lawson // *Journal of The Iron and Steel Institute*. – Nov, 1965. – P. 1115–1128.
151. Masing G. Wissenschaftliche Veröffentlichungen aus dem Siemens. Научные публикации концерна «Siemens» / G. Masing. – Konzern, 1926. – № 142.
152. Недорезов И. В. Моделирование процессов правки проката на роликовых правильных машинах / И. В. Недорезов. – Екатеринбург. – АКВА-ПРЕСС, 2003. – 256 с.
153. Straightening of Sheet with Correction of Waviness / A. V. Barabash, E. Yu. Gavril'chenko, E. P. Gribkov, O. E. Markov // *Steel in Translation*, 2014, Vol. 44, No. 12, pp. 916–920. ISSN 09670912 DOI: 10.3103/S096709121412002X Международная база научного итирования SCOPUS: <http://link.springer.com/article/10.3103%2FS096709121412002X>.
154. Федоринов В. А. Конечно-элементное моделирование процесса правки волнистости на листоправильных машинах / В. А. Федоринов, Е. Ю. Гаврильченко, А. В. Завгородний // *Обработка материалов давлением : сб. науч. тр.* – Краматорск : ДГМА, 2015. – № 2 (41). – С. 63–68. ISSN 2076-2151.
155. Боровік П. В. Теоретичні дослідження процесів обробки металів тиском на основі методу скінчених елементів : навчальний посібник / П. В. Боровік. – Алчевськ : ДонДТУ, 2012. – 170 с.

156. Lee J.-B. Numerical Modeling of Roller Leveler for Thick Plate Leveling / J.-B. Lee, S.-S. Kang // International Journal of Precision Engineering and Manufacturing. – 2018. – Vol. 19(3). – pp. 425–430. doi:10.1007/s12541-018-0051-x

157 Flatness defects after bridle rolls: a numerical analysis of leveling / N. Mathieu, R. Dimitriou, A. Parrico, M. Potier-Ferry, H. Zahrouni // International Journal of Material Forming. – 2013. – Vol. 6. – Issue 2. – pp. 255–266.

158 Грибков Э. П. Исследование влияния дискретности разбиения объема материала на точность расчета при конечно-элементном моделировании процесса правки толстых листов / Э. П. Грибков, Е. Ю. Гаврильченко // Научный вестник Донбасской государственной машиностроительной академии [Электронный ресурс]. – Краматорск : ДГМА, 2017. – № 2 (23Е). – С. 4–8.

159. Грибков Э. П. Исследование процесса правки волнистости листов на листоправильных машинах / Э. П. Грибков, Е. Ю. Гаврильченко // Вісник Херсонського національного технічного університету. – 2017. – № 2 (61). – С. 35–44.

160. Грибков Э. П. Экспериментальные исследования холодной правки на многороликовых листоправильных машинах / Э. П. Грибков, Е. Ю. Гаврильченко // X International Conference “Strategy of Quality in Industry and Education” June 6-13 2014, Varna, Bulgaria // International Scientific Journal Acta Universitatis Pontica Euxinus. Special Number. – pp. 53-57. – 978-617-518-288-8.

161. Грибков Э. П. Автоматизированное проектирование технологических настроек листоправильной машины / Э. П. Грибков, Е. Ю. Гаврильченко // Вісник Національного технічного університету "ХПІ". Серія : Інноваційні технології та обладнання обробки матеріалів у машинобудуванні та металургії. – 2017. – № 37 (1259). – С. 11-16.

162. Программное обеспечение для проектирования технологических параметров настройки многороликовых листопрямильных машин / Э. П. Грибков, А. В. Завгородний, Е. Ю. Гаврильченко, А. С. Горбенко // Научный Вестник ДГМА : сб. науч. тр. – Краматорск : ДГМА, 2015. – № 2 (17Е). – С. 33–38.

163. Доброносов Ю. К. Напряженно-деформированное состояние рабочего ролика листопрямильной машины при холодной правке с дифференцированным приложением силы по ширине листа / Ю. К. Доброносов, Е. Ю. Гаврильченко, И. А. Матвеев // Обработка материалов давлением : сб. научн. тр. – Краматорск : ДГМА, 2016. – № 1(42). – С. 203–207.

164. Грибков Э. П. Математическое моделирование профилирования ободьев колес / Э. П. Грибков, Е. Ю. Гаврильченко, Д. В. Мережко // Актуальные проблемы в машиностроении. – Новосибирск : НГТУ, 2016. – № 3. – С. 330–335.

165. Гаврильченко Е. Ю. Совершенствование технологических режимов работы листопрямильной машины 2800 Ашинского металлургического завода / Е. Ю. Гаврильченко, Э. П. Грибков, Д. В. Мережко // 41-я международная научно-техническая конференция молодежи. – Запорожсталь, 20 ноября, 2014. Тезисы докладов. – С. 42–43.

166. Гаврильченко Е. Ю. Математическая модель технологических настроек листопрямильной машины для правки продольной и поперечной кривизны листов / Е. Ю. Гаврильченко, Э. П. Грибков, Д. В. Мережко // 41-я международная научно-техническая конференция молодежи. – Запорожсталь, 20 ноября, 2014. Тезисы докладов. – С. 43–44.

167 Гаврильченко Е. Ю. Математическая модель технологических настроек листопрямильной машины для правки продольной и поперечной кривизны листов / Е. Ю. Гаврильченко // Материалы VI

Міжнародної науково-технічної конференції «Ресурсозбереження і енергоефективність процесів і обладнання обробки тиском в машинобудівній і металургій», 19-21 листопада, Харків, 2014.– С. 28–30.

168. Алямовський А. А. Інженерні розрахунки в SolidWorks Simulation / А. А. Алямовський. – М. : ДМК-Прес, 2010. – 230 с.

169. Алямовський А. А. SolidWorks Simulation. Інженерний аналіз для професіоналів: задачі, методи, рекомендації / А. А. Алямовський. – Litres, 2017. – 464 с.

170. Алямовський А. А. SolidWorks Simulation. Інженерний аналіз для професіоналів: задачі, методи, рекомендації / А. А. Алямовський. – М. : ДМК Прес, 2015. – 562 с.

171. Kurowski P. Engineering Analysis with SolidWorks Simulation 2013 / P. Kurowski. – SDC publications, 2013. – 487 p.

172. Shih R. Introduction to finite element analysis using solidworks simulation 2014 / R. Shih. – SDC publications, 2014. – 512 p.

173. Пат. № 82635, Україна, МПК В21D 11/08, В21D 11/128 (2006.01). Спосіб центрування затравки в районі вертикальної тягнутої кліти і район вертикальної тягнутої кліти / Гаврильченко Є. Ю., Гаврильченко О.О., Титаренко О. І., Євгіненко І. О., Смирнов В. Г. ; заявник та патентовласник Закрите акціонерне товариство "Новокраматорський машинобудівний завод". – № а200706726 ; заявл. 15.06.2007 ; опубл. 25.04.2008, Бюл. № 8.

174. Пат. № 70821, Україна, МПК В21D 1/02 (2006.01). Машина для виправлення сортового прокату / Алдохін Д. В., Євгіненко І. О., Гриценко С. А., Рева О. В., Гаврильченко Є. Ю., Шестопалов А. В., Филиппських А. М., Бобуліч В. С., Сілін Р. Є., Івчик Р. С. ; заявник та патентовласник Публічне акціонерне товариство "Новокраматорський машинобудівний завод". – № u201114727 ; заявл. 12.12.2011 ; опубл. 25.06.2012, Бюл. № 12.

175. Пат. № 98560, Україна, МПК В21D 3/02 (2006.01). Листоправильна машина / Гриценко С. А., Євгиненко І. О., Гаврильченко Є. Ю., А. Ф. Гончаренко, Послушник О. В. ; заявник та патентовласник Публічне акціонерне товариство "Новокраматорський машинобудівний завод". – № u201413602 ; заявл. 18.12.2014 ; опубл. 27.04.2015, Бюл. № 8.

176. Пат. № 119629, Україна, МПК В30В 3/00, В21D 5/00 (2006). Прес для правки товстих листів і плит / Гриценко С. А., Бердніков О. К., Гаврильченко Є. Ю., Послушник О. В., Татаренков С. Л. ; заявник та патентовласник Публічне акціонерне товариство "Новокраматорський машинобудівний завод". – № u201704860 ; заявл. 19.05.2017 ; опубл. 25.09.2017, Бюл. № 18.

ДОДАТКИ

**ПРОГРАМНІ ЗАСОБИ З АВТОМАТИЗОВАНОГО РОЗРАХУНКУ
НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ ТА ЕНЕРГОСИЛОВИХ
ПАРАМЕТРІВ ПРИ РЕАЛІЗАЦІЇ ПРОЦЕСУ ПРАВКИ**

```

Attribute VB_Name = "Module1"
Const n = 13, stepw = 0.01, H = 4, Dr = 210, t = 230, b =
2000
Const a0 = 460.4, a1 = 3874.8, a2 = -9651.3, a3 = 8554.7
'65G

Public x1, Xpre, Xmax As Single
Public Ep, ki As Single
Public i, j As Integer
Public c2, a, S, ss, stepp, Psum As Single
Public dx(n), k(n), W(n), c(n), al(n), bt(n), m(n),
Xmass(n), P(n) As Single
Public Br1 As Single
Public Gs(n), Gss(n), Gsr(n), eost(n), G(n), ex(n) As Sin-
gle

Public Mmax, Alfa, Beta, mm, kk, Fls As Single
Public mSmax, dxx, c11 As Single
Public Mnext, Mcurrent As Single
Sub main()
Open App.Path & "\res.txt" For Output As 1
Open App.Path & "\temp.txt" For Append As 2

Print #1, "h="; H; "a0="; a0; "a1="; a1
'Dr = 483

'Pravka-proekt.cpp
Dim X0min, X0max, Xset, Nset As Single
Dim Cupr, Rupr, R As Single
X0min = 0: X0max = 0.15: Xset = 0
Gs(0) = a0: Gss(0) = Gs(0): Gsr(0) = Gs(0)
Ep = 210000#
Nset = 2.2
c2 = 0
Br1 = 0.3

If Nset > 1 Then
    Cupr = Gs(0) * t ^ 2 / 12 / Ep / H
    Rupr = (Cupr ^ 2 * t ^ 2 / 4) / 2 / Cupr
    Do
        c2 = c2 + stepw
        R = (c2 ^ 2 + t ^ 2 / 4) / 2 / c2
    Loop While R > Rupr / Nset
Else
    c2 = Gs(0) ^ 2 / 4 / Ep / H

```

```

End If
c2 = Int(c2 / stepw) * stepw
If c2 > 30 Then c2 = 30
'Pravka-proekt.h
'c2 = Gs * t ^ 2 / 12 / Ep / H
W(0) = H - stepw
For i = 2 To n Step 2
    W(i) = 0
Next i
Alfa = 0.5 * 3.14 / 180
W(1) = 6 * t * Tan(Alfa): W(3) = 5 * t * Tan(Alfa): W(5) =
4 * t * Tan(Alfa): W(7) = 3 * t * Tan(Alfa): W(9) = 2 * t *
Tan(Alfa): W(11) = 6 * t * Tan(Alfa): W(13) = 0 'Its our exp
Call calc(H, Ep, Gs, X0min, W, t, x1)
Ax! = Abs(x1)
Call calc(H, Ep, Gs, X0max, W, t, x1)
Bx! = Abs(x1)
Xmax = max(Ax, Bx)
stepp = 100 * stepw
Call Energy(P)
For i = n To 1 Step -1: Print #1, "i="; i; "k="; Int(k(i)
* 1000) / 1000; "Gs="; Int(1000 * Gs(i)) / 1000; "w=";
Int(1000 * W(i)) / 1000, "P="; Int(P(i)) / 1000; " kN": Next
Print #1, "Alfa="; Atn((W(n - 2) - W(n)) / t) * 180 /
3.14; "grad"
For i = 1 To n: Psum = Psum + P(i): Next: Print #1,
"Psum="; Psum; "x0="; X0max, "x1="; x1 * 1000#
x0 = Xmax
Print #2, "h="; H; "al="; Atn((W(n - 2) - W(n)) / t) * 180
/ 3.14; "Psum="; Psum; "x0="; X0max, "x1="; x1 * 1000#
lmd = 150 'длина полуволны - при печати *2
a = 30 'амплитуда полуволны - при печати *2
Rokr = a / 2 + lmd ^ 2 / 8 / a
xx = (Rokr - a) / Rokr
teta = 2 * Atn(Sqr(1 - xx ^ 2) / xx)
S = Rokr * teta
L1 = S * 1000 / lmd
forma = (a * 1.2 / 2 / lmd) ^ 2 * 10000 / 0.5 / b
x0 = 1 / Rokr * 1000
Print #2, "lmd="; lmd * 2; "A="; a * 2; "R="; Int(Rokr *
10) / 10; "xi="; Int(1 / Rokr * 100000) / 100000; "L0="; 1000;
"pikov"; Int(1000 / lmd * 10) / 10; "L1="; Int(L1 * 10) / 10;
"F="; Int(forma * 100) / 100; "mon"; " Teta="; Int(teta * 180
/ 3.14 * 10) / 10
xlsr = x1
Call calc(H, Ep, Gs, x0, W, t, x1)
Next
Print #2, "pohybka "; (xlsr - x1) / x1 * 100; "%"
End Sub

Public Function fil(mm)
If Abs(mm) < 1 Then fil = mm ^ 2 / 2
If Abs(mm) > 1 Then fil = 1.5 - Sqr(3 - 2 * mm)

```

```

End Function
Public Function fi2(mm)
If Abs(mm) < 1 Then fi2 = mm ^ 3 / 6
If Abs(mm) > 1 Then fi2 = 1.5 * mm + ((3 - 2 * mm) ^ 1.5 -
5) / 3
End Function
Public Function fi(kk)
If Abs(kk) < 1 Then fi = kk
If Abs(kk) > 1 Then fi = (3 - 1 / kk ^ 2) / 2
End Function
Public Function max(aa, bb)
If aa > bb Then max = aa Else max = bb
End Function
Public Function F1(Mnext, Mcurrent, Mmax, ki, i, k0, j)
If Abs(Mnext) <= Mmax Then
    F1 = 8 * fil((Mnext + Mcurrent) / 2) / (Mnext + Mcur-
rent)
Else
    c1! = (Mcurrent + Mmax) / 2
    cc2! = Mnext - Mmax
    c3! = 8 * fil(c1) + 2 * fil(Mnext) - 2 * fil(Mmax) + 2
* cc2 * (ki + (-1) ^ i * k0)
    F1 = c3 / (Mcurrent + Mnext)
End If
End Function
Public Function F2(Mnext, Mcurrent, Mmax, ki, k0, i, j)
If Abs(Mnext) <= Mmax Then
    F2 = 16 * fi2((Mnext + Mcurrent) / 2) / (Mnext + Mcur-
rent) ^ 2
Else
    cc! = Abs(Mnext) / Mnext * Mmax
    c1! = (Mcurrent + cc) / 2
    cc2! = Mnext - cc
    cc = 16 * fi2(c1) + 2 * fi2(Mnext) - 2 * fi2(cc) + 2 *
cc2 * (4 * fi(c1) - fil(c)) + cc2 ^ 2 * (ki + (-1) ^ i * k0)
    F2 = cc / (Mnext + Mcurrent) ^ 2
End If
End Function

Public Function f(kkk!)
If Abs(kkk) <= 1 Then f = kkk Else f = (3 - 1 / kkk ^ 2) /
2
End Function
Public Function ff1(kkk!)
c1! = Sqr(kkk + 1 / 27)
c2! = Sqr(kkk)
ff1 = 2 / ((c1 + c2) ^ (2 / 3) + (c1 - c2) ^ (2 / 3) + 1 /
3) - 1
End Function
Public Function ff2(kkk!)
ff2 = (Atn(Sqr(1 - kkk ^ 2) / kkk) + Sqr(1 - kkk ^ 2)) /
3.1416
End Function

```

```

Public Function ff3(kkk!)
c1! = 0.373 * (2 - 3 * kkk + kkk ^ 3)
c2! = 0.44 * (Atn(Sqr(1 - kkk ^ 2) / kkk) - kkk * Sqr(1 -
kkk ^ 2))
ff3 = (1 + kkk) * (1 - kkk ^ 2) ^ 0.75 + c1 + c2
End Function

Public Sub calc(H, Ep, Gs, x0, W, t, x1)
'PravkaCalc.h
'For i = 1 To n Step 2
'    c(i) = H - (W(i - 1) - W(i))
'    If i < n Then c(i + 1) = H - (W(i + 1) - W(i))
'Next i
For i = 1 To n Step 2
    c(i) = H - (W(i) - W(i - 1))
    If i < n Then c(i + 1) = H - (W(i) - W(i + 1))
Next i

'k0! = Ep * H * x0 / 2000 / Gs
k0! = Ep * H * x0 / 2 / Gs(0)
k(1) = k0
Kmax! = Ep * H / Gs(0) / (Dr + H)
For i = 1 To n
    'do
    k(i) = c(i) / (Gs(i - 1) * t ^ 2 / 12 / Ep / H)
    ki = k(i)
    Call GsGs(i, ki, x0, eost, Gsr, Gss, Gs, ex, Br1)
    'Loop While Abs(Gs(i) - Gs0) > 1
    m(i) = k(i)
    If k(i) < 0 Then k(i) = 0.0001: m(i) = 0.0001
    If k(i) > 1.5 Then k(i) = 1.5: m(i) = 1.5
Next i
al(0) = 0
For i = 1 To n
    al(i) = 2 * Atn(c(i) / t)
    bt(i) = -al(i)
Next i
iter% = 0
Do
    iter = iter + 1: j = 1: i = 2
    Beta = bt(0)
    Alfa = al(1)
    mm = m(1)
    Mmax = 0
    'dxx = t + (Dr + h) * Sin(Beta) / 2 - (Dr + h) *
Sin(Alfa) / 2
    'c11 = c(i) - (Dr + h) * Sin(Beta / 2) ^ 2 - (Dr + h)
* Sin(Alfa / 2) ^ 2
    a = t + (Dr + H) * Sin(Beta) - (Dr + H) * Sin(Alfa)
    a = a * Gs(i) / Ep / H * (k0 / 2 - (fi1(mm) + fi2(mm))
/ mm ^ 2)

```

```

a = a + 2 / (t + (Dr + H) * Sin(Beta) - (Dr + H) *
Sin(Alfa)) * (c(i) - (Dr + H) * Sin(Beta / 2) ^ 2 - (Dr + H) *
Sin(Alfa / 2) ^ 2)
Alfa = Alfa - (Alfa - Atn(a)) / (1 + (Dr + H) / t * a)
Beta = Atn(2 * (t + (Dr + H) * Sin(Beta) - (Dr + H) *
Sin(Alfa)) * Gs(i) / Ep / H * (k0 - fil(mm) / mm) - Tan(Alfa))
S = Abs(Beta - bt(0)) + Abs(Alfa - al(1))
bt(0) = Beta
al(1) = Alfa
ss = S
For i = 2 To n
    j = -1 * j
    Beta = Alfa
    Alfa = al(i)
    mSmax = max(Abs(m(i - 1)), Mmax)
    dxx = t + 0.5 * (Dr + H) * Sin(Alfa) - 0.5 * (Dr +
H) * Sin(Alfa)
    c11 = c(i) - (Dr + H) * Sin(Alfa / 2) ^ 2 - (Dr +
H) * Sin(Alfa / 2) ^ 2
    kk = Ep * H / Gs(i - 1) / dxx * (c11 / dxx +
Tan(Alfa)) + F2(m(i - 1), m(i), mSmax, k(i - 1), k0, i, j)
    Call GsGs(i, kk, x0, east, Gsr, Gss, Gs, ex, Br1)
    'kk = 2 * ((2 / (t + (Dr + h) * Sin(Beta) - (Dr +
h) * Sin(Alfa)) * (c(i) - (Dr + h) * Sin(Beta / 2) ^ 2 - (Dr +
h) * Sin(Alfa / 2) ^ 2)) + Tan(Beta))
    'kk=kk/
    '(Mnext!, Mcurrent!, Mmax, ki!, k0, i, j%)
    If kk > Kmax Then
        kk = Kmax: Beta = bt(i - 1)
        dxx = t + (Dr + H) * Sin(Beta) / 2 - (Dr + H) *
Sin(Alfa) / 2
        c11 = c(i) - (Dr + H) * Sin(Beta / 2) ^ 2 - (Dr
+ H) * Sin(Alfa / 2) ^ 2
    End If
    mm = 2 * f(k(i - 1) / 2 + kk / 2) - m(i - 1)
    If Abs(mm) > Mmax Then mm = f(kk + (-1) ^ j * k0):
Mmax = Abs(mm)
    k(i - 1) = kk
    m(i - 1) = mm
    Fls = F1(m(i - 1), m(i), Mmax, k(i - 1), i, k0, j)
        '(Mnext!, Mcurrent!, Mmax, ki!, i, k0,
j%)
    a = (Gs(i) / Ep / H * dxx) * (kk - Fls + F2(m(i -
1), m(i), Mmax, k(i - 1), k0, i, j)) + c11 / dxx
    Alfa = Alfa - (Alfa - Atn(a)) / (1 + 0.5 * (Dr +
H) / t * a)
    Beta = Atn((Gs(i) / Ep / H * dxx) * (kk - Fls) -
Tan(Alfa))
    S = S + Abs(Beta - bt(i - 1)) + Abs(Alfa - al(i))
    bt(i - 1) = Beta
    al(i - 1) = Alfa
Next i

```

```

Loop While (S = 0) Or (iter < 12) Or (S < ss)
k(n - 1) = m(n - 2) - k(n - 2)
'x1 = 2000 * Gs / Ep / H * k(n - 1)
x1 = 2 * Gs(n - 1) / Ep / H * k(n - 1)
End Sub
Public Sub GsGs(i, ki, x0, eost, Gsr, Gss, Gs, ex, Br1)
Dim e As Single
'For i = 1 To n
    flag% = 0
    e = 2 * (ki * Gs(i - 1) / Ep - x0) / (2 + x0 * H)
    'Elastic-plastic deformation of stretch
    If e > eost(i - 1) + Gsr(i - 1) / Ep Then
        ex(i) = e - eost(i - 1) - Gsr(i - 1) / Ep
        G(i) = Gsr(i - 1) + a1 * ex(i) + a2 * ex(i) ^ 2 +
a3 * ex(i) ^ 3
        eost(i) = e - G(i) / Ep
        Gsr(i) = G(i)
        Gss(i) = Gss(i - 1) - (G(i) - Gsr(i - 1)) * (1 -
Br1)

        Gs(i) = max(Gsr(i), Gss(i))
        flag% = 1
    End If
    If flag% < 1 Then
        'Elastic deformation
        If e >= eost(i - 1) + Gss(i - 1) / Ep And e <= eost(i -
1) + Gsr(i - 1) / Ep Then
            G(i) = Ep * (e - eost(i - 1))
            eost(i) = eost(i - 1)
            Gsr(i) = Gsr(i - 1)
            Gss(i) = Gss(i - 1)
            Gs(i) = max(Gsr(i), Gss(i))
            flag% = 0
        End If
    End If
    If flag% < 1 Then
        'Elastic-plastic deformation of compresion
        If e < eost(i - 1) + Gss(i - 1) / Ep Then
            ex(i) = e - eost(i - 1) - Gss(i - 1) / Ep
            G(i) = Gss(i - 1) + a1 * ex(i) + a2 * ex(i) ^ 2 +
a3 * ex(i) ^ 3
            eost(i) = e - G(i) / Ep
            Gss(i) = G(i)
            Gsr(i) = Gsr(i - 1) - (G(i) - Gss(i - 1)) * (1 -
Br1)

            Gs(i) = max(Gsr(i), Gss(i))
        End If
        flag% = -1
    End If
    'ee = ee + Abs(ex(i))
'Next
End Sub
Public Sub Energy(P)

```

```

i = 1
dx(i) = t
P(i) = m(i) * H / 6 / dx(i)
P(i) = P(i) * Gs(i) * b * H * 2
For i = 2 To n - 1
  ' If i = 3 Or i = 5 Then Dr = 445
  '   If i = 2 Or i = 4 Then Dr = 368
  '   If i = 7 Then Dr = 483
  dx(i) = t + (Dr + H) * Sin(bt(i)) / 2 - (Dr + H) *
Sin(al(i + 1)) / 2
  P(i) = (m(i - 1) + m(i)) * H / 6 / dx(i - 1) + (m(i) +
m(i + 1)) * H / 6 / dx(i)
  P(i) = P(i) * Gs(i) * b * H * 2
Next
i = n
P(i) = m(i) * H / 6 / dx(i - 1)
P(i) = P(i) * Gs(i) * b * H * 2
End Sub

```

ПРОГРАМНІ ЗАСОБИ З АВТОМАТИЗОВАНОГО РОЗРАХУНКУ
НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ ТА ОСНОВНИХ
ПОКАЗНИКІВ ЯКОСТІ ПРИ РЕАЛІЗАЦІЇ ПРОЦЕСІВ ПРАВКИ
ВІДНОСНО ТОВСТИХ ЛИСТІВ І ШТАБ

```

Attribute VB_Name = "Module1"
Const n = 13, stepw = 0.001, Dr = 210, t = 230
Const a0 = 372.4, a1 = 3328, a2 = -19595.2, a3 = 13444.4 '45
Public x1, Xpre, Xmax, h As Single
Public Ep, ki As Single
Public i, j As Integer
Public c2, a, S, ss, stepp As Single
Public dx(n), k(n), W(n), c(n), al(n), bt(n), m(n), Xmass(n), P(n) As Single
Public Br1 As Single
Public Gs(n), Gss(n), Gsr(n), east(n), G(n), ex(n) As Single
Public Mmax, Alfa, Beta, mm, kk, F1s As Single
Public mSmax, dxx, c11 As Single
Public Mnext, Mcurrent As Single
Sub main()
Open App.Path & "\res.txt" For Output As 1
Dim X0min, X0max, Xset, Nset As Single
Dim Cupr, Rupr, R As Single
X0min = 0: X0max = 0.15: Xset = 0
Gs(0) = a0: Gss(0) = Gs(0): Gsr(0) = Gs(0)
Ep = 210000#
b=2850
Nset = 4
c2 = 0
Br1 = 0.3
If Nset > 1 Then
    Cupr = Gs(0) * t ^ 2 / 12 / Ep / h
    Rupr = (Cupr ^ 2 * t ^ 2 / 4) / 2 / Cupr
    Do
        c2 = c2 + stepw
        R = (c2 ^ 2 + t ^ 2 / 4) / 2 / c2
    Loop While R > Rupr / Nset
Else
    c2 = Gs(0) ^ 2 / 4 / Ep / h
End If
c2 = Int(c2 / stepw) * stepw
If c2 > 30 Then c2 = 30
'Pravka-proekt.h
'c2 = Gs * t ^ 2 / 12 / Ep / H
W(0) = h - stepw
For i = 2 To n Step 2
    W(i) = 0

```



```

Next i
For i = 1 To n Step 2
    W(i) = h - c2
Next i
Call calc(h, Ep, Gs, X0min, W, t, x1)
Ax! = Abs(x1)
Call calc(h, Ep, Gs, X0max, W, t, x1)
Bx! = Abs(x1)
Xmax = max(Ax, Bx)
stepp = 10 * stepw
Do While stepp >= stepw
    Do
        Xpre = Xmax
        For i = 3 To n Step 2
            W(i) = W(i) + (i - 2) * stepp
        Next
        Call calc(h, Ep, Gs, X0min, W, t, x1)
        Ax = Abs(x1)
        Call calc(h, Ep, Gs, X0max, W, t, x1)
        Bx = Abs(x1)
        Xmax = max(Ax, Bx)
        Alfa = Atn((W(11) - W(5)) / t) * 180 / 3.14
    Loop While Xmax <= Xpre And Xmax > Xset
    For i = 3 To n Step 2
        W(i) = W(i) - (i - 2) * stepp
    Next
    Call calc(h, Ep, Gs, X0min, W, t, x1)
    Ax = Abs(x1)
    Call calc(h, Ep, Gs, X0max, W, t, x1)
    Bx = Abs(x1)
    Xmax = max(Ax, Bx)
    stepp = stepp * 0.1
Loop
For i = 3 To n Step 2
    W(i) = W(i) - (i - 2) * stepp
Next
Call calc(h, Ep, Gs, X0min, W, t, x1)
Ax = Abs(x1)
Call calc(h, Ep, Gs, X0max, W, t, x1)
Bx = Abs(x1)
Xmax = max(Ax, Bx)
For i = 1 To n
    x0 = W(i)
Next
Call Energy(P)
For i = 1 To n: Print #1, "i="; i; "k="; Int(k(i) * 1000) / 1000; "Gs="; Int(1000 * Gs(i))
/ 1000; "w="; Int(1000 * W(i)) / 1000, "P="; Int(P(i)) / 1000; " kN": Next
Alfa = Atn((W(11) - W(5)) / t) * 180 / 3.14
Print #1, "Alfa="; Int(Alfa * 1000#) / 1000#; "grad"
x0 = Xmax
Print #1, "Xmax="; Int(Xmax * 1000000000#) / 1000000#; "1/m"
Call Pirson(h, b, n, P)

```

```

End Sub

Public Function fi1(mm)
If Abs(mm) <= 1 Then fi1 = mm ^ 2 / 2
If Abs(mm) > 1 Then fi1 = 1.5 - Sqr(3 - 2 * Abs(mm))
End Function
Public Function fi2(mm)
If Abs(mm) <= 1 Then fi2 = mm ^ 3 / 6
If Abs(mm) > 1 Then fi2 = 1.5 * mm + ((3 - 2 * mm) ^ 1.5 - 5) / 3 '
(9*mm+sgn(mm)*(2*(3-2*abs(mm)^1.5-10))/6'Egrv
End Function
Public Function fi(kk)
If Abs(kk) < 1 Then fi = kk
If Abs(kk) > 1 Then fi = (3 - 1 / kk ^ 2) / 2 '=sgn(kk)/sqr(3-2*abs(kk))'egrv
End Function
Public Function max(aa, bb)
If aa > bb Then max = aa Else max = bb
End Function
Public Function F1(Mnext, Mcurrent, Mmax, ki, i, k0, j)
If Abs(Mnext) <= Mmax Then
F1 = 8 * fi1((Mnext + Mcurrent) / 2) / (Mnext + Mcurrent)
Else
c1! = Sgn(Mnext) * (Mcurrent + Mmax) / 2
cc2! = Mnext - Mmax
c3! = 8 * fi1(c1) + 2 * fi1(Mnext) - 2 * fi1(Mmax) + 2 * cc2 * (ki + (-1) ^ i * k0)
F1 = c3 / (Mcurrent + Mnext)
'c2=4*fi1((
End If
End Function
Public Function F2(Mnext, Mcurrent, Mmax, ki, k0, i, j)
If Abs(Mnext) <= Mmax Then
F2 = 16 * fi2((Mnext + Mcurrent) / 2) / (Mnext + Mcurrent) ^ 2
Else
cc! = Abs(Mnext) / Mnext * Mmax
c1! = (Mcurrent + cc) / 2
cc2! = Mnext - cc
cc = 16 * fi2(c1) + 2 * fi2(Mnext) - 2 * fi2(cc) + 2 * cc2 * (4 * fi1(c1) - fi1(c)) +
cc2 ^ 2 * (ki + (-1) ^ i * k0)
F2 = cc / (Mnext + Mcurrent) ^ 2
End If
End Function

Public Function f(kkk!)
If Abs(kkk) <= 1 Then f = kkk Else f = Sgn(kkk) * (3 - 1 / kkk ^ 2) / 2
End Function
Public Function ff1(kkk!)
c1! = Sqr(kkk + 1 / 27)
c2! = Sqr(kkk)
ff1 = 2 / ((c1 + c2) ^ (2 / 3) + (c1 - c2) ^ (2 / 3) + 1 / 3) - 1
End Function
Public Function ff2(kkk!)
ff2 = (Atn(Sqr(1 - kkk ^ 2) / kkk) + Sqr(1 - kkk ^ 2)) / 3.1416

```

```

End Function
Public Function ff3(kkk!)
c1! = 0.373 * (2 - 3 * kkk + kkk ^ 3)
c2! = 0.44 * (Atn(Sqr(1 - kkk ^ 2) / kkk) - kkk * Sqr(1 - kkk ^ 2))
ff3 = (1 + kkk) * (1 - kkk ^ 2) ^ 0.75 + c1 + c2
End Function

Public Sub calc(h, Ep, Gs, x0, W, t, x1)
For i = 1 To n Step 2
    c(i) = h - (W(i) - W(i - 1))
    If i < n Then c(i + 1) = h - (W(i) - W(i + 1))
Next i
k0! = Ep * h * x0 / 2 / Gs(0)
k(1) = k0
Kmax! = Ep * h / Gs(0) / (Dr + h)
For i = 1 To n
    k(i) = c(i) / (Gs(i - 1) * t ^ 2 / 12 / Ep / h)
    ki = k(i)
    Call GsGs(i, ki, x0, east, Gsr, Gss, Gs, ex, Br1)
    m(i) = k(i)
    If k(i) < 0 Then k(i) = 0.0001: m(i) = 0.0001
    If k(i) > 1.5 Then k(i) = 1.5: m(i) = 1.5
Next i
al(0) = 0
For i = 1 To n
    al(i) = 2 * Atn(c(i) / t)
    bt(i) = -al(i)
Next i
iter% = 0
Do
    iter = iter + 1: j = 1: i = 2
    Beta = bt(0)
    Alfa = al(1)
    mm = m(1)
    Mmax = 0
    a = t + (Dr + h) * Sin(Beta) - (Dr + h) * Sin(Alfa)
    a = a * Gs(i) / Ep / h * (k0 / 2 - (fi1(mm) + fi2(mm)) / mm ^ 2)
    a = a + 2 / (t + (Dr + h) * Sin(Beta) - (Dr + h) * Sin(Alfa)) * (c(i) - (Dr + h) *
Sin(Beta / 2) ^ 2 - (Dr + h) * Sin(Alfa / 2) ^ 2)
    Alfa = Alfa - (Alfa - Atn(a)) / (1 + (Dr + h) / t * a)
    Beta = Atn(2 * (t + (Dr + h) * Sin(Beta) - (Dr + h) * Sin(Alfa)) * Gs(i) / Ep / h * (k0
- fi1(mm) / mm) - Tan(Alfa))
    S = Abs(Beta - bt(0)) + Abs(Alfa - al(1))
    bt(0) = Beta
    al(1) = Alfa
    ss = S
For i = 2 To n
    j = -1 * j
    Beta = Alfa
    Alfa = al(i)
    mSmax = max(Abs(m(i - 1)), Mmax)

```

```

dxx = t + 0.5 * (Dr + h) * Sin(Alfa) - 0.5 * (Dr + h) * Sin(Alfa)
c11 = c(i) - (Dr + h) * Sin(Alfa / 2) ^ 2 - (Dr + h) * Sin(Alfa / 2) ^ 2
kk = Ep * h / Gs(i - 1) / dxx * (c11 / dxx + Tan(Alfa)) + F2(m(i - 1), m(i),
mSmax, k(i - 1), k0, i, j)
Call GsGs(i, kk, x0, east, Gsr, Gss, Gs, ex, Br1)
If kk > Kmax Then
    kk = Kmax: Beta = bt(i - 1)
    dxx = t + (Dr + h) * Sin(Beta) / 2 - (Dr + h) * Sin(Alfa) / 2
    c11 = c(i) - (Dr + h) * Sin(Beta / 2) ^ 2 - (Dr + h) * Sin(Alfa / 2) ^ 2
End If
mm = 2 * f(k(i - 1) / 2 + kk / 2) - m(i - 1)
If Abs(mm) > Mmax Then mm = f(kk + (-1) ^ j * k0): Mmax = Abs(mm)
k(i - 1) = kk
m(i - 1) = mm
F1s = F1(m(i - 1), m(i), Mmax, k(i - 1), i, k0, j)
    '(Mnext!, Mcurrent!, Mmax, ki!, i, k0, j%)
a = (Gs(i) / Ep / h * dxx) * (kk - F1s + F2(m(i - 1), m(i), Mmax, k(i - 1), k0, i, j))
+ c11 / dxx
Alfa = Alfa - (Alfa - Atn(a)) / (1 + 0.5 * (Dr + h) / t * a)
Beta = Atn((Gs(i) / Ep / h * dxx) * (kk - F1s) - Tan(Alfa))
S = S + Abs(Beta - bt(i - 1)) + Abs(Alfa - al(i))
bt(i - 1) = Beta
al(i - 1) = Alfa
Next i
Loop While (S = 0) Or (iter < 12) Or (S < ss)
k(n - 1) = m(n - 2) - k(n - 2)
x1 = 2000 * Gs / Ep / H * k(n - 1)
End Sub
Public Sub GsGs(i, ki, x0, east, Gsr, Gss, Gs, ex, Br1)
Dim e As Single
'For i = 1 To n
    flag% = 0
    e = 2 * (ki * Gs(i - 1) / Ep - x0) / (2 + x0 * h)
    'Elastic-plastic deformation of stretch
    If e > east(i - 1) + Gsr(i - 1) / Ep Then
        ex(i) = e - east(i - 1) - Gsr(i - 1) / Ep
        G(i) = Gsr(i - 1) + a1 * ex(i) + a2 * ex(i) ^ 2 + a3 * ex(i) ^ 3
        east(i) = e - G(i) / Ep
        Gsr(i) = G(i)
        Gss(i) = Gss(i - 1) - (G(i) - Gsr(i - 1)) * (1 - Br1)
        Gs(i) = max(Gsr(i), Gss(i))
        flag% = 1
    End If
    If flag% < 1 Then
        'Elastic deformation
        If e >= east(i - 1) + Gss(i - 1) / Ep And e <= east(i - 1) + Gsr(i - 1) / Ep Then
            G(i) = Ep * (e - east(i - 1))
            east(i) = east(i - 1)
            Gsr(i) = Gsr(i - 1)
            Gss(i) = Gss(i - 1)
            Gs(i) = max(Gsr(i), Gss(i))
            flag% = 0
        End If
    End If
Next i

```

```

End If
End If
If flag% < 1 Then
'Elastic-plastic deformation of compression
If e < eost(i - 1) + Gss(i - 1) / Ep Then
  ex(i) = e - eost(i - 1) - Gss(i - 1) / Ep
  G(i) = Gss(i - 1) + a1 * ex(i) + a2 * ex(i) ^ 2 + a3 * ex(i) ^ 3
  eost(i) = e - G(i) / Ep
  Gss(i) = G(i)
  Gsr(i) = Gsr(i - 1) - (G(i) - Gss(i - 1)) * (1 - Br1)
  Gs(i) = max(Gsr(i), Gss(i))
End If
flag% = -1
End If
'ee = ee + Abs(ex(i))
'Next
End Sub
Public Sub Energy(P)
i = 1
dx(i) = t
P(i) = m(i) * h / 6 / dx(i)
P(i) = P(i) * Gs(i) * b * h
For i = 2 To n - 1
  dx(i) = t + (Dr + h) * Sin(bt(i)) / 2 - (Dr + h) * Sin(al(i + 1)) / 2
  P(i) = (m(i - 1) + m(i)) * h / 6 / dx(i - 1) + (m(i) + m(i + 1)) * h / 6 / dx(i)
  P(i) = P(i) * Gs(i) * b * h
Next
i = n
P(i) = m(i) * h / 6 / dx(i - 1)
P(i) = P(i) * Gs(i) * b * h
End Sub
Public Sub Pirson(h, b, n, P) 'Блок по расчету настройки изгиба роликов
Dim P_x1, P_x2, P_x3, P_x4, P_x5 As Single
Dim b1, b2, b3, b4, b5, b0 As Single
Dim b12, b13, b14, b15, b23, b24, b25, b34, b35, b45 As Single
Dim b11, b22, b33, b44, b55 As Single
Dim Pirs_y, Pirs_L1 As Single
Dim Pirs_W, Pirs_dW(13), Pirs_L0 As Single
Dim Fpirson(500), Pirs_a1(500), dWmax(13) As Single
b1 = -0.001852
b2 = -0.001852
b3 = -0.00459
b4 = -0.00154
b5 = 0.009718
b12 = -0.0005625
b13 = -0.001187
b14 = -0.0009375
b15 = -0.001687
b23 = -0.001312
b24 = -0.0005625
b25 = -0.001812
b34 = -0.002188

```

```

b35 = -0.001188
b45 = -0.0001875
b11 = -0.000296
b22 = -0.0003538
b33 = -0.0005632
b44 = -0.0003754
b55 = -0.0003177
b0 = 1.009
Pirs_stepw = 0.1
Pirs_a = 60 'амплитуда mm/m
Pirs_L0 = 1 + (3.1416 / 2000) ^ 2 * Pirs_a ^ 2 'Вытяжка по Pirson (baza-1m)
'dWmax = 3 'мм из условия прочности рабочих роликов
F0 = (Pirs_L0 - 1) / b * 10000#
j = 1
For i = 1 To n Step 2 'Прикидываем какая планшетность будет при максимально
возможных прогибах
    dWmax(i) = Abs(P(i)) / 2 * (b / 2) ^ 3 / 3 / 210000# / (0.1 * 210 ^ 3)
    If dWmax(i) > 3 Then dWmax(i) = 3
    Pirs_dW(i) = 0
    Pirs_W = W(i)
    P_x1 = (h - 7) / 3
    P_x2 = (Pirs_W / h - 0.5) / 0.5
    P_x3 = (Pirs_dW(i) - 5) / 5
    P_x4 = (b - 2175) / 675
    P_x5 = (Pirs_L0 - 1.015) / 0.015
    Pirs_y = b0 + b1 * P_x1 + b2 * P_x2 + b3 * P_x3 + b4 * P_x4 + b5 * P_x5
    Pirs_y = Pirs_y + b11 * P_x1 ^ 2 + b22 * P_x2 ^ 2 + b33 * P_x3 ^ 2 + b44 * P_x4 ^
2 + b55 * P_x5 ^ 2 + b12 * P_x1 * P_x2 + b13 * P_x1 * P_x3 + b14 * P_x1 * P_x4
    Pirs_y = Pirs_y + b15 * P_x1 * P_x5 + b23 * P_x2 * P_x3 + b24 * P_x2 * P_x4 +
b25 * P_x2 * P_x5 + b34 * P_x3 * P_x4 + b35 * P_x3 * P_x5 + b45 * P_x4 * P_x5
    If Pirs_y <= 1 Then MsgBox ("Ошибка при расчете вытяжки по Пирсону"): Exit
For
    Pirs_L1 = Pirs_y
    Fpirson(j) = (Pirs_L1 - 1) / b * 100000#
    Pirs_a1(j) = 2000 / 3.1416 * Sqr(Pirs_L1 - 1)
    Pirs_L0 = Pirs_L1
Next
Do
    j = j + 1
    If j = 500 Then Exit Do
    Pirs_L0 = 1 + (3.1416 / 2000) ^ 2 * Pirs_a ^ 2 'Вытяжка по Pirson (baza-1m)
    For i = 1 To n Step 2

        Pirs_W = W(i)
        Pirs_dW(i) = Pirs_dW(i) + Pirs_stepw
        If Pirs_dW(i) < 0 Or Pirs_dW(i) > dWmax(i) Then Exit Do
        P_x1 = (h - 7) / 3
        P_x2 = (Pirs_W / h - 0.5) / 0.5
        P_x3 = (Pirs_dW(i) - 5) / 5
        P_x4 = (b - 2175) / 675
        P_x5 = (Pirs_L0 - 1.015) / 0.015

```

```

    Pirs_y = b0 + b1 * P_x1 + b2 * P_x2 + b3 * P_x3 + b4 * P_x4 + b5 * P_x5
    Pirs_y = Pirs_y + b11 * P_x1 ^ 2 + b22 * P_x2 ^ 2 + b33 * P_x3 ^ 2 + b44 * P_x4 ^
2 + b55 * P_x5 ^ 2 + b12 * P_x1 * P_x2 + b13 * P_x1 * P_x3 + b14 * P_x1 * P_x4
    Pirs_y = Pirs_y + b15 * P_x1 * P_x5 + b23 * P_x2 * P_x3 + b24 * P_x2 * P_x4 +
b25 * P_x2 * P_x5 + b34 * P_x3 * P_x4 + b35 * P_x3 * P_x5 + b45 * P_x4 * P_x5
    If Pirs_y <= 1 Then MsgBox ("Ошибка при расчете вытяжки по Пирсону"): Exit
For
    Pirs_L1 = Pirs_y
    Fpirson(j) = (Pirs_L1 - 1) / b * 100000#
    Pirs_a1(j) = 2000 / 3.1416 * Sqr(Pirs_L1 - 1)
    Pirs_L0 = Pirs_L1
    Next
Loop While Fpirson(j) < Fpirson(j - 1)

    Pirs_L0 = 1 + (3.1416 / 2000) ^ 2 * Pirs_a ^ 2 'Вытяжка по Pirson (baza-1m)
    For i = 1 To n Step 2
    Pirs_W = W(i)
    Pirs_dW(i) = Pirs_dW(i) + Pirs_stepw / 2
    P_x1 = (h - 7) / 3
    P_x2 = (Pirs_W / h - 0.5) / 0.5
    P_x3 = (Pirs_dW(i) - 5) / 5
    P_x4 = (b - 2175) / 675
    P_x5 = (Pirs_L0 - 1.015) / 0.015
    Pirs_y = b0 + b1 * P_x1 + b2 * P_x2 + b3 * P_x3 + b4 * P_x4 + b5 * P_x5
    Pirs_y = Pirs_y + b11 * P_x1 ^ 2 + b22 * P_x2 ^ 2 + b33 * P_x3 ^ 2 + b44 * P_x4 ^
2 + b55 * P_x5 ^ 2 + b12 * P_x1 * P_x2 + b13 * P_x1 * P_x3 + b14 * P_x1 * P_x4
    Pirs_y = Pirs_y + b15 * P_x1 * P_x5 + b23 * P_x2 * P_x3 + b24 * P_x2 * P_x4 +
b25 * P_x2 * P_x5 + b34 * P_x3 * P_x4 + b35 * P_x3 * P_x5 + b45 * P_x4 * P_x5
    If Pirs_y <= 1 Then Exit For
    Pirs_L1 = Pirs_y
    Fpirson(i) = (Pirs_L1 - 1) / b * 100000#
    Fpirson(i) = Int(Fpirson(i) * 100000#) / 100000#
    Pirs_a1(i) = 2000 / 3.1416 * Sqr(Pirs_L1 - 1)
    Pirs_a1(i) = Int(Pirs_a1(i) * 10000) / 10000
    Print #1, "i="; i; "W="; Pirs_W; "dW="; Pirs_dW(i); " lmd0="; Pirs_L0; "lmd1=";
Int(Pirs_L1 * 100000#) / 100000#; "F(Pirson)="; Int(Fpirson(i) * 100000#) / 100000#; "mon
A1="; Pirs_a1(i)
    Pirs_L0 = Pirs_L1
    Next
End Sub

```

Додаток В

ПРИНЦИП РОБОТИ, ОПИС ТА ОБМЕЖЕННЯ ПРОГРАМНОГО
ПРОДУКТУ SETLEVELERS.DLL

Даний програмний продукт призначений для автоматизованого проектування технологічних режимів налаштувань при реалізації процесів правки листів на багатороликових машинах.

Вихідні дані для розрахунку

Найменування	Позначення в програмі	Одиниці виміру	Розрахунковий діапазон
Кількість роликів	n	—	5; 9
Крок роликів	t	мм	380; 760
Діаметр роликів	d	мм	360
Товщина листу	h	мм	5...70
Ширина листу	b	мм	1500...2500
Температура прокату	temp _{ра}	град. Цельсію	600...850
Напруження плинності матеріалу прокату за даних умов	Gs ₀	МПа	200...850

Даний програмний продукт був розроблений з урахуванням умов роботи ЛПМ№1 ТЛС2800 АМЗ, тому для спрощення роботи програми і зменшення часу розрахунку були прийняті наступні незмінні вихідні дані для розрахунку:

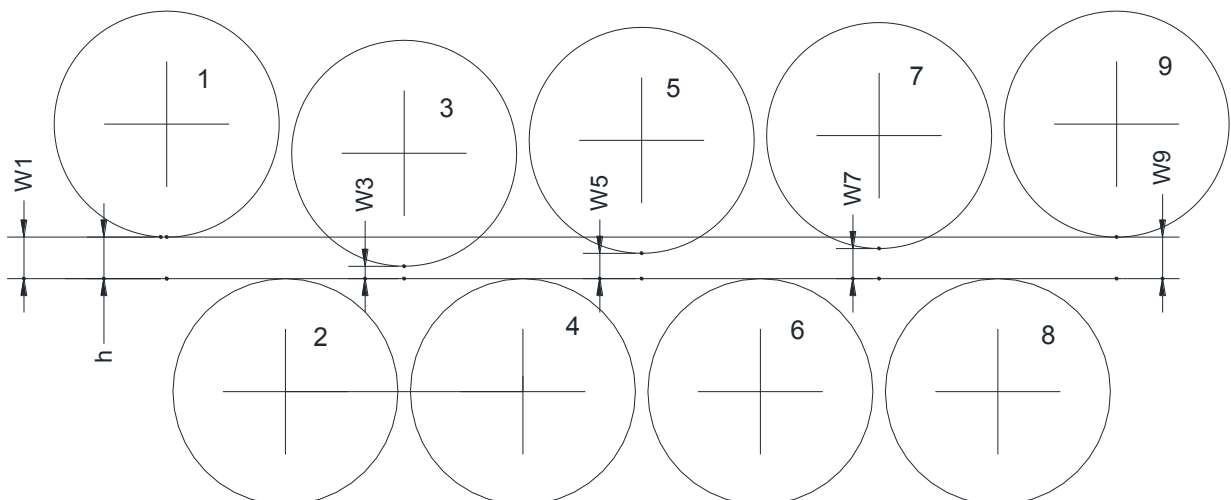
- $x_0 = 0.2$ - вихідна кривизна листу, 1/м;
- $V = 0.3$ - швидкість правки, м/с;
- тип налаштування касети роликів – індивідуальна;

- непарні ролики знаходяться в рухомій касеті;
- коефіцієнт тертя ковзання ролика по листу - 0.3;
- клас шорсткості поверхні роликів – 8;
- внутрішній діаметр ролика, мм – 250;
- коефіцієнт тертя в підшипнику - 0.006;
- відношення радіуса прогину на 3-му ролику до гранично пружного – 4.

Для розрахунку налаштування роликів програма використовує функцію **main**, яка після розрахунку налаштування видає координати положення роликів верхньої касети щодо нерухомо виставленої нижньої касети.

Результати розрахунку:

Найменування	Позначення в програмі	Одиниці виміру
Положення першого ролика	W1	мм
Положення третього ролика	W3	мм
Положення п'ятого ролика	W5	мм
Положення сьомого ролика	W7	мм
Положення дев'ятого ролика	W9	мм



Приклад використання програми SetLevelers.dll в середовищі Visual-Basic6:

```
Private Sub Command1_Click()
```

```
n = Val(Text1.Text)
```

```
t = Val(Text2.Text)
```

```
d = Val(Text3.Text)
```

```
h = Val(Text4.Text)
```

```
b = Val(Text5.Text)
```

```
Temper = Val(Text6.Text)
```

```
Gt = Val(Text7.Text)
```

```
Dim DLL As New ClassRoll
```

```
DLL.n = n
```

```
DLL.t = t
```

```
DLL.d = d
```

```
DLL.h = h
```

```
DLL.b = b
```

```
DLL.tempra = Temper
```

```
DLL.Gs0 = Gt
```

```
Call DLL.main
```

```
Label8.Caption = "W1=" & CStr(DLL.W1)
```

```
Label9.Caption = "W3=" & CStr(DLL.W3)
```

```
Label10.Caption = "W5=" & CStr(DLL.W5)
```

```
Label11.Caption = "W7=" & CStr(DLL.W7)
```

```
Label12.Caption = "W9=" & CStr(DLL.W9)
```

```
End Sub
```

Параметр	Значение	Результат
Количество роликов	9	
Шаг между роликами (мм)	380	W1=9,99
Диаметр рабочих роликов (мм)	360	W3=7,59
Толщина листа (мм)	10	W5=8,37
Ширина листа (мм)	2000	W7=9,18
Температура проката (град.С)	700	W9=9,99
Напряжение текучести материала (МПа)	240	

КОД ПРОГРАМНОГО ПРОДУКТУ SETLEVELERS.DLL

```

VERSION 1.0 CLASS
BEGIN
    MultiUse = -1 'True
    Persistable = 0 'NotPersistable
    DataBindingBehavior = 0 'vbNone
    DataSourceBehavior = 0 'vbNone
    MTSTransactionMode = 0 'NotAnMTSObject
END
Attribute VB_Name = "ClassRoll"
Attribute VB_GlobalNameSpace = False
Attribute VB_Creatable = True
Attribute VB_PredeclaredId = False
Attribute VB_Exposed = True

'Attribute VB_Name = "Module1"
Public h, b, Gs0, d, t As Double
Public W1, W3, W5, W7, W9 As Single
Public tempr, n As Integer

Const pi = 3.14159265358979
Dim TrenieSk, TrenieKach, Dvn, Ktrpodsh, RprRupr, TochnNastr, x1Dop, x0, V, progib1,
progibL As Single
Dim E0, tip, naklon, firstroll, CISheroh As Single
Dim material$, FileRes$
Dim Gt, E, k0, c1, c2, cc, A1, A2, tn As Single
Const MassMax = 17
Dim c(MassMax), alfa(MassMax), beta(MassMax), k(MassMax), kLim(MassMax), dx(MassMax),
m(MassMax), P(MassMax), G(MassMax) As Double
Dim AutoMode, NsetAuto As Boolean
Dim Nset, C2a, stepW As Single
Dim x0Max, x0Min, xSet As Single
Dim W(17) As Single
Dim NsetM(500), XostM(500) As Single

Sub main()
'===== ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ =====
'h - толщина листа,мм
'b - ширина листа, мм
'material$ - материал листа (на будущее, можно прикрутить базу)
'tempr - темепература металла, град. С
E0 = 210000# 'E0 - модуль упругости материала листа, МПа
'Gs0 - предел текучести материала листа, МПа
'n - количество роликов
'd - диаметр рабочих роликов, мм
't - шаг между роликами
x0 = 0.2 'x0 - исходная кривизна листа, 1/м
V = 0.3 'V - скорость правки,м/ctip = 1 'tip - тип настройки кассеты роликов, наклон-
ная/параллельная
naklon = 2 'naklon - какие ролики находятся в подвижной кассете, четные/нечетные
firstroll = 1 'firstroll - какой ролик является первым
progib1 = 0 'progib1 - величина перекрытия первой пары роликов, мм
progibL = 2 'progibL - величина перекрытия последней пары роликов, мм
TrenieSk = 0.3 'TrenieSk - Коэф-нт трения скольжения ролика по листу
TrenieKach = 0.3 'TrenieKach - Коэф-нт трения качения ролика по листу
CISheroh = 8 'CISheroh - Класс шероховатости поверхности роликов, 6-9
Dvn = 250 'Dvn - Внутренний диаметр ролика, мм

```

```

Ktrpodsh = 0.006 'Ktrpodsh - Коэф-нт трения в подшипнике
RprRupr = 4 'RprRupr - Отнош. Rпрогиба на 3-м р-ке к пред. упругому
TochnNastr = 0.001 'TochnNastr - Точность настройки роликов
x1Dop = 0.000001 'x1Dop - допустимое значение конечной кривизны листа
FileRes$ = "res.txt" 'FileRes$ - Имя файла результатов
If n = 5 Or n = 9 Then
Else
MsgBox ("Количество роликов должно быть равным 5 или 9"): Exit Sub
End If
If h < 4.5 Or h > 72 Then
MsgBox ("По сортаменту толщина металла должна быть от 5 до 70 мм"): Exit Sub
End If
If h > 25 And n = 9 Then
MsgBox ("Рекомендуется при h>25 мм 5-роликовый вариант с двойным шагом роликов")
End If
If h <= 25 And n = 5 Then
MsgBox ("Рекомендуется при h<25 мм 9-роликовый вариант ЛПМ")
End If
tn = t
ns = n
For i = 1 To n
dx(i) = t / 2
Next
Gt = Gs0 * 2 / Sqr(3)
E = E0 / (1 - 0.3 ^ 2)
Tmprt = tempr / 1000
E = 2.1 - 0.628 * Tmprt + 0.83 * Tmprt ^ 2 - 1.458 * Tmprt ^ 3
E = E * 100000#
k0 = E * h * x0 / 2000 / Gt
Select Case CISheroh 'класс шероховатости пов-ти роликов
Case 6
c1 = 18: c2 = 6
Case 7
c1 = 9.4: c2 = 8
Case 8
c1 = 4.7: c2 = 12
Case 9
c1 = 2.4: c2 = 20
End Select
cc = Gt * d / 200000 / h
A1 = 65 * h ^ 4 / (c1 * c2 / 1000000#) ^ 2 * cc ^ 3
A2 = 0.11 * Sqr(c1 / c2) / Sqr(Sqr(cc))
k0 = E * h * x0 / 2000 / Gt
k(1) = k0
m(1) = 0: m(n) = 0
For i = 1 To n: kLim(i) = E * h / Gt / (d + h): Next
If t < 2 * (d + h) Then
cc = d - Sqr((d + h) ^ 2 - t ^ 2 / 4)
'If progib1 > cc Or progibL > cc Then MsgBox ("Уменьшите перекрытия до < " +
CStr(Int(cc * 10) / 10) + "мм"): End
End If
If naklon = 1 Then ii = 3 Else ii = 1
If n Mod 2 > 0 Then nn = ii Else nn = 2
'===BEGIN AUTOMATION MODE=====

Nset = 4
C2a = 0
stepW = 0.001
x0Max = 0.2
x0Min = 0

```

```

xSet = 0
Nset = E * h / Gt * x0Max / 1000
'расчет максимального допустимого прогиба
If Nset > 1 Then
  Cupr = Gt * t ^ 2 / 12 / E / h
  Rupr = (Cupr ^ 2 + t ^ 2 / 4) / 2 / Cupr
  Do
    C2a = C2a + stepW
    Ra = (C2a ^ 2 + t ^ 2 / 4) / 2 / C2a
  Loop While Ra > Rupr / Nset
Else
  C2a = Gt * t ^ 2 / 12 / E / h
End If

If C2a > h * 0.85 Then C2a = Gt * t ^ 2 / 12 / E / h
If C2a > h Or C2a <= 0 Then C2a = Gt * t ^ 3 / E / h ^ 2 / 4.2
C2a = Int(C2a / stepW) * stepW
If C2a > h Or C2a < 0 Then MsgBox ("Критическая величина зазора C2, измените исход-
ные данные"): Exit Sub
'===== > дальше непосредственно определение положения роликов
W(1) = h - stepW
For i = 3 To n Step 2: W(i) = h - C2a: Next
For i = 2 To n Step 2: W(i) = 0: Next

k0 = E * h * x0Min / 2000 / Gt: k(1) = k0: m(1) = 0: m(n) = 0
GoSub calc0 'на подпрограмму расчета остаточной кривизны
x1Min = Xost
k0 = E * h * x0Max / 2000 / Gt: k(1) = k0: m(1) = 0: m(n) = 0
GoSub calc0 'на подпрограмму расчета остаточной кривизны
x1Max = Xost
If Abs(x1Max) > Abs(x1Min) Then Xmax = x1Max Else Xmax = x1Min
Xmax = Xmax
shag = stepW * 20
Do While shag > stepW
  Do
    Xpre = Xmax
    For i = 5 To n Step 2
      W(i) = W(i) + (i - 3) / 2 * shag
    Next
    k0 = E * h * x0Min / 2000 / Gt: k(1) = k0: m(1) = 0: m(n) = 0
    GoSub calc0 'на подпрограмму расчета остаточной кривизны
    x1Min = Xost
    k0 = E * h * x0Max / 2000 / Gt: k(1) = k0: m(1) = 0: m(n) = 0
    GoSub calc0 'на подпрограмму расчета остаточной кривизны
    x1Max = Xost
    If Abs(x1Max) > Abs(x1Min) Then Xmax = x1Max Else Xmax = x1Min
    Xmax = Xmax
    For i = 1 To n
      'Print #2, "i="; i; "c="; Int((c(i) - h) * 100) / 100, "k="; Int(k(i) * 1000000) / 1000000#
    Next: 'Print #2, "-----"; "Xost="; Xost
    'If Nset < 1 Then Exit Do
    If W(n) >= h Then Exit Do 'Nset = Nset + 0.01: GoTo 348
  Loop While Xmax <= Xpre And Abs(Xmax) > xSet
  'Nset = 4
  For i = 5 To n Step 2
    W(i) = W(i) - (i - 1) / 2 * shag
  Next
  k0 = E * h * x0Min / 2000 / Gt: k(1) = k0: m(1) = 0: m(n) = 0
  GoSub calc0 'на подпрограмму расчета остаточной кривизны
  x1Min = Xost

```

```

k0 = E * h * x0Max / 2000 / Gt: k(1) = k0: m(1) = 0: m(n) = 0
GoSub calc0 'на подпрограмму расчета остаточной кривизны
x1Max = Xost
If Abs(x1Max) > Abs(x1Min) Then Xmax = x1Max Else Xmax = x1Min
Xmax = (Xmax)
For i = 1 To n
    'Print #2, "i="; i; "c="; Int((c(i) - h) * 100) / 100, "k="; Int(k(i) * 1000000) / 1000000#
    Next: 'Print #2, "-----"
shag = shag * 0.1
Loop
For i = 5 To n Step 2
    W(i) = W(i) - (i - 1) / 2 * shag
Next
k0 = E * h * x0Min / 2000 / Gt: k(1) = k0: m(1) = 0: m(n) = 0
GoSub calc0 'на подпрограмму расчета остаточной кривизны
x1Min = Xost
k0 = E * h * x0Max / 2000 / Gt: k(1) = k0: m(1) = 0: m(n) = 0
GoSub calc0 'на подпрограмму расчета остаточной кривизны
x1Max = Xost
If Abs(x1Max) > Abs(x1Min) Then Xmax = x1Max Else Xmax = x1Min
Xmax = Abs(Xmax)
eps = 0
i = 1
c2Egr = 0
Sm = 0
For i = 2 To n
    c1Egr = c2Egr
    If i = n Then ts = tn
    bt = beta(i - 1)
    al = alfa(i)
    cEgr = ts + (d + h) * Sin(bt) - (d + h) * Sin(al)
    c2Egr = (m(i - 1) + m(i)) / cEgr
    P(i - 1) = (c1Egr + c2Egr) * h / 3
    Sm = Sm + c2Egr
    eps = eps + c2Egr * (Tan(bt) + Tan(al))
Next
P(n) = c2Egr * h / 3
'===== Gost, Mpr =====
j = 1
Dim sigma(17, 50) As Single
For i = 2 To n
    j = -j
    cEgr = j * (k(i - 1) + k(i)) / 50
    For kr = 1 To 50
        sigma(i, kr) = sigma(i - 1, kr) + kr * cEgr
        If sigma(i, kr) > 1 Then sigma(i, kr) = 1
        If sigma(i, kr) < -1 Then sigma(i, kr) = -1
    Next kr
Next i

SigmaMax = 0

For kr = 1 To 50
    If SigmaMax < Abs(sigma(n, kr)) Then SigmaMax = Abs(sigma(n, kr))
Next kr
SigmaMax = SigmaMax * Gt
Sm = 2 * Sm * h / 3
eps = eps * h / 3
c1 = 0: c2 = 0
For i = 1 To ns

```

```

cEgr = ff1(A1 * P(i))
c1 = c1 + P(i) * ff2(cEgr)
c2 = c2 + P(i) ^ 1.25 * ff3(cEgr)
Next
fm = -Int(-100 * (eps - A2 * c2) / c1) / 100 'znak "-" pered ???
c1 = k(1)
ik% = 1
c2 = P(1)
For i = 2 To n
  If Abs(k(i)) > Abs(c1) Then c1 = k(i): ik = i
  If P(i) > c2 Then c2 = P(i): ip = i
Next

If TrenieSk >= fm Then
  fm = TrenieSk
Else
  MsgBox ("ОШИБКА в исходных данных ->ПРОБУКSOBKA<-")
End If

'крутящие моменты от пластической деформации металла
Dim tor1(17)
cf1 = 0
cf2 = 1 / (1 - k(ik) * Gt / E)
Do
  ksi = (cf1 + cf2) / 2
  If ksi = cf1 Or ksi = cf2 Then Exit Do
  ss = 0
  For i = 1 To ns
    eta = 1 - (1 - k(i) * Gt / E) * ksi
    cc = P(i)
    dzeta = ff1(A1 * eta ^ 4 * cc)
    cc = Sgn(eta) * cc * (fm * ff2(dzeta) + A2 * Sqr(Sqr(cc)) * ff3(dzeta))
    tor1(i) = cc
    ss = ss + cc
  Next
  Select Case ss
    Case Is > eps
      cf1 = ksi
    Case Is < eps
      cf2 = ksi
    Case Else
      Exit Do
  End Select
Loop

'крутящие моменты от трения
css = 3
z = 13 / 14
'TrenieSk - Коэф-нт трения скольжения ролика по листу
'TrenieKach - Коэф-нт трения качения ролика по листу
'ClSheroh - Класс шероховатости поверхности роликов, 6-9
'Dvn - Внутренний диаметр ролика, мм
'Ktrpodsh - Коэф-нт трения в подшипнике
db = Dvn
mu = 0.006
d0 = d ' диаметр бочки опорного ролика
db0 = db * 0.6 'внутренний диаметр подшипника опорного ролика
mu0 = 0.006 'коэф-нт трения в подшипниках опорных роликов
r0 = 0.05 'коэф-нт трения ролика по ролику
r = 0.3 'коэф-нт трения качения ролика по листу
L = t

```

```

cc = (L / (d + d0)) ^ 2
If z > 0 Then
    kEgr = (1 - cc)
    kEgr = Sqr(Abs(kEgr))
    k1 = 2 * (1 + d / d0) * r0 / d / kEgr
    k2 = mu0 * db0 / d0 / kEgr
End If
k1 = 2 * r / d + z * k1 + Abs(1 - z) * mu * db / d
k2 = z * k2
Dim tor2(17) As Single
kEgr = 1
ss = 0
c2 = 0
For i = 1 To ns
    If css = 3 Then
        If i >= 3 Then
            kEgr = (1 - 4 * P(i - 2) * P(i) / (P(i - 2) + P(i)) ^ 2 * cc)
            kEgr = Sqr(Abs(kEgr))
        Else
            kEgr = 1
        End If
        If i <= ns - 2 Then
            ks = (1 - 4 * P(i) * P(i + 2) / (P(i) + P(i + 2)) ^ 2 * cc)
            ks = Sqr(Abs(ks))
        Else
            ks = 1
        End If
        kEgr = (kEgr + ks) / 2
    End If
    c1 = P(i) * (k1 + kEgr * k2)
    tor2(i) = c1
    ss = ss + c1
    c1 = Abs(tor1(i) + c1)
    If c1 > c2 Then c2 = c1: it = i
Next
c2 = Gt * b * h / 1000
c1 = c2 * d / 2
'dx(i) = t
'P(i) = m(i) * h / 6 / dx(i)
'P(i) = P(i) * Gt * b * h
'For i = 2 To n - 1
'    dx(i) = t + (Dr + h) * Sin(beta(i)) / 2 - (Dr + h) * Sin(alfa(i + 1)) / 2
'    P(i) = (m(i - 1) + m(i)) * h / 6 / dx(i - 1) + (m(i) + m(i + 1)) * h / 6 / dx(i)
'    P(i) = P(i) * Gt * b * h
'Next
'i = n
'P(i) = m(i) * h / 6 / dx(i - 1)
'P(i) = P(i) * Gt * b * h
For i = 1 To n: P(i) = P(i) * Gt * b * h: Next
'If NsetAuto = True Then
'    schet = schet + 1

'    NsetM(schet) = Nset: XostM(schet) = Xost
'    If Nset < 4 * NsetM(1) Then Nset = Nset + 0.05: GoTo 348
'End If
'Xmin = 100000
'For i = 1 To schet - 1
'    If XostM(i) < XminA Then XminA = XostM(i): iMinA = i
'Next
'If NsetAuto <> False Then

```



```
'NsetAuto = False
'Nset = NsetM(iMinA): GoTo 348
'End If
```

'материал - низколегир.,судостроит., углеродистые качественные, легированные, угле-
родистые обыкн.кач-ва

```
'referential- 17Г1С, 08Г2СФБ, 45, 30ХГСА, Ст.3сп
'material - 1 2 3 4 5
'temperatura - 730 720 800 810 830
W1 = Int((c(1) - h) * 100) / 100
W3 = Int((c(3) - h) * 100) / 100
W5 = Int((c(5) - h) * 100) / 100
If n > 5 Then W7 = Int((c(7) - h) * 100) / 100
If n > 5 Then W9 = Int((c(9) - h) * 100) / 100
Exit Sub
```

calc0: 'подпрограмма расчета остаточной кривизны листа

```
For i = 1 To n
  c(i) = W(i) + h
Next
For i = 2 To n - 1
  'k(i) = 3 * E * h * c(i - 1) / Gt / dx(i) ^ 2
  k(i) = 12 * E * h * c(i) / Gt / t ^ 2 'EGR
  If k(i) > 1.5 Then k(i) = 1.5
  m(i) = k(i)
Next i
ts = t
For i = 2 To n
  If i = n Then ts = tn
  'alfa(i) = 2 * Atn(c(i - 1) / 2 / dx(i))
  alfa(i) = 2 * Atn(c(i) / ts) 'EGR
  beta(i - 1) = -alfa(i)
Next i
'Iteration
j = 0: S = 0
Do
  j = j + 1: s1 = S: i = 2
  al = alfa(2): bt = beta(1)
  cEgr = ts + (d + h) * Sin(bt) - (d + h) * Sin(al)
  c1Egr = cEgr * Gt / E / h
  c2Egr = c(i) - (d + h) * Sin(bt / 2) ^ 2 - (d + h) * Sin(al / 2) ^ 2
  c2Egr = 2 * c2Egr / cEgr
  mMaxi = 0
  aEgr = c1Egr * (k0 / 2 - (fi1(m(2)) - fi2(m(2)) / m(2)) / m(2)) + c2Egr
  al = al - (al - Atn(aEgr)) / (1 + (d + h) / t * aEgr)
  bt = Atn(c1Egr * (k0 - fi1(m(2)) / m(2)) - Tan(al))
  S = Abs(alfa(2) - al) + Abs(beta(1) - bt)
  beta(1) = bt
  alfa(2) = al
  'Shtplv=====
  'dx11 = dx(i) + 0.5 * (d + h) * Sin(bt) - 0.5 * (d + h) * Sin(al)
  'c11 = c(1) - (d + h) * Sin(0.5 * bt) ^ 2 - (d + h) * Sin(0.5 * al) ^ 2
  'a = Gt * dx11 / E / h * (k0 - 2 * fi1(m(2)) / m(2) + 2 * fi2(m(2)) / m(2)) + c11 / dx11
  'alfa(2) = al - (al - Atn(a)) / (1 + 0.5 * (d + h) * a / dx(i))
  'beta(1) = Atn(2 * Gt * dx11 / E / h * (k0 - fi1(m(2)) / m(2)) - Tan(alfa(2)))
  'S = Abs(alfa(2) - al) + Abs(beta(2) - bt)
  jEgr = 1
For i = 3 To n
  jEgr = -jEgr 'Egrv
  If i = n Then ts = tn
  bt = al
```

```

al = alfa(i)
cEgr = ts + (d + h) * Sin(bt) - (d + h) * Sin(al)
c1Egr = cEgr * Gt / E / h
c2Egr = c(i) - (d + h) * Sin(bt / 2) ^ 2 - (d + h) * Sin(al / 2) ^ 2
c2Egr = 2 * c2Egr / cEgr
If Abs(m(i - 1)) < mMaxi Then msMaxi = mMaxi Else msMaxi = Abs(m(i - 1))
k(i - 1) = 2 * (c2Egr * Tan(bt)) / c1Egr + F2(m(i), m(i - 1), k(i - 1), k0, msMaxi, jEgr)
If k(i - 1) > kLim(i) Then
    k(i - 1) = kLim(i)
    bt = beta(i - 1)
    cEgr = ts + (d + h) * Sin(bt) - (d + h) * Sin(al)
    c1Egr = cEgr * Gt / E / h
    c2Egr = c(i) - (d + h) * Sin(bt / 2) ^ 2 - (d + h) * Sin(al / 2) ^ 2
    c2Egr = 2 * c2Egr / cEgr
End If
m(i - 1) = 2 * f((k(i - 2) + k(i - 1)) / 2) - m(i - 2)
If Abs(m(i - 1)) > mMaxi Then
    m(i - 1) = f(k(i - 1) - jEgr * k0)
    mMaxi = Abs(m(i - 1))
End If
'k(i - 1) = k(i - 1)
'm(i - 1) = m(i - 1)
F1s = F1(m(i), m(i - 1), k(i - 1), k0, mMaxi, jEgr)
aEgr = c1Egr * (k(i - 1) - F1s + F2(m(i), m(i - 1), k(i - 1), k0, mMaxi, jEgr)) / 2 + c2Egr
al = al - (al - Atn(aEgr)) / (1 + (d + h) / ts * aEgr)
bt = Atn(c1Egr * (k(i - 1) - F1s / 2) - Tan(al))
S = S + Abs(alfa(i) - al) + Abs(beta(i - 1) - bt)
beta(i - 1) = bt
alfa(i) = al

' al = alfa(i + 1): bt = beta(i)
'dxi1 = dx(i) + 0.5 * (d + h) * Sin(alfa(i)) - 0.5 * (d + h) * Sin(al)
'ci1 = c(i) - (d + h) * Sin(0.5 * alfa(i)) ^ 2 - (d + h) * Sin(0.5 * al) ^ 2
'k(i) = E * h / Gt / dxi1 * (ci1 / dxi1 + Tan(alfa(i)) + F2(m(i), m(i + 1), k(i), k0, i, m()))
' If k(i) > kLim(i) Then
'     k(i) = kLim(i)
'     dxi1 = dx(i) + 0.5 * (d + h) * Sin(bt) - 0.5 * (d + h) * Sin(al)
'     ci1 = c(i) - (d + h) * Sin(0.5 * bt) ^ 2 - (d + h) * Sin(0.5 * al) ^ 2
' End If
'm(i) = 2 * f((k(i - 1) + k(i)) / 2) - m(i - 1)
' If m(i) >= mmax(m(), i) Then m(i) = f(k(i) + (-1) ^ i * k0)
'a = Gt * dxi1 / E / h * (k(i) - F1(m(i), m(i + 1), k(i), k0, i, m()) + F2(m(i), m(i + 1),
k(i), k0, i, m())) + ci1 / dxi1
'alfa(i + 1) = al - (al - Atn(a)) / (1 + 0.5 * (d + h) * a / dx(i))
'beta(i) = Atn(2 * Gt * dxi1 / E / h * (2 * k(i) - F1(m(i), m(i + 1), k(i), k0, i, m())) -
Tan(alfa(i + 1)))
'S = S + Abs(alfa(i + 1) - al) + Abs(beta(i) - bt)
'If j = 1 Then s1 = S * 1.5
Next
If S < 0.001 Then Exit Do
If j > 12 Then If S > ss Then Exit Do
ss = S
Loop 'While j <= 12 And Abs(S) > 0.001 And s1 >= S
kost = m(n - 1) - k(n - 1)
k(n) = kost
Xost = 2000 * Gt * kost / E / h
Return

End Sub
Private Function fi1(mm)

```

```

If Abs(mm) <= 1 Then fi1 = mm ^ 2 / 2 Else fi1 = 1.5 - Sqr(3 - 2 * Abs(mm))
End Function
Private Function fi2(mm)
If Abs(mm) <= 1 Then fi2 = mm ^ 3 / 6 Else fi2 = 1.5 * mm + ((3 - 2 * Abs(mm)) ^ 1.5 - 5)
/ 3
End Function
Private Function F1(mi, minext, ki, k0, mMaxi, jEgr)
'Mmaximus = mmax(m(), i)
'cf1 = (mi + minext) / 2: cf2 = (minext - Mmaximus)
If Abs(mi) <= mMaxi Then
  F1 = 8 * fi1((mi + minext) / 2) / (mi + minext)
Else
  cf1 = Sgn(mi) * mMaxi
  cf2 = 4 * fi1((minext + cf1) / 2) + fi1(mi) - fi1(cf1)
  'F1 = 8 * fi1(cf1) + 2 * fi1(minext) - 2 * fi1(Mmaximus) + 2 * cf2 * (ki + (-1) ^ i * k0)
  F1 = 2 * (cf2 + (mi - cf1) * (ki - j * k0))
  F1 = F1 / (mi + minext)
End If
End Function
Private Function mmax(m(), icurrent)
mmax = -100000000#
For i = 1 To icurrent:
If m(i) > mmax Then mmax = m(i):
Next
End Function
Private Function f(kk)
If Abs(kk) <= 1 Then f = kk Else f = (3 - 1 / kk ^ 2) / 2
End Function
Private Function F2(mi, minext, ki, k0, mMaxi, jEgr)
'Mmaximus = mmax(m(), i)
'cf1 = (mi + minext) / 2: cf2 = (minext - Mmaximus)
If Abs(mi) <= mMaxi Then
  cf1 = minext + mi
  If cf1 = 0 Then F2 = 0 Else F2 = 16 * fi2((mi + minext) / 2) / (mi + minext) ^ 2
Else
  cf2 = Sgn(mi) * mMaxi
  cf3 = (minext + cf2) / 2
  cf4 = mi - cf2
  cf5 = 8 * fi2(cf3) + fi2(mi) - fi2(cf2) + cf4 * (4 * fi1(cf3) - fi1(cf2))
  F2 = (2 * cf2 + cf4 ^ 2 * (ki - jEgr * k0)) / (minext + mi) ^ 2
  'F2 = 16 * fi2(cf1) + 2 * fi2(minext) - 2 * fi2(Mmaximus) + 2 * cf2 * (4 * fi1(cf1) -
fi1(Mmaximus)) + cf2 ^ 2 * (ki + (-1) ^ i * k0)
  'F2 = F2 / (mi + minext) ^ 2
End If
End Function

Private Function ff1(x)
cf1 = Sqr(x + 1 / 27)
cf2 = Sqr(x)
ff1 = 2 / ((cf1 + cf2) ^ (2 / 3) + (cf1 - cf2) ^ (2 / 3) + 1 / 3) - 1
End Function

Private Function ff2(x)
ff2 = (ArcCos(x) + Sqr(1 - x ^ 2)) / pi
End Function

Private Function ArcCos(x)
If Abs(x) < 1 Then
  ArcCos = pi / 2 - Atn(x / Sqr(1 - x ^ 2))
Else

```

```
    If x > 0 Then ArcCos = 0
    If x < 0 Then ArcCos = pi
End If
End Function
```

```
Private Function ff3(x)
cf1 = 0.373 * (2 - 3 * x + x ^ 3)
cf2 = 0.448 * (ArcCos(x) - x * Sqr(1 - x ^ 2))
ff3 = (1 + x) * (1 - x ^ 2) ^ 0.75 + cf1 + cf2
End Function
```

ТЕХНОЛОГІЧНІ НАЛАШТУВАННЯ ДЛЯ
ВИБІРКОВОГО СОРТАМЕНТУ

9-роликівий варіант машини

сталь 17Г1С $h=5\text{ mm}$ $b=1500\text{ mm}$

$W(1)=4,99$ $W(3)=1,33$ $W(5)=2,42$ $W(7)=3,53$ $W(9)=4,64$ $P_{\text{sum}}=111\text{ kN}$

сталь 17Г1С $h=5\text{ mm}$ $b=2000\text{ mm}$

$W(1)=4,99$ $W(3)=1,33$ $W(5)=2,42$ $W(7)=3,53$ $W(9)=4,64$ $P_{\text{sum}}=148\text{ kN}$

сталь 17Г1С $h=5\text{ mm}$ $b=2350\text{ mm}$

$W(1)=4,99$ $W(3)=1,33$ $W(5)=2,42$ $W(7)=3,53$ $W(9)=4,64$ $P_{\text{sum}}=175\text{ kN}$

сталь 17Г1С $h=7\text{ mm}$ $b=1500\text{ mm}$

$W(1)=6,99$ $W(3)=4,38$ $W(5)=5,22$ $W(7)=6,09$ $W(9)=6,96$ $P_{\text{sum}}=363\text{ kN}$

сталь 17Г1С $h=7\text{ mm}$ $b=2000\text{ mm}$

$W(1)=6,99$ $W(3)=4,38$ $W(5)=5,22$ $W(7)=6,09$ $W(9)=6,96$ $P_{\text{sum}}=484\text{ kN}$

сталь 17Г1С $h=7\text{ mm}$ $b=2350\text{ mm}$

$W(1)=6,99$ $W(3)=4,38$ $W(5)=5,22$ $W(7)=6,09$ $W(9)=6,96$ $P_{\text{sum}}=569\text{ kN}$

сталь 17Г1С $h=12\text{ mm}$ $b=1500\text{ mm}$

$W(1)=11,99$ $W(3)=9,59$ $W(5)=10,36$ $W(7)=11,16$ $W(9)=11,96$ $P_{\text{sum}}=1145\text{ kN}$

сталь 17Г1С $h=12\text{ mm}$ $b=2000\text{ mm}$

$W(1)=11,99$ $W(3)=9,59$ $W(5)=10,36$ $W(7)=11,16$ $W(9)=11,96$ $P_{\text{sum}}=1527\text{ kN}$

сталь 17Г1С $h=12\text{ mm}$ $b=2350\text{ mm}$

$W(1)=11,99$ $W(3)=9,59$ $W(5)=10,36$ $W(7)=11,16$ $W(9)=11,96$ $P_{\text{sum}}=1794\text{ kN}$

сталь 17Г1С $h=17\text{ mm}$ $b=1500\text{ mm}$

$W(1)=16,99$ $W(3)=14,59$ $W(5)=15,37$ $W(7)=16,18$ $W(9)=16,99$ $P_{\text{sum}}=4127\text{ kN}$

сталь 17Г1С $h=17\text{ mm}$ $b=2000\text{ mm}$

$W(1)=16,99$ $W(3)=14,59$ $W(5)=15,37$ $W(7)=16,18$ $W(9)=16,99$ $P_{\text{sum}}=5503\text{ kN}$

сталь 17Г1С $h=17\text{ mm}$ $b=2350\text{ mm}$

$W(1)=16,99$ $W(3)=14,59$ $W(5)=15,37$ $W(7)=16,18$ $W(9)=16,99$ $P_{\text{sum}}=6466\text{ kN}$

сталь 17Г1С $h=25$ mm $b=1500$ mm

$W(1)=24,99$ $W(3)=22,59$ $W(5)=23,37$ $W(7)=24,18$ $W(9)=24,99$ $P_{sum}=12231$ kN

сталь 17Г1С $h=25$ mm $b=2000$ mm

$W(1)=24,99$ $W(3)=22,59$ $W(5)=23,37$ $W(7)=24,18$ $W(9)=24,99$ $P_{sum}=16308$ kN

сталь 17Г1С $h=25$ mm $b=2350$ mm

$W(1)=24,99$ $W(3)=22,59$ $W(5)=23,37$ $W(7)=24,18$ $W(9)=24,99$ $P_{sum}=19162$ kN

сталь 08Г2СФБ $h=5$ mm $b=1500$ mm

$W(1)=4,99$ $W(3)=1,37$ $W(5)=1,47$ $W(7)=1,59$ $W(9)=1,72$ $P_{sum}=109$ kN

сталь 08Г2СФБ $h=5$ mm $b=2000$ mm

$W(1)=4,99$ $W(3)=1,37$ $W(5)=1,47$ $W(7)=1,59$ $W(9)=1,72$ $P_{sum}=146$ kN

сталь 08Г2СФБ $h=5$ mm $b=2350$ mm

$W(1)=4,99$ $W(3)=1,37$ $W(5)=1,47$ $W(7)=1,59$ $W(9)=1,72$ $P_{sum}=172$ kN

сталь 08Г2СФБ $h=7$ mm $b=1500$ mm

$W(1)=6,99$ $W(3)=4,41$ $W(5)=5,25$ $W(7)=6,12$ $W(9)=6,99$ $P_{sum}=364$ kN

сталь 08Г2СФБ $h=7$ mm $b=2000$ mm

$W(1)=6,99$ $W(3)=4,41$ $W(5)=5,25$ $W(7)=6,12$ $W(9)=6,99$ $P_{sum}=486$ kN

сталь 08Г2СФБ $h=7$ mm $b=2350$ mm

$W(1)=6,99$ $W(3)=4,41$ $W(5)=5,25$ $W(7)=6,12$ $W(9)=6,99$ $P_{sum}=571$ kN

сталь 08Г2СФБ $h=12$ mm $b=1500$ mm

$W(1)=11,99$ $W(3)=9,59$ $W(5)=10,37$ $W(7)=11,18$ $W(9)=11,99$ $P_{sum}=1154$ kN

сталь 08Г2СФБ $h=12$ mm $b=2000$ mm

$W(1)=11,99$ $W(3)=9,59$ $W(5)=10,37$ $W(7)=11,18$ $W(9)=11,99$ $P_{sum}=1539$ kN

сталь 08Г2СФБ $h=12$ mm $b=2350$ mm

$W(1)=11,99$ $W(3)=9,59$ $W(5)=10,37$ $W(7)=11,18$ $W(9)=11,99$ $P_{sum}=1809$ kN

сталь 08Г2СФБ $h=17$ mm $b=1500$ mm

$W(1)=16,99$ $W(3)=14,59$ $W(5)=15,37$ $W(7)=16,18$ $W(9)=16,99$ $P_{sum}=4138$ kN

сталь 08Г2СФБ $h=17$ mm $b=2000$ mm

$W(1)= 16,99$ $W(3)= 14,59$ $W(5)= 15,37$ $W(7)= 16,18$ $W(9)= 16,99$ $P_{sum}= 5517$
kN

сталь 08Г2СФБ $h= 17$ mm $b= 2350$ mm

$W(1)= 16,99$ $W(3)= 14,59$ $W(5)= 15,37$ $W(7)= 16,18$ $W(9)= 16,99$ $P_{sum}= 6483$
kN

сталь 08Г2СФБ $h= 25$ mm $b= 1500$ mm

$W(1)= 24,99$ $W(3)= 22,59$ $W(5)= 23,37$ $W(7)= 24,18$ $W(9)= 24,99$ $P_{sum}= 12239$ kN

сталь 08Г2СФБ $h= 25$ mm $b= 2000$ mm

$W(1)= 24,99$ $W(3)= 22,59$ $W(5)= 23,37$ $W(7)= 24,18$ $W(9)= 24,99$ $P_{sum}= 16319$ kN

сталь 08Г2СФБ $h= 25$ mm $b= 2350$ mm

$W(1)= 24,99$ $W(3)= 22,59$ $W(5)= 23,37$ $W(7)= 24,18$ $W(9)= 24,99$ $P_{sum}= 19175$ kN

сталь 45 $h= 5$ mm $b= 1500$ mm

$W(1)= 4,99$ $W(3)= 0,97$ $W(5)= 1,94$ $W(7)= 2,94$ $W(9)= 3,93$ $P_{sum}= 142$ kN

сталь 45 $h= 5$ mm $b= 2000$ mm

$W(1)= 4,99$ $W(3)= 0,97$ $W(5)= 1,94$ $W(7)= 2,94$ $W(9)= 3,93$ $P_{sum}= 189$ kN

сталь 45 $h= 5$ mm $b= 2350$ mm

$W(1)= 4,99$ $W(3)= 0,97$ $W(5)= 1,94$ $W(7)= 2,94$ $W(9)= 3,93$ $P_{sum}= 222$ kN

сталь 45 $h= 7$ mm $b= 1500$ mm

$W(1)= 6,99$ $W(3)= 4,12$ $W(5)= 4,9$ $W(7)= 5,7$ $W(9)= 6,5$ $P_{sum}= 352$ kN

сталь 45 $h= 7$ mm $b= 2000$ mm

$W(1)= 6,99$ $W(3)= 4,12$ $W(5)= 4,9$ $W(7)= 5,7$ $W(9)= 6,5$ $P_{sum}= 470$ kN

сталь 45 $h= 7$ mm $b= 2350$ mm

$W(1)= 6,99$ $W(3)= 4,12$ $W(5)= 4,9$ $W(7)= 5,7$ $W(9)= 6,5$ $P_{sum}= 553$ kN

сталь 45 $h= 12$ mm $b= 1500$ mm

$W(1)= 11,99$ $W(3)= 9,59$ $W(5)= 10,25$ $W(7)= 10,93$ $W(9)= 11,61$ $P_{sum}= 1066$
kN

сталь 45 $h= 12$ mm $b= 2000$ mm

$W(1)= 11,99$ $W(3)= 9,59$ $W(5)= 10,25$ $W(7)= 10,93$ $W(9)= 11,61$ $P_{sum}= 1422$
kN

сталь 45 $h= 12$ mm $b= 2350$ mm

$W(1)= 11,99$ $W(3)= 9,59$ $W(5)= 10,25$ $W(7)= 10,93$ $W(9)= 11,61$ $P_{sum}= 1670$
kN

сталь 45 $h = 17 \text{ mm}$ $b = 1500 \text{ mm}$

$W(1) = 16,99$ $W(3) = 14,59$ $W(5) = 15,37$ $W(7) = 16,18$ $W(9) = 16,99$ $P_{\text{sum}} = 4030$
kN

сталь 45 $h = 17 \text{ mm}$ $b = 2000 \text{ mm}$

$W(1) = 16,99$ $W(3) = 14,59$ $W(5) = 15,37$ $W(7) = 16,18$ $W(9) = 16,99$ $P_{\text{sum}} = 5374$
kN

сталь 45 $h = 17 \text{ mm}$ $b = 2350 \text{ mm}$

$W(1) = 16,99$ $W(3) = 14,59$ $W(5) = 15,37$ $W(7) = 16,18$ $W(9) = 16,99$ $P_{\text{sum}} = 6314$
kN

сталь 45 $h = 25 \text{ mm}$ $b = 1500 \text{ mm}$

$W(1) = 24,99$ $W(3) = 22,59$ $W(5) = 23,37$ $W(7) = 24,18$ $W(9) = 24,99$ $P_{\text{sum}} =$
 12159 kN

сталь 45 $h = 25 \text{ mm}$ $b = 2000 \text{ mm}$

$W(1) = 24,99$ $W(3) = 22,59$ $W(5) = 23,37$ $W(7) = 24,18$ $W(9) = 24,99$ $P_{\text{sum}} =$
 16212 kN

сталь 45 $h = 25 \text{ mm}$ $b = 2350 \text{ mm}$

$W(1) = 24,99$ $W(3) = 22,59$ $W(5) = 23,37$ $W(7) = 24,18$ $W(9) = 24,99$ $P_{\text{sum}} =$
 19050 kN

сталь 30ХГСА $h = 5 \text{ mm}$ $b = 1500 \text{ mm}$

$W(1) = 4,99$ $W(3) = 0,91$ $W(5) = 1,9$ $W(7) = 2,91$ $W(9) = 3,92$ $P_{\text{sum}} = 141$ kN

сталь 30ХГСА $h = 5 \text{ mm}$ $b = 2000 \text{ mm}$

$W(1) = 4,99$ $W(3) = 0,91$ $W(5) = 1,9$ $W(7) = 2,91$ $W(9) = 3,92$ $P_{\text{sum}} = 188$ kN

сталь 30ХГСА $h = 5 \text{ mm}$ $b = 2350 \text{ mm}$

$W(1) = 4,99$ $W(3) = 0,91$ $W(5) = 1,9$ $W(7) = 2,91$ $W(9) = 3,92$ $P_{\text{sum}} = 221$ kN

сталь 30ХГСА $h = 7 \text{ mm}$ $b = 1500 \text{ mm}$

$W(1) = 6,99$ $W(3) = 4,08$ $W(5) = 4,96$ $W(7) = 5,86$ $W(9) = 6,76$ $P_{\text{sum}} = 351$ kN

сталь 30ХГСА $h = 7 \text{ mm}$ $b = 2000 \text{ mm}$

$W(1) = 6,99$ $W(3) = 4,08$ $W(5) = 4,96$ $W(7) = 5,86$ $W(9) = 6,76$ $P_{\text{sum}} = 469$ kN

сталь 30ХГСА $h = 7 \text{ mm}$ $b = 2350 \text{ mm}$

$W(1) = 6,99$ $W(3) = 4,08$ $W(5) = 4,96$ $W(7) = 5,86$ $W(9) = 6,76$ $P_{\text{sum}} = 551$ kN

сталь 30ХГСА $h = 12 \text{ mm}$ $b = 1500 \text{ mm}$

$W(1) = 11,99$ $W(3) = 9,59$ $W(5) = 10,23$ $W(7) = 10,89$ $W(9) = 11,56$ $P_{\text{sum}} = 1053$
kN

сталь 30ХГСА $h = 12 \text{ mm}$ $b = 2000 \text{ mm}$

5-роликовий варіант машини

сталь 17Г1С $h=40$ mm $b=1500$ mm

$W(1)=39,99$ $W(3)=32,66$ $W(5)=39,99$ $P_{sum}=4807$ kN

сталь 17Г1С $h=40$ mm $b=2000$ mm

$W(1)=39,99$ $W(3)=32,66$ $W(5)=39,99$ $P_{sum}=6410$ kN

сталь 17Г1С $h=40$ mm $b=2350$ mm

$W(1)=39,99$ $W(3)=32,66$ $W(5)=39,99$ $P_{sum}=7532$ kN

сталь 17Г1С $h=60$ mm $b=1500$ mm

$W(1)=59,99$ $W(3)=55,11$ $W(5)=59,99$ $P_{sum}=12702$ kN

сталь 17Г1С $h=60$ mm $b=2000$ mm

$W(1)=59,99$ $W(3)=55,11$ $W(5)=59,99$ $P_{sum}=16936$ kN

сталь 17Г1С $h=60$ mm $b=2350$ mm

$W(1)=59,99$ $W(3)=55,11$ $W(5)=59,99$ $P_{sum}=19900$ kN

сталь 08Г2СФБ $h=40$ mm $b=1500$ mm

$W(1)=39,99$ $W(3)=32,75$ $W(5)=39,99$ $P_{sum}=4813$ kN

сталь 08Г2СФБ $h=40$ mm $b=2000$ mm

$W(1)=39,99$ $W(3)=32,75$ $W(5)=39,99$ $P_{sum}=6418$ kN

сталь 08Г2СФБ $h=40$ mm $b=2350$ mm

$W(1)=39,99$ $W(3)=32,75$ $W(5)=39,99$ $P_{sum}=7541$ kN

сталь 08Г2СФБ $h=60$ mm $b=1500$ mm

$W(1)=59,99$ $W(3)=55,16$ $W(5)=59,99$ $P_{sum}=12706$ kN

сталь 08Г2СФБ $h=60$ mm $b=2000$ mm

$W(1)=59,99$ $W(3)=55,16$ $W(5)=59,99$ $P_{sum}=16941$ kN

сталь 08Г2СФБ $h=60$ mm $b=2350$ mm

$W(1)=59,99$ $W(3)=55,16$ $W(5)=59,99$ $P_{sum}=19906$ kN

сталь 45 $h=40$ mm $b=1500$ mm

$W(1)=39,99$ $W(3)=31,95$ $W(5)=39,99$ $P_{sum}=4754$ kN

сталь 45 $h=40$ mm $b=2000$ mm

$W(1)=39,99$ $W(3)=31,95$ $W(5)=39,99$ $P_{sum}=6339$ kN

сталь 45 $h=40$ mm $b=2350$ mm

$W(1)=39,99$ $W(3)=31,95$ $W(5)=39,99$ $P_{sum}=7449$ kN

МЕТОДИКА ВИЗНАЧЕННЯ КОЕФІЦІЄНТІВ РЕГРЕСІЇ ТА
СТАТИСТИЧНОЇ ОБРОБКИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ
ДАНИХ ПЛАНОВАНОГО ЕКСПЕРИМЕНТУ

Обробка результатів чисельного експерименту виконана за методикою Ф. С. Новіка і Я. Б. Арсова [127].

Порядкова дисперсія

$$S_{пп^2_i} = \frac{(P_{ппл_i} - P_{пп0_i})^2 + (P_{ппл} - P_{ппл_i})^2}{f_i},$$

де $P_{пп0_i}$, $P_{пп_i}$, $P_{ппл}$ – значення площинності для першого дубля, другого і їх середнє значення;

f_i – число ступенів свободи при визначенні i -ої порядкової дисперсії
 $f_i = n_i - 1$;

n_i – число дублів i -го експерименту.

Середня дисперсія експерименту

$$S_{пп^2} = \frac{\sum S_{пп^2_i}}{N},$$

де N – кількість експериментів.

Однорідність ряду дисперсії за критерієм Кохрена

$$G_{расч} = \frac{\max(S_{пп_i})}{\sum S_{пп_i}}.$$

Значення величини $G_{расч}$ співставляється з аналогічним табличним значенням критерію Кохрена для рівня значимості $\alpha = 0,05$, числа ступенів свободи та кількості експериментів.

Умови експерименту задаються матрицею планування, а значення величини площинності та сили правки матрицею-стовпцем $P_{пп}$ і P_i :

$$P_{\text{ПП}} = \begin{pmatrix} h_1 \\ h_2 \\ \dots \\ h_i \end{pmatrix} \quad P_i = \begin{pmatrix} P_1 \\ P_2 \\ \dots \\ P_i \end{pmatrix}$$

Розрахунки коефіцієнтів регресії $B = (X^T \cdot X)^{-1} \cdot (X^T \cdot P_{\text{ПП}})$.

Рівняння регресії в загальному виді може бути презентовано в такий спосіб

$$\begin{aligned} P_{\text{ППЛ_рас}}(X_1, X_2, X_3) = & B_1 + B_2 \cdot X_1 + B_3 \cdot X_2 + B_4 \cdot X_3 + B_5 \cdot X_1^2 + B_6 \cdot X_2^2 + \\ & + B_7 \cdot X_3^2 + B_8 \cdot X_1^2 \cdot X_2^2 \cdot X_3^2 + B_9 \cdot X_1^2 \cdot X_2^2 \cdot X_3 + B_{10} \cdot X_1^2 \cdot X_2 \cdot X_3^2 + \\ & + B_{11} \cdot X_1 \cdot X_2^2 \cdot X_3^2 + B_{12} \cdot X_1^2 \cdot X_2^2 + B_{13} \cdot X_2^2 \cdot X_3^2 + B_{14} \cdot X_1^2 \cdot X_3^2 + \\ & + B_{15} \cdot X_1 \cdot X_2 \cdot X_3^2 + B_{16} \cdot X_1 \cdot X_2^2 \cdot X_3 + B_{17} \cdot X_1^2 \cdot X_2 \cdot X_3 + B_{18} \cdot X_1^2 \cdot X_3 + \\ & + B_{19} \cdot X_2^2 \cdot X_3 + B_{20} \cdot X_1 \cdot X_3^2 + B_{21} \cdot X_2 \cdot X_3^2 + B_{22} \cdot X_1 \cdot X_2^2 + B_{23} \cdot X_1^2 \cdot X_2 + \\ & + B_{24} \cdot X_1 \cdot X_2 \cdot X_3 - B_{25} \cdot X_1 \cdot X_2 - B_{26} \cdot X_1 \cdot X_3 - B_{27} \cdot X_2 \cdot X_3 \end{aligned}$$

і аналогічно для сили.

Дисперсія неадекватності моделі при рівномірному дублюванні експериментів

$$S^2_{\text{неад}} = \frac{n \cdot \sum_{i=1}^N (P_{\text{ППЛ_рас}_i} - P_{\text{ПП}_i})^2}{N},$$

де $P_{\text{ППЛ_рас}_i}$ – розрахункове значення площинності, отримане по рівнянню регресії для кожного досвіду.

Адекватність рівняння регресії перевіряли за критерієм Фішера

$$F_{\text{расч}} = \frac{S^2_{\text{неад}}}{S_{\text{ПП}}^2}.$$

ПРОГРАМНІ ЗАСОБИ З РОЗРАХУНКУ РЕГРЕСІЙНОЇ МОДЕЛІ

План експеримента пятифактороной модели с
варьированием на трех уровнях

ORIGIN := 1

Количество опытов n := 27

Количество факторов k := 5

Константы для определения коэффициентов
уравнения регрессии

O1 := 0.03704 O3 := 0.07220

O2 := 0.04811 O4 := 0.06250

Матрица планирования эксперимента Хартля

Значения отклика функции

$$x := \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ -1 & -1 & 1 & 1 & 1 \\ -1 & 1 & -1 & -1 & -1 \\ 1 & -1 & -1 & -1 & -1 \\ -1 & 1 & -1 & 1 & 1 \\ 1 & -1 & -1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & -1 & -1 \\ -1 & -1 & 1 & -1 & -1 \\ -1 & 1 & 1 & 1 & -1 \\ 1 & -1 & 1 & 1 & -1 \\ 1 & 1 & -1 & -1 & 1 \\ -1 & -1 & -1 & -1 & 1 \\ -1 & 1 & 1 & -1 & 1 \\ 1 & -1 & 1 & -1 & 1 \\ 1 & 1 & -1 & 1 & -1 \\ -1 & -1 & -1 & 1 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -1 \end{pmatrix}$$

$$y := \begin{pmatrix} 0.995 \\ 1.019 \\ 1.000 \\ 1.000 \\ 1.026 \\ 1.025 \\ 0.993 \\ 0.997 \\ 0.989 \\ 0.988 \\ 1.02 \\ 1.028 \\ 1.016 \\ 1.017 \\ 1.000 \\ 1.000 \\ 1.008 \\ 1.0079 \\ 1.0094 \\ 1.0065 \\ 1.01 \\ 1.0016 \\ 1.012 \\ 1.0066 \\ 1.0096 \\ 1.02 \\ 0.997 \end{pmatrix}$$

Коэффициенты уравнения регрессии

$$b_1 := 02 \cdot \sum_{i=1}^n (x_{i,1} \cdot y_i) \quad b_2 := 02 \cdot \sum_{i=1}^n (x_{i,2} \cdot y_i) \quad b_3 := 02 \cdot \sum_{i=1}^n (x_{i,3} \cdot y_i)$$

$$b_4 := 02 \cdot \sum_{i=1}^n (x_{i,4} \cdot y_i) \quad b_5 := 02 \cdot \sum_{i=1}^n (x_{i,5} \cdot y_i)$$

$$b_1 = -1.852 \times 10^{-3} \quad b_2 = -1.852 \times 10^{-3} \quad b_3 = -4.59 \times 10^{-3}$$

$$b_4 = -1.54 \times 10^{-3} \quad b_5 = 9.718 \times 10^{-3}$$

$$b_{12} := 04 \cdot \sum_{i=1}^n (x_{i,1} \cdot x_{i,2} \cdot y_i) \quad b_{13} := 04 \cdot \sum_{i=1}^n (x_{i,1} \cdot x_{i,3} \cdot y_i) \quad b_{14} := 04 \cdot \sum_{i=1}^n (x_{i,1} \cdot x_{i,4} \cdot y_i)$$

$$b_{15} := 04 \cdot \sum_{i=1}^n (x_{i,1} \cdot x_{i,5} \cdot y_i) \quad b_{23} := 04 \cdot \sum_{i=1}^n (x_{i,2} \cdot x_{i,3} \cdot y_i) \quad b_{24} := 04 \cdot \sum_{i=1}^n (x_{i,2} \cdot x_{i,4} \cdot y_i)$$

$$b_{25} := 04 \cdot \sum_{i=1}^n (x_{i,2} \cdot x_{i,5} \cdot y_i) \quad b_{34} := 04 \cdot \sum_{i=1}^n (x_{i,3} \cdot x_{i,4} \cdot y_i) \quad b_{35} := 04 \cdot \sum_{i=1}^n (x_{i,3} \cdot x_{i,5} \cdot y_i)$$

$$b_{45} := 04 \cdot \sum_{i=1}^n (x_{i,4} \cdot x_{i,5} \cdot y_i)$$

$$b_{12} = -5.625 \times 10^{-4} \quad b_{13} = -1.187 \times 10^{-3} \quad b_{14} = -9.375 \times 10^{-4} \quad b_{15} = -1.687 \times 10^{-3}$$

$$b_{23} = -1.312 \times 10^{-3} \quad b_{24} = -5.625 \times 10^{-4} \quad b_{25} = -1.812 \times 10^{-3} \quad b_{34} = -2.188 \times 10^{-3}$$

$$b_{35} = -1.188 \times 10^{-3} \quad b_{45} = -1.875 \times 10^{-4}$$

$$b_{11} := O3 \cdot \sum_{i=1}^n \left[\left[(x_{i,1})^2 - \frac{\sum_{i=1}^n (x_{i,1})^2}{n} \right] \cdot y_i \right] \quad b_{22} := O3 \cdot \sum_{i=1}^n \left[\left[(x_{i,2})^2 - \frac{\sum_{i=1}^n (x_{i,2})^2}{n} \right] \cdot y_i \right]$$

$$b_{33} := O3 \cdot \sum_{i=1}^n \left[\left[(x_{i,3})^2 - \frac{\sum_{i=1}^n (x_{i,3})^2}{n} \right] \cdot y_i \right] \quad b_{44} := O3 \cdot \sum_{i=1}^n \left[\left[(x_{i,4})^2 - \frac{\sum_{i=1}^n (x_{i,4})^2}{n} \right] \cdot y_i \right]$$

$$b_{55} := O3 \cdot \sum_{i=1}^n \left[\left[(x_{i,5})^2 - \frac{\sum_{i=1}^n (x_{i,5})^2}{n} \right] \cdot y_i \right]$$

$$b_{11} = -2.96 \times 10^{-4} \quad b_{22} = -3.538 \times 10^{-4} \quad b_{33} = -5.632 \times 10^{-4} \quad b_{44} = -3.754 \times 10^{-4}$$

$$b_{55} = -3.177 \times 10^{-4}$$

$$b_0 := O1 \cdot \sum_{i=1}^n y_i - \frac{O1}{O2} \cdot \left[b_{11} \cdot \frac{\sum_{i=1}^n (x_{i,1})^2}{n} + b_{22} \cdot \frac{\sum_{i=1}^n (x_{i,2})^2}{n} + b_{33} \cdot \frac{\sum_{i=1}^n (x_{i,3})^2}{n} \dots \right. \\ \left. + b_{44} \cdot \frac{\sum_{i=1}^n (x_{i,4})^2}{n} + b_{55} \cdot \frac{\sum_{i=1}^n (x_{i,5})^2}{n} \right]$$

$$b_0 = 1.009$$

Общий вид уравнения регрессии

$$y(x_1, x_2, x_3, x_4, x_5) := b_0 + b_1 \cdot x_1 + b_2 \cdot x_2 + b_3 \cdot x_3 + b_4 \cdot x_4 + b_5 \cdot x_5 \dots$$

$$+ b_{11} \cdot x_1^2 + b_{22} \cdot x_2^2 + b_{33} \cdot x_3^2 + b_{44} \cdot x_4^2 + b_{55} \cdot x_5^2 + b_{12} \cdot x_1 \cdot x_2 \dots$$

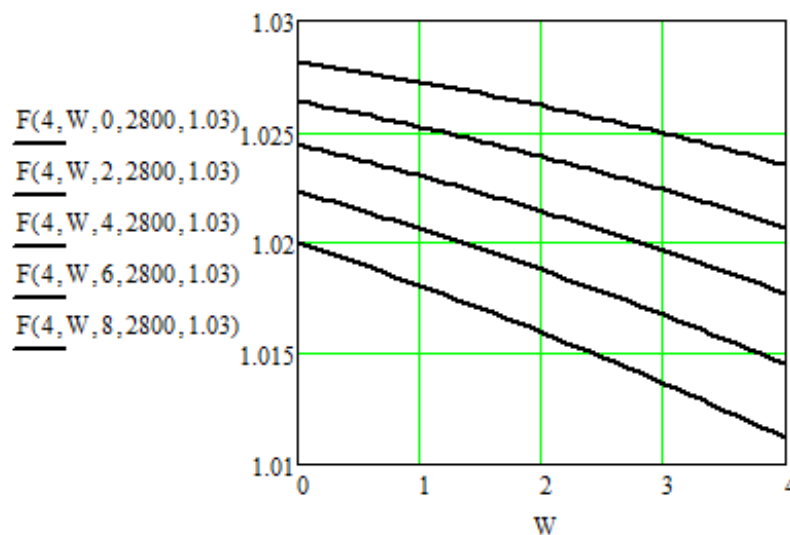
$$+ b_{13} \cdot x_1 \cdot x_3 + b_{14} \cdot x_1 \cdot x_4 \dots$$

$$+ b_{15} \cdot x_1 \cdot x_5 + b_{23} \cdot x_2 \cdot x_3 + b_{24} \cdot x_2 \cdot x_4 + b_{25} \cdot x_2 \cdot x_5 + b_{34} \cdot x_3 \cdot x_4 + b_{35} \cdot x_3 \cdot x_5 + b_{45} \cdot x_4 \cdot x_5$$

$$x1 := \frac{h - 7}{3} \quad x2 := \frac{\frac{W}{h} - 0.5}{0.5} \quad x3 := \frac{DW - 5}{5} \quad x4 := \frac{B - 2175}{675} \quad x5 := \frac{L0 - 1.015}{0.015}$$

$$\begin{aligned} F(h, W, DW, B, L0) := & b0 + b1 \cdot \frac{h - 7}{3} + b2 \cdot \frac{\frac{W}{h} - 0.5}{0.5} + b3 \cdot \frac{DW - 5}{5} + b4 \cdot \frac{B - 2175}{675} + b5 \cdot \frac{L0 - 1.015}{0.015} \dots \\ & + b11 \cdot \left(\frac{h - 7}{3}\right)^2 + b22 \cdot \left(\frac{\frac{W}{h} - 0.5}{0.5}\right)^2 + b33 \cdot \left(\frac{DW - 5}{5}\right)^2 + b44 \cdot \left(\frac{B - 2175}{675}\right)^2 \dots \\ & + b55 \cdot \left(\frac{L0 - 1.015}{0.015}\right)^2 + b12 \cdot \frac{h - 7}{3} \cdot \frac{\frac{W}{h} - 0.5}{0.5} + b13 \cdot \frac{h - 7}{3} \cdot \frac{DW - 5}{5} \dots \\ & + b14 \cdot \frac{h - 7}{3} \cdot \frac{B - 2175}{675} \dots \\ & + b15 \cdot \frac{h - 7}{3} \cdot \frac{L0 - 1.015}{0.015} + b23 \cdot \frac{\frac{W}{h} - 0.5}{0.5} \cdot \frac{DW - 5}{5} + b24 \cdot \frac{\frac{W}{h} - 0.5}{0.5} \cdot \frac{B - 2175}{675} \dots \\ & + b25 \cdot \frac{\frac{W}{h} - 0.5}{0.5} \cdot \frac{L0 - 1.015}{0.015} + b34 \cdot \frac{DW - 5}{5} \cdot \frac{B - 2175}{675} + b35 \cdot \frac{DW - 5}{5} \cdot \frac{L0 - 1.015}{0.015} \\ & + b45 \cdot \frac{B - 2175}{675} \cdot \frac{L0 - 1.015}{0.015} \end{aligned}$$

$$W := 0, 0.1..4$$



ПРОГРАМНІ ЗАСОБИ З АВТОМАТИЗОВАНОГО РОЗРАХУНКУ
ПОКАЗНИКА ФОРМИ СМУГИ І АМПЛІТУДИ ХВИЛЯСТОСТІ СМУГИ

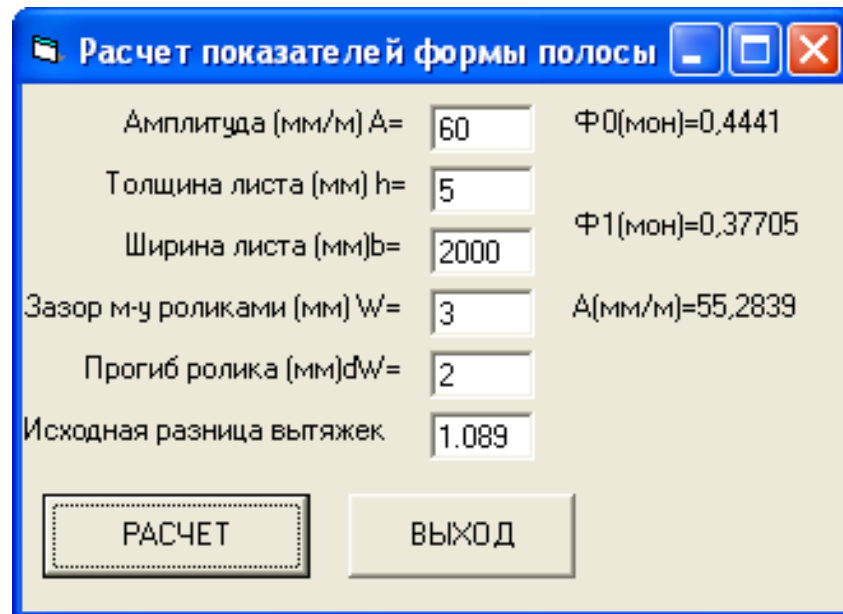


Рисунок И.1 – Интерфейс програми

Private Sub

Dim x1, x2, x3, x4, x5 As Single

Dim b1, b2, b3, b4, b5, b0 As Single

Dim b12, b13, b14, b15, b23, b24, b25, b34, b35, b45 As Single

Dim b11, b22, b33, b44, b55 As Single

Dim y, L1 As Single

Dim h, W, dW, b, L0 As Single

Open App.Path & "\result.txt" For Output As 1

b1 = -0.001852

b2 = -0.001852

b3 = -0.00459

b4 = -0.00154

b5 = 0.009718

b12 = -0.0005625

b13 = -0.001187

b14 = -0.0009375

b15 = -0.001687

b23 = -0.001312

b24 = -0.0005625

b25 = -0.001812

b34 = -0.002188


```

b35 = -0.001188
b45 = -0.0001875
b11 = -0.000296
b22 = -0.0003538
b33 = -0.0005632
b44 = -0.0003754
b55 = -0.0003177
b0 = 1.009
A = Val(Text1.Text)
h = Val(Text2.Text)
b = Val(Text3.Text)
W = Val(Text4.Text)
dW = Val(Text5.Text)
L0 = Val(Text6.Text)

L0 = 1 + (3.1416 / 2000) ^ 2 * A ^ 2
F0 = (L0 - 1) / b * 100000#
x1 = (h - 7) / 3
x2 = (W / h - 0.5) / 0.5
x3 = (dW - 5) / 5
x4 = (b - 2175) / 675
x5 = (L0 - 1.015) / 0.015
y = b0 + b1 * x1 + b2 * x2 + b3 * x3 + b4 * x4 + b5 * x5
y = y + b11 * x1 ^ 2 + b22 * x2 ^ 2 + b33 * x3 ^ 2 + b44 * x4 ^ 2 + b55 *
x5 ^ 2 + b12 * x1 * x2 + b13 * x1 * x3 + b14 * x1 * x4
y = y + b15 * x1 * x5 + b23 * x2 * x3 + b24 * x2 * x4 + b25 * x2 * x5 +
b34 * x3 * x4 + b35 * x3 * x5 + b45 * x4 * x5
L1 = y
Fpirson = (L1 - 1) / b * 100000#
Fpirson = Int(Fpirson * 100000#) / 100000#
A1 = 2000 / 3.1416 * Sqr(L1 - 1)
A1 = Int(A1 * 10000) / 10000
Print #1, "h="; h; "W="; W; "b="; b; "dW="; dW; " lmd0="; L0;
"lmd1="; Int(L1 * 100000#) / 100000#; "F(Pirson)="; Int(Fpirson * 100000#) /
100000#; "mon A1="; A1
L0 = L1
Label7.Caption = "Ô1(îî)=" & CStr(Fpirson)
Label8.Caption = "A(îî/i)=" & CStr(A1)
Label9.Caption = "Ô0(îî)=" & CStr(Int(F0 * 10000) / 10000)
End Sub

```

Додаток К

АКТИ ВИКОРИСТАННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ РОБОТИ НА
МЕТАЛУРГІЙНОМУ ТА МАШИНОБУДІВНОМУ ПІДПРИЄМСТВАХ

УТВЕРЖДАЮ:

Директор производства прокатного
оборудования

ЧАО «Новокраматорский машино-
строительный завод»

г. Краматорск



В. Н. Тиунов

«28» сентября 2018 г.

АКТ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ

Результаты кандидатской диссертационной работы Гаврильченко Евгения Юрьевича, а именно, математические модели напряженно-деформированного состояния металла при его правке, а также соответствующие им программные средства по автоматизированному расчету технологических настроек и конструктивных параметров оборудования были использованы в ЧАО «Новокраматорский машиностроительный завод» при проектировании листопрямильных машин и технологии правки горячекатаных листов, что позволило снизить трудоемкость проектно-конструкторских и проектно-технологических работ. Экономический эффект составил 320 тыс. грн. по уровню цен на начало 2018 года. Расчеты экономического эффекта не прилагаются, т.к. содержат элементы коммерческой тайны ЧАО «Новокраматорский машиностроительный завод».

Главный инженер
производства прокатного
оборудования ЧАО НКМЗ

В.А. Ступак

УТВЕРЖДАЮ:

Главный прокатчик ОАО «АМЗ»

Крюков В.В.

06.03.2014 г.



АКТ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ

материалов диссертационной работы Гаврильченко Евгения Юрьевича, включающих в себя:

- рекомендации по совершенствованию технологических режимов холодной и горячей правки листового металлопроката и конструктивных параметров листопрямильных машин;
- программные средства по автоматизированному проектированию технологической настройки ЛПМ ТЛС 2800

используются в автоматической системе управления листопрямильной машины ТЛС 2800 АМЗ.

Листопрямильная машина с системой автоматической технологической настройки была спроектирована и поставлена ПАО «НКМЗ», введена в эксплуатацию с января 2014 года. Применение системы автоматизированного проектирования технологической настройки позволило улучшить качество правки листового металлопроката и повысить оперативность настройки при переходе с одного сортамента на другой, а также расширить технологические возможности машины. Благодаря более точной технологической настройке правильных валков машины появилась возможность обрабатывать листы с такими трудновыправляемыми дефектами как коробоватость, а также волнистость, превышающая 30 мм/м.

Правке подвергались листы из конструкционных и легированных марок сталей толщиной 8...100 мм. Результирующая кривизна не превышала допустимых значений европейских и российских стандартов.

Технолог ЛПЦ №1

Петров А.О.

Додаток Л

АКТИ ВИКОРИСТАННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ
РОБОТИ У НАВЧАЛЬНОМУ ЗАКЛАДІ

ЗАТВЕРДЖУЮ
Перший проректор
Донбаської державної
машинобудівної академії

А. М. Фесенко

«07» грудня 2017 р.

АКТ

**про впровадження результатів дисертаційної роботи Гаврильченка
Євгена Юрійовича на тему: «Удосконалення процесу правки
гарячекатаних листів і конструктивних параметрів листопривильних
машин для його реалізації» у навчальний процес**

Члени комісії у складі декана факультету машинобудування, доцента кафедри «Інформатика і інженерна графіка», к.т.н. Красовського С. С. та завідувача кафедри «Автоматизовані металургійні машини та обладнання», професора, к.т.н. Федорінова В. А. склали цей акт про те, що в період 2014-2017 р.р. результати дисертаційної роботи Гаврильченка Євгена Юрійовича на тему: «Удосконалення процесу правки гарячекатаних листів і конструктивних параметрів листопривильних машин для його реалізації», які містять:

– методики і обладнання для експериментальних досліджень процесу правки гарячекатаних листів з нерівномірно розподіленою хвилястістю по ширині прокату;

– комплекс математичних моделей процесу правки листів з диференційованим прикладанням сили по ширині прокату, що включає аналітичну, скінчено-елементну і регресійну моделі;

– методики розрахунку, алгоритми і програмні засоби з автоматизованого розрахунку технологічних налаштувань листопривильних машин;

– практичні рекомендації та науково-обґрунтовані технічні рішення щодо вибору конструктивних параметрів та вдосконалення конструкцій листопривільних машин, а також технологічних режимів правки гарячекатаних листів

використані на кафедрі «Автоматизовані металургійні машини та обладнання» Донбаської державної машинобудівної академії при викладанні дисциплін «Комп'ютерне моделювання і проектування металургійного обладнання», «Основи автоматизованого проектування технологічного обладнання», «Механічне обладнання металургійних заводів», «Основи наукових досліджень, техніка експерименту» та при виконанні дипломних робіт магістрами спеціальності 133 «Галузеве машинобудування» (спеціалізація «Інжиніринг автоматизованих машин і агрегатів»).

Зав. кафедри «Автоматизовані металургійні машини та обладнання», професор, к.т.н.



В. А. Федорінов

Декан факультету машинобудування,
доцент кафедри «Інформатики і
інженерної графіки», к.т.н.



С. С. Красовський