

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

**Кваліфікаційна наукова
праця па правах рукопису**

Боровік Павло Володимирович

УДК 621.965; 621.967

ДИСЕРТАЦІЯ

**РОЗВИТОК ТЕОРЕТИЧНИХ ОСНОВ ТА ВДОСКОНАЛЕННЯ
ТЕХНОЛОГІЇ І ОБЛАДНАННЯ ПРОЦЕСІВ ОПЕРАЦІЙ
РОЗДІЛЕННЯ В ПРОКАТНОМУ ВИРОБНИЦТВІ**

**05.03.05 – процеси та машини обробки тиском
13 – механічна інженерія**

Подається на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук

**Дисертація містить результати власних досліджень.
Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають
посилання на відповідне джерело _____ П.В. Боровік**

**Науковий консультант Грибков Едуард Петрович
доктор технічних наук, доцент**

**Сатонін Олександр Володимирович
доктор технічних наук, професор**

Краматорськ – 2021

АНОТАЦІЯ

Боровік П.В. Розвиток теоретичних основ та вдосконалення технології і обладнання процесів операцій розділення в прокатному виробництві. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.03.05 – Процеси та машини обробки тиском (13 – Механічна інженерія). – Донбаська державна машинобудівна академія, Міністерство освіти і науки України, Краматорськ, 2021.

Дисертація спрямована на вирішення важливої науково-технічної проблеми поліпшення техніко-економічних показників процесів поздовжнього і поперечного розділення листового і сортового металопрокату за рахунок підвищення їхньої енергоефективності та якості готових виробів, на основі розвитку наукових і практичних основ застосування методу скінченних елементів для вирішення комбінованих задач теорій пружності, пластичності та руйнування з урахуванням змінних умов протікання процесу.

На підґрунті аналітичного огляду виявлені шляхи та напрями подальшого розвитку розділових операцій прокатного виробництва, а також вдосконалення обладнання що їх реалізує, котрі полягають в розвитку і узагальненні теоретичних основ цих процесів та розробці на їх основі уніфікованих нових методик розрахунку опору розрізанню, поліпшенні технологічних режимів та інструментів, підвищенні основних показників якості на основі застосування аналізу експериментальних даних та моделювання методом скінченних елементів. Для цього необхідний обґрунтований вибір скінченних елементів, правил контролю і управління їх геометрією в зоні розділення, процедури з формування та зростання тріщини, а також врахування впливу жорсткості станини ножиць та термодинамічних ефектів в матеріалі під час розділення.

Метою роботи є підвищення техніко-економічних показників технологій і обладнання процесів операцій розділення за рахунок розвитку теоретичних основ,

розробки практичних рекомендацій по вдосконаленню технологій, інструменту і обладнання розділових операцій в прокатному виробництві.

Об'єктом дослідження є процеси і обладнання для здійснення поздовжніх і поперечних розділових операцій листового і сортового металопрокату.

Тема роботи відповідає розвитку науки і техніки в сфері «Обробка металів тиском», що є пріоритетним напрямком наукової школи Донбаської державної машинобудівної академії.

В роботі обґрунтовано та здійснено вибір напрямку і методів дослідження технологій і обладнання для розділення листового і сортового металопрокату.

В рамках роботи встановлені практично-наукові умови застосування методу скінченних елементів для вирішення комбінованих задач розділення для плоских та об'ємних моделей. Проаналізовано типи скінченних елементів, правила контролю розмірів сітки в зоні розділення, процедура формування та зростання тріщини в пластичному матеріалі з ізотропним зміцненням, пружні характеристики певних конструкцій ножиць, а також термодинамічні ефекти в матеріалі під час гарячого розділення, що сприяло узагальненню математичних моделей для умов гарячого та холодного розділення. Розроблено алгоритм отримання та обробки числових даних, що дозволяє оперувати, як локальними даними стосовно виділених елементів або груп елементів, так і їх узагальненими значеннями.

Запропоновані моделі механічних властивостей матеріалу, як в гарячому так і в холодному станах, що дозволяють для гарячого металу враховувати хімічний склад, температуру, ступінь і швидкість деформації розрізуваної сталі, тоді як в холодному стані – границю міцності і границю текучості матеріалу при розтягуванні та відносне подовження після розривання, а також швидкість деформації.

За результатами двовимірною моделювання поперечного гарячого розрізання на ножицях з паралельними ножами встановлено що опір розрізанню для конкретної марки сталі може змінюватися в широкому діапазоні за рахунок варіювання вмісту хімічних елементів і різної швидкості розрізання.

Щодо процесу розрізання паралельними ножами в холодному стані вивчали якісний та кількісний частинний вплив відносно швидкості розрізання, висоти

перерізу металу, границі текучості та відносного подовження при розриванні на максимальне значення опору розрізання і відносного проникнення до сколювання.

Була розроблена тривимірна скінченно-елементна модель процесу поперечного розділення на ножицях квадратних сортових заготовок в гарячому стані ножами трикутної форми з траєкторією переміщення під кутом до горизонталі, яка дозволяє вивчати формоутворення в зоні зрізу та прилеглих до неї.

Шляхом скінченно-елементного моделювання вивчали процеси гарячого і холодного розділення квадратних та круглих заготовок при розрізанні паралельними та фасонними ножами, а також холодного розділення фасонних профілів.

На підставі результатів скінченно-елементного моделювання процесу обрізання кромки товстих листів на дискових ножицях в гарячому і холодному стані встановлено вплив сукупності сил зовнішнього опору на кінематику руху металу в умовах сталого процесу розрізання, що дозволяє розробляти технологічні схеми виробництва товстих листів із суміщенням процесів розрізання і правлення.

Виявлено, що процеси холодного розрізання на ножицях з похилим, шевронним і дуговим ножем та дискових ножицях потребують уточнення розрахунку максимальної товщини розрізуваних профілів, оскільки недостатньо враховувати лише границю міцності сталі, тому що суттєве значення має розмір осередку деформації, а це потребує уточнення відносного проникнення до сколювання.

Виявлено фактори, що впливають на відносне проникнення до сколювання при холодному розрізанні та розроблено із застосуванням планування експерименту на базі методу скінченних елементів і експериментальних даних модель розрахунку відносного проникнення до сколювання при холодному розрізанні.

Проведено експериментальні дослідження стійкості інструменту на прикладі розрізання високоміцних сталей з метою встановлення впливу зношування ножів на силу та якість розрізання. Уточнено величину коефіцієнтів збільшення сили розрізання через знос різальних кромки і збільшення бічного зазору паралельних та гільйотинних ножів, що є необхідним при проектуванні ножиць.

Визначено на основі аналізу скінченно-елементних моделей та експериментальних даних вплив конструктивних параметрів різальних інструментів на енер-

госилові параметри та показники якості розрізання шевронними ножами листового прокату та фасонними ножами квадратної заготовки. Розроблені методики розрахунку і програмні засоби для визначення конструктивних параметрів шевронного ножа поперечного розрізання листового матеріалу і фасонного ножа для розрізання в гарячому стані квадратної заготовки на кут.

Розширено уявлення про закономірності процесів розділення, що дозволило розробити, вдосконалити та доповнити методики і програмні засоби розрахунку енергосилових параметрів процесів розділення: поперечного розрізання паралельними ножами в гарячому стані; для холодного розрізання паралельними ножами отримано регресійну модель розрахунку відносного проникнення до сколювання; поперечного розрізання фасонними ножами сортових профілів в гарячому та холодному стані; поздовжнього та поперечного розрізання дуговими ножами в холодному стані; поздовжнього розрізання дисковими ножами в гарячому та холодному стані; поперечного розрізання шевронними ножами в холодному стані.

Розроблено і запатентовано конструкції шевронного ножа з фіксованим кутом нахилу та округленням в вершині сходження різальних площин та з регульованим кутом нахилу різальних кромки, а також конструкцію та способи встановлення дискових ножиць товстолистового прокату.

Розроблено технологічні та конструктивні заходи спрямовані на розширення сортаменту та підвищення якості металопродукції процесів поздовжнього і поперечного розділення на ножицях в холодному і гарячому стані. Ефективність технічних рішень підтверджується практичними результатами та актами використання результатів дисертаційної роботи. Результати роботи у вигляді програмних засобів, а також технологічних і конструктивних рекомендації були передані в промислове впровадження, а також використовуються в навчальному процесі студентів спеціальності «Галузеве машинобудування» Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля.

Ключові слова: розділові операції, розрізання на ножицях, математичне моделювання, метод скінченних елементів, модель механічних властивостей, напружено-деформований стан.

ABSTRACT

Borovik PV Development of theoretic foundations and improvement of technology and equipment of separation operations processes in rolling production. – Qualification scientific work on the rights of the manuscript.

Dissertation for the degree of Doctor of Science in Technical Sciences in the Specialty 05.03.05 – Processes and Machines of Plastic Working. – Donbass State Engineering Academy, the Ministry of Education and Science of Ukraine, Kramatorsk, 2021.

The dissertation is aimed at solving an important scientific and technical problem. Namely, the improvement of technical and economic indicators of the processes of longitudinal and transverse separation of sheet and section rolled products by improving energy efficiency ratio and products liability. This is achieved through the advancement of scientific and practical bases application of the finite element method to solve combined problems of theories of elasticity, plasticity and fracture, taking into account the process changing conditions.

Analytical review identified ways and directions of further advancement separation operations of rolling production, as well as improvement of equipment that implements them. All this are to develop and generalize the theoretical foundations of these processes and develop on their basis unified new methods for calculating shearing resistance, improving technological modes and tools, improving the main quality indicators based on the application of experimental data analysis and finite element simulation. This purpose requires substantiation of the type of finite elements, rules of control and management of their geometry in the separation zone, the procedure of crack formation and growth, as well as the influence of elastic characteristics of shears and thermodynamic effects in the material during separation are justified.

Purpose of the dissertation is to increase the technical and economic indicators of technologies and equipment of the processes of separation operations through the development of theoretical foundations, development of practical recommendations for

improving technologies, tools and equipment of separation operations in rolling production.

Object of research is the processes and equipment for longitudinal and transverse separation operations of sheets and sectional bar.

Theme of the dissertation corresponds to the development of science and technology in the field of "Processing of metals by pressure", which is a priority of the scientific school of the Donbass State Engineering Academy.

The choice research direction and methods of technologies and equipment of separation processes of sheet and sectional metal-roll is substantiated and carried out.

Dissertation establishes practical and scientific conditions for the application of the finite element method to solve combined separation problems for 2D and 3D models. The finite elements types for the tools and separating materials is reasonable. The rules of mesh size control in the separation zone is selected. At the FEM simulations the process of crack formation and growth in plastic material with isotropic hardening is described. The elastic characteristics of certain shears designs are taken into account. Also thermodynamic effects in the material during hot separation are analyzed. An algorithm for obtaining and processing numerical data has been developed, which allows operating both local data on selected elements or groups of elements, and their generalized values.

Models of mechanical properties of the material in both hot and cold states are proposed, which allow for hot metal to take into account the chemical composition, temperature, strain and strain rate of shearing steel, while in the cold state - tensile strength and yield stress of the material and elongation, after rupture, as well as the strain rate.

The results of simulations of 2D cross-shearing in hot state at the shears with parallel knives found that cutting resistance for a particular grade of steel can vary over a wide range by varying the content of chemical elements and different speeds of shearing.

Regarding the cold shearing process with parallel knives, the qualitative and quantitative partial effect of relative shearing speed, metal cross-sectional height, yield

stress and relative elongation at break on the maximum value of cutting resistance and relative penetration at fracture was studied.

A 3D finite-element model of the process of cross-separating on shears of square bars in hot condition with triangular knives and trajectory of movement at an angle to the horizontal was developed. This model allows to study the deformation in the cut area and adjacent to it.

The processes of hot and cold separation of square and round workpieces when shearing with parallel and profiled knives, as well as cold separation of sections bars were studied by finite element simulations.

At the results analysis of finite element simulations of the process of shearing the edges of thick sheets on disc shears in hot and cold condition, the influence of external resistance forces on the kinematics of metal motion in a stable shearing process is defined. It's allows to develop technological schemes for the thick sheets production with a combination process of shearing and straightening.

Founded that the processes of cold shearing on shears with guillotined, chevron, arc and disc knives require refinement of the calculation of the maximum sheets thickness, because it is not enough to take into account only the steel strength stress, because relative penetration before fracture influences on the deformation zone length and require refinement.

The factors influencing the relative penetration before fracture in cold shearing are established and the model of calculation of relative penetration before fracture in cold shearing is developed through the application experimental plan of the finite element method and experimental data basis.

On the example high-strength steels shearing at purpose to establish the effect of knife wear on the strength and quality of shearing the experimental studies of the tool resistance to abrasion and wear stability were performed . The value of the coefficients of increase of shearing force due to wear of knife shearing edges and increase of lateral clearance for parallel and guillotine knives, which is necessary when designing shears, is specified.

Based on the analysis of finite element simulations and experimental research processes by chevron knives shearing for cold sheet metal and profiled knives for hot square billet, the influence of shearing tools construction parameters on the force parameters and quality indicators is determined. Calculation methods and software for determining the construction parameters of a chevron knife for cold sheet cross-shearing and profiled knife for shearing in the hot state of a square billet at an angle have been developed.

The understanding and idea of the regularities of hot and cold state metal separation processes on shears different constructions has been expanded. This has allowed to develop, improve and supplement methods and software tools for calculating the power parameters of separation processes on shears: cross-shearing with parallel knives in the hot state; for cold shearing with parallel knives the regression model of calculation of relative penetration to fracture is received; cross-shearing with profiled knives of sectional bars in hot and cold condition; longitudinal and transverse shearing with arc knives in the cold state; longitudinal shearing with disc knives in hot and cold condition; cross-section with chevron knives in the cold state.

Developed and patented constructions of a chevron knife with a fixed cut-out cut and rounding at the top of the ascent of the shearing planes and with an adjustable angle of the shearing edges, as well as the construction and methods of installation disc shears with of shearing and straightening process combination.

Technological and constructive measures aimed at assistance expanding the range and improving the quality of metal rolled processes of longitudinal and transverse separation with shears in the cold and hot state is developed. The effectiveness of technical and technological solutions is confirmed by practical results and acts of using the results of the dissertation. The results of dissertation in the form of software, as well as technological and constructive recommendations were transferred to industrial implementation, and are also used in the educational process of students majoring in "Mechanical Engineering" of the Volodymyr Dahl East Ukrainian National University.

Keywords: separation operations, shearing on shears, mathematical simulation, finite element method, model of mechanical properties, stress-strain state.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ РОБІТ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Borovik P. V. Influence of a chevron type knife design on the quality of sheet material shearing / P. V. Borovik, M. E. Seleznyov // Metallurgical and Mining Industry. – 2015. – No. 5. – P. 218-223. – ISSN 2076-0507. – Режим доступу: https://www.metaljournal.com.ua/assets/MMI_2014_6/MMI_2015_5/028BOrovik.pdf
2. Borovik P.V. 3D model of cutting using the rolling cut type shears / P. V. Borovik // Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University. – Magnitogorsk, 2013. – № 5. – P. 40-42. – ISSN 1995-2732. – Режим доступу: <https://cyberleninka.ru/article/n/3d-model-of-cutting-by-rolling-cut-type-shears>
3. Maintenance of Required Mechanical Properties of Sheets with the Use of Rolling Heat / I. E. Davydov, I. V. Rakova, M. B. Lutskiy, V. A. Lutsenko, P. V. Borovik // Metallurgical and Mining Industry. – 2010. – Vol. 2, No. 4. – P. 298-301. – ISSN 2076-0507 – Режим доступу: <https://www.metaljournal.com.ua/assets/Uploads/attachments/Davydov298.pdf>
4. The Finite Element Modulation of Thermostressed State of Coating Formation at Electric Contact Surfacing of “Shaft” Type Parts / OV Berezshnaya, EP Gribkov, PV Borovik, VD Kassov // Advances in Materials Science and Engineering, vol. 2019, Article ID 7601792, 18 pages, 2019. <https://doi.org/10.1155/2019/7601792>
5. Боровик П. В. Возможности повышения качества резки шевронным ножом / П. В. Боровик // Производство проката. – 2014. – №3. – С.36-39. – ISSN 1684-257X. – Режим доступу: <https://elibrary.ru/item.asp?id=21234088>
6. Боровик П. В. Решение проблемы учета механических свойств материала при моделировании процесса горячей резки на ножницах / П. В. Боровик, В. А. Луценко // Сборник научных трудов ДонГТУ. – Алчевск, 2010. – Вып. 32. – С. 175-181. – ISSN 2077-1738. – Режим доступу: <http://masters.donntu.org/2018/fimm/shcherbakov/library/article4.htm>
7. Боровик П. В. Метод построения кривых текучести и пластичности при трехмерном моделировании процессов холодной резки на ножницах / П. В.

Боровик // Вісник Національного технічного університету "ХПІ". Сер. : Інноваційні технології та обладнання обробки матеріалів у машинобудуванні та металургії: зб. наук. пр. – Харків : НТУ "ХПІ", 2018. – № 31 (1307). – С. 8-13 – Режим доступу: <http://repository.kpi.kharkov.ua/handle/KhPI-Press/41119>

8. Исследование энергосиловых параметров процесса поперечного разделения на ножницах непрерывнолитых сортовых заготовок / А. В. Сатонин, П. В. Боровик, П. А. Петров, С. М. Стриченко // Сборник научных трудов ДонГТУ. – Алчевск, 2011. – Вып. 35. – С. 131-137. – ISSN 2077-1738. – Режим доступу: <http://sbornik.dstu.education/articles/RU/262.pdf>

9. Боровик П. В. Математическое моделирование процесса резки на ножницах с учетом упругой деформации станины / П. В. Боровик. / Сборник научных трудов / Вестник национального технического университета ХПИ. – Харьков, 2011. – Вып. 47. – С. 76-80. – ISSN 2079-5459. – Режим доступу: <http://repository.kpi.kharkov.ua/handle/KhPI-Press/16302>

10. Анализ энергосиловых параметров процесса разделения на ножницах сортовых профилей в горячем состоянии / П. Н. Денищенко, П. В. Боровик, П. А. Петров, С. М. Стриченко // Обработка материалов давлением : сб. науч. тр. – Краматорск ДГМА, 2011. – № 4 (29). – С. 172–176. – ISSN 2076-2151. – Режим доступу: [http://www.dgma.donetsk.ua/science_public/omd/4\(29\)-2011/article/11DPNSHC.pdf](http://www.dgma.donetsk.ua/science_public/omd/4(29)-2011/article/11DPNSHC.pdf)

11. Боровик П. В. Теоретический анализ процесса горячей резки на ножницах / П. В. Боровик // Обработка материалов давлением : сб. науч. тр. – Краматорск ДГМА, 2012. – № 1 (30). – С. 218–222. – ISSN 2076-2151. – Режим доступу: [http://www.dgma.donetsk.ua/science_public/omd/1\(30\)-2012/article/12BPVCPS.pdf](http://www.dgma.donetsk.ua/science_public/omd/1(30)-2012/article/12BPVCPS.pdf)

12. Боровик П. В. Оценка влияния жесткости станины на параметры процесса резки на ножницах / П. В. Боровик // Сборник научных трудов ДонГТУ. – Алчевск, 2012. – Вып. 36. – С. 269-275. – ISSN 2077-1738. – Режим доступу: <http://sbornik.dstu.education/articles/RU/222.pdf>

13. Боровик П. В. Теоретический анализ взаимосвязи кривой текучести материала и кривых сопротивления срезу процесса резки на ножницах / П. В. Боровик // Обработка материалов давлением : сб. науч. тр. – Краматорск ДГМА, 2012. – № 2 (31). – С. 69–73. – ISSN 2076-2151. – Режим доступа:

[http://www.dgma.donetsk.ua/science_public/omd/2\(31\)-2012/article/12BPVCPS.pdf](http://www.dgma.donetsk.ua/science_public/omd/2(31)-2012/article/12BPVCPS.pdf)

14. Боровик П. В. Влияние деформационного нагрева на результаты математического моделирования процесса резки на ножницах / П. В. Боровик // Сборник научных трудов ДонГТУ. – Алчевск, 2012. – Вып. 37. – С. 135-140. – ISSN 2077-1738. – Режим доступа: http://nbuv.gov.ua/UJRN/sntdgtu_2012_37_18.

15. Боровик П. В. Развитие технологии обрезки боковых кромок листового проката дисковыми ножами / П. В. Боровик, М. Е. Селезнев // Сборник научных трудов ДонГТУ. – Алчевск, 2012. – Вып. 37. – С. 156-163. – ISSN 2077-1738. – Режим доступа: http://nbuv.gov.ua/UJRN/sntdgtu_2012_37_21.

16. Боровик П. В. Теоретический анализ процесса разделения при горячей резке на ножницах / П. В. Боровик // Вісник НТУ України “КПІ”. Серія: Машинобудування. – К., – 2012, – №64. – С. 190-195. – ISSN 2305-9001. – Режим доступа: <https://ela.kpi.ua/bitstream/123456789/3073/1/190-64.pdf>

17. Боровик П. В. Экспериментальная оценка влияния сил внешнего сопротивления на скорость резки толстых листов дисковыми ножами / П. В. Боровик, М. Е. Селезнев // Обработка материалов давлением : сб. науч. тр. – Краматорск ДГМА, 2012. – № 3 (32). – С. 181-184. – ISSN 2076-2151.

[http://www.dgma.donetsk.ua/science_public/omd/OMD_3\(32\)_2012_HTML/article/12BPVSDK.pdf](http://www.dgma.donetsk.ua/science_public/omd/OMD_3(32)_2012_HTML/article/12BPVSDK.pdf)

18. Боровик П. В. Теоретический анализ бокового усилия при горячей резке параллельными ножами / П. В. Боровик // Обработка материалов давлением : сб. науч. тр. – Краматорск ДГМА, 2012. – № 4 (33). – С. 132-135. – Режим доступа:

[http://www.dgma.donetsk.ua/science_public/omd/OMD_4\(33\)_2012_HTML/article/12BPVCPK.pdf](http://www.dgma.donetsk.ua/science_public/omd/OMD_4(33)_2012_HTML/article/12BPVCPK.pdf)

19. Боровик П. В. Анализ влияния химсостава стали на удельное сопротивление резке в процессе горячего разделения на ножницах / П. В. Боровик

// Сборник научных трудов ДонГТУ. – Алчевск, 2012. – Вып. 38. – С. 156-162. – ISSN 2077-1738. – Режим доступа: http://nbuv.gov.ua/UJRN/sntdgtu_2012_38_20.

20. Боровик П. В. Особенности процесса холодной резки квадратной заготовки на сортовых ножницах / П. В. Боровик, П. А. Петров // Сборник научных трудов ДонГТУ. – Алчевск, 2012. – Вып. 38. – С. 190-196. – ISSN 2077-1738. – Режим доступа: http://nbuv.gov.ua/UJRN/sntdgtu_2012_38_24.

21. Боровик П. В. К вопросу качества резки шевронными ножами / П. В. Боровик // Обработка материалов давлением : сб. науч. тр. – Краматорск ДГМА, 2013. – № 1 (34). – С. 245-250. – ISSN 2076-2151. – Режим доступа: [http://www.dgma.donetsk.ua/science_public/omd/omd_1\(34\)_2013/article/13BPVPCK.pdf](http://www.dgma.donetsk.ua/science_public/omd/omd_1(34)_2013/article/13BPVPCK.pdf)

22. Боровик П. В. Анализ условий захвата толстолистого проката в процессе резки дисковыми ножницами / П. В. Боровик, П. А. Петров, М. Е. Селезнев // Обработка материалов давлением : сб. науч. тр. – Краматорск ДГМА, 2013. – № 2 (35). – С. 227-231. – ISSN 2076-2151. – Режим доступа: [http://www.dgma.donetsk.ua/science_public/omd/omd_2\(35\)_2013/article/13bvpvps.pdf](http://www.dgma.donetsk.ua/science_public/omd/omd_2(35)_2013/article/13bvpvps.pdf)

23. Боровик П. В. Теоретическое исследование работы дисковых ножниц при увеличенном диаметре верхнего ножа / П. В. Боровик, М. Е. Селезнев // Сборник научных трудов ДонГТУ. – Алчевск, 2013. – Вып. 39. – С. 135-140. – ISSN 2077-1738. – Режим доступа: http://nbuv.gov.ua/UJRN/sntdgtu_2013_39_21.

24. Боровик П. В. Математическое моделирование процесса резки толстолистовых раскатов в горячем состоянии на дисковых ножницах / П. В. Боровик // Ресурсозберігаючі технології виробництва та обробки тиском матеріалів у машинобудуванні: Зб. наук. пр. – Луганськ: Вид-во СНУ ім. В. Даля., 2013. – №1(14). – С. 69-76. – ISSN 2218-1806. – Режим доступа: http://nbuv.gov.ua/UJRN/rtvotmm_2013_1_10.

25. Боровик П. В. Теоретическое определение силы резки ножницами фасонных профилей / П. В. Боровик, П. А. Петров // Metallurgical and

горнорудная промышленность. – 2013. – № 5 (284). – С.41-44. – ISSN 0543-5749. – Режим доступа: http://nbuv.gov.ua/UJRN/MGRP_2013_5_15

26. Боровик П. В. Повышение качества толстых листов за счёт применения шевронного ножа новой конструкции / П. В. Боровик, М. Е. Селезнев // 3б. наук. пр. "Вісник НТУ "ХПІ" : Нові рішення в сучасних технологіях, – Харьков, 2013, – №43 (1016). – С. 41-46. – ISSN 2079-5459. – Режим доступа: <http://archive.kpi.kharkov.ua/files/35657/>

27. Боровик П. В. 3D модель процесса поперечного разделения на ножницах непрерывнолитых сортовых заготовок / П. В. Боровик, П. А. Петров // Сборник научных трудов ДонГТУ. – Алчевск, 2013. – Вып. 41. – С. 151-155. – ISSN 2077-1738. – Режим доступа: http://nbuv.gov.ua/UJRN/sntdgtu_2013_41_26

28. Боровик П. В. Метод построения кривых сопротивления резке в процессе горячего разделения металла на ножницах / П. В. Боровик // Metallurgical and Mining Industry. – 2014. – № 2 (287). – С.25-29. – ISSN 0543-5749. – Режим доступа: http://nbuv.gov.ua/UJRN/MGRP_2014_2_10

29. Боровик П. В. Трёхмерное моделирование процесса разделения круглого профиля на ножницах / П. В. Боровик // Сборник научных трудов ДонГТУ. – Алчевск, 2014. – Вып. 1(42). – С. 102-106. – ISSN 2077-1738. – Режим доступа: http://nbuv.gov.ua/UJRN/sntdgtu_2014_1_17

30. Боровик П. В. Анализ процесса разделения металла в холодном состоянии на ножницах с параллельными ножами / П. В. Боровик // Сборник научных трудов ДонГТУ. – Алчевск, 2014. – Вып. 2(43). – С. 36-42. – ISSN 2077-1738. – Режим доступа: http://nbuv.gov.ua/UJRN/sntdgtu_2014_2_8

31. Боровик П. В. Анализ напряженно-деформированного состояния металла при разделении квадратного профиля на ножницах / П. В. Боровик // Обработка материалов давлением : сб. науч. тр. – Краматорск ДГМА, 2014. – № 2 (39). – С. 17-23. – ISSN 2076-2151. – Режим доступа: http://nbuv.gov.ua/UJRN/omd_2014_2_5

32. Сатонин А. В. Имитационное моделирование спектра рабочей нагрузки процесса поперечной резки сортовых профилей на ножницах / В. А. Сатонин, П. В. Боровик, П. А. Петров // Обработка материалов давлением : сб. науч. тр. – Краматорск ДГМА, 2014. – № 2 (39). – С. 53-59. – ISSN 2076-2151. – Режим доступа: http://nbuv.gov.ua/UJRN/omd_2014_2_11

33. Боровик П. В. Метод построения кривых текучести материала при моделировании процесса холодного разделения на ножницах / П. В. Боровик // Ресурсозберігаючі технології виробництва та обробки тиском матеріалів у машинобудуванні. – 2014. – № 1. – С. 54-60. – ISSN 2218-1806. – Режим доступа: http://nbuv.gov.ua/UJRN/rtvotmm_2014_1_9

34. Боровик П. В. Оценка скорости резки листа дисковыми ножами / П. В. Боровик, М. Е. Селезнёв // Вестник Нац. техн. ун-та "ХПИ" : сб. науч. тр. Темат. вып. : Инновационные технологии и оборудование обработки материалов в машиностроении и металлургии. – Харьков : НТУ "ХПИ". – 2014. – № 44 (1087). – С. 15-21. URI: <http://repository.kpi.kharkov.ua/handle/KhPI-Press/10927>

35. Ульяницкий В. Н. Экспериментальная оценка стойкости инструмента при резке высокопрочных сталей / В. Н. Ульяницкий, П. В. Боровик, М. Е. Селезнев // Обработка материалов давлением. – 2015. – № 1(40). – С. 227-230. – ISSN 2076-2151. – Режим доступа: http://nbuv.gov.ua/UJRN/omd_2015_1_40

36. Боровик П. В. Трёхмерная модель процесса продольной резки на сдвоенных кромкообрезных ножницах с катящимся резом / П. В. Боровик, М. Е. Селезнев // Вестник Нац. техн. ун-та "ХПИ" : сб. науч. тр. Темат. вып. : Инновационные технологии и оборудование обработки материалов в машиностроении и металлургии – Харьков : НТУ "ХПИ". – 2015. – № 47 (1166). – С. 15-20. – URI: <http://repository.kpi.kharkov.ua/handle/KhPI-Press/21441>

37. Селезнёв М. Е. Сравнительный теоретический анализ эффективности применения шевронных ножей со сложной формой режущей кромки / М. Е. Селезнёв, П. В. Боровик // Научный вестник Донбасской государственной машиностроительной академии. – 2015. – № 2. – С. 148-153. – ISSN 2219-7869. – Режим доступа: http://nbuv.gov.ua/UJRN/nvdgma_2015_2_24

38. Боровик П. В. Особенности двухмерного моделирования методом конечных элементов процесса резки параллельными ножами / П. В. Боровик, Т. И. Греновецкая // Збірник наукових праць Донбаського державного технічного університету. – 2017. – Вип. 1(46). – С. 72-77. – ISSN 2077-1738. – Режим доступу: http://nbuv.gov.ua/UJRN/sntdgtu_2017_1_12

39. Боровик П. В. Относительное внедрение до скола при резке металла на ножницах в холодном состоянии / П. В. Боровик // Обработка материалов давлением. – 2018. – № 1. – С. 59-65. – ISSN 2076-2151. – Режим доступу: http://nbuv.gov.ua/UJRN/omd_2018_1_11

40. Боровик П. В. 3D моделирование процессов поперечного разделения сортовых профилей на ножницах / П. В. Боровик // Збірник наукових праць Дніпровського державного технічного університету. Технічні науки. – 2018. – Вип. Тем. вип. – С. 11-16 – Режим доступу: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Znpddtu_2018_Tem.

41. Боровик П. В. Обоснование профилировки фасонного ножа для разделения квадратной заготовки в горячем состоянии / П. В. Боровик // Обработка материалов давлением. – 2019. – № 1. – С. 179-185. – Режим доступу: http://nbuv.gov.ua/UJRN/omd_2019_1_28.

42. Боровік П. В. Задача оптимізації профілювання фасонного ножа / П. В. Боровік // Вісник Національного технічного університету "ХПІ". Сер. : Інноваційні технології та обладнання обробки матеріалів у машинобудуванні та металургії: зб. наук. пр. – Харків : НТУ "ХПІ", 2019. – № 12 (1337). – С. 15-19. – Режим доступу: <http://repository.kpi.kharkov.ua/handle/KhPI-Press/44342>

43. Боровик П. В. Выбор метода расчета механических свойств при моделировании процесса горячей резки на ножницах / П. В. Боровик // Актуальные вопросы современной техники и технологии [Текст]: Сборник докладов IX-й Международной научной конференции (г. Липецк, 27 октября 2012 г.). / Отв. ред. А.В. Горбенко. – Липецк: Издательский центр «Гравис», 2012. – С. 45-52.

44. Боровик П. В. Оценка влияния схемы привода дисковых ножниц при резке боковых кромок толстолистовых раскатов / П. В. Боровик, М. Е. Селезнев // Актуальные вопросы современной техники и технологии [Текст]: Сборник докладов X-й Юбилейной Международной научной конференции (г.Липецк, 26 января 2013 г.). / Отв. ред. А.В. Горбенко. – Липецк: Издательский центр «Гравис», 2013. – 204 с. – С. 18-21.

45. Боровик П. В. Аппроксимация механических свойств при математическом моделировании процесса горячей резки на ножницах / П. В. Боровик, В. А. Луценко // Metallurgical processes and equipment – Donetsk, – 2011, – 2(24) – С. 5-9. – ISSN 1816-1200. – Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=16375878>

46. Селезнев М. Е. Расширение технологических возможностей операции продольной резки за счет совершенствования конструкции дисковых ножниц / М. Е. Селезнев, П. В. Боровик // Сборник научных работ студентов ДонГТУ. – Алчевск, 2011. – Вып. 4 (ч. 1). – С. 100-108.

47. Пат. 63571 Україна, МПК В23D19/00. Дискові ножиці / Боровік П. В., Селезньов М.Є.; заявник і патентовласник Донбаський державний технічний університет. – №201103732; заявл. 28.03.11; опубл. 10.10.11, Бюл. №19.

48. Пат. 72820 Україна, МПК В23D19/00. Спосіб розташування дискових ножиць в потоці прокатного стану / Боровік П. В., Селезньов М.Є.; заявник і патентовласник Донбаський державний технічний університет. – №201202702; заявл. 06.03.2012, опубл. 27.08.2012, Бюл №16.

49. Пат. 87339 Україна, МПК В23D19/00. Спосіб подачі листа в дискові ножиці гарячого різання / Боровік П. В., Селезньов М.Є.; заявник і патентовласник Донбаський державний технічний університет. – №201306139; заявл. 17.05.2013, опубл. 10.02.2014, Бюл №3.

50. Пат. 90094 Україна, МПК В23D35/00. Комплект ножів для поперечного різання листового матеріалу / Боровік П. В., Селезньов М.Є.; заявники і патентовласники Боровік П. В., Селезньов М.Є. – №201314896; заявл. 19.12.2013, опубл. 12.05.2014, Бюл №9.

51. Пат. 90095 Україна, МПК В23D35/00. Комплект ножів для поперечного різання листового матеріалу / Боровік П. В., Селезньов М.Є.; заявники і патентовласники Боровік П. В., Селезньов М.Є. – №201314897; заявл. 19.12.2013, опубл. 12.05.2014, Бюл №9.

52. Пат. 104285 Україна, МПК В23D35/00. Ніж шевронний / Коваленко В.І., Барабаш А.В., Калашников А.А., та ін.; заявник і патентовласник ПАТ «Новокраматорський машинобудівний завод» – №201506097; заявл. 19.06.2015, опубл. 25.01.2016, Бюл №2.

53. Пат. 122009 Україна, МПК В23D19/00. Спосіб розташування дискових ножиць в потоці прокатного стана / Боровік П. В.; заявник і патентовласник Донбаський державний технічний університет. – №201706423; заявл. 23.06.2017, опубл. 26.12.2017, Бюл №24.

54. Пат. 122024 Україна, МПК В23D35/00, В23F7/00. Спосіб поперечного різання листового матеріалу ножицями з шевронним ножем / Боровік П. В.; заявник і патентовласник Донбаський державний технічний університет. – №201706464; заявл. 23.06.2017, опубл. 26.12.2017, Бюл №24.

ЗМІСТ

ВСТУП	24
РОЗДІЛ 1 ТЕХНОЛОГІЇ, ОБЛАДНАННЯ, МЕТОДИ РОЗРАХУНКУ І ПЕРСПЕКТИВИ ЇХ РОЗВИТКУ СТОСОВНО ДО РОЗДІЛОВИХ ОПЕРАЦІЙ У ПРОКАТНОМУ ВИРОБНИЦТВІ (СТАН ПИТАННЯ)	32
1.1 Сортамент і технологічні схеми розділових операцій при виробництві листового і сортового металопрокату	32
1.2 Склад і конструктивні особливості обладнання по розділенню листового і сортового металопрокату	35
1.3 Методи розрахунку процесів розділення листового і сортового прокату	51
1.4 Перспективи розвитку технологій і обладнання розділових операцій в прокатному виробництві	77
РОЗДІЛ 2 ВИБІР НАПРЯМКУ І МЕТОДІВ ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕХНОЛОГІЙ І ОБЛАДНАННЯ РОЗДІЛОВИХ ПРОЦЕСІВ ЛИСТОВОГО І СОРТОВОГО МЕТАЛОПРОКАТУ	83
2.1 Розширення сортаменту, підвищення якості та зниження собівартості готового металопрокату, як основний напрямок наукових досліджень в області розділових операцій в прокатному виробництві	83
2.2 Вибір методів теоретичних досліджень процесів поперечного і поздовжнього розрізання листового і сортового металопрокату	85
2.3 Вибір методів експериментальних досліджень процесів поперечного і поздовжнього розрізання листового і сортового металопрокату	97
РОЗДІЛ 3 ПРИКЛАДНІ АСПЕКТИ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ РОЗДІЛЕННЯ МЕТОДОМ СКІНЧЕННИХ ЕЛЕМЕНТІВ	123
3.1 Вибір скінченних елементів, принципів побудови та керування сіткою	123
3.2 Моделювання інструментів та контактної взаємодії	131

3.3	Опис процесу формування та зростання тріщини в пластичному матеріалі з ізотропним зміцненням	134
3.4	Жорсткість станини	140
3.5	Врахування термодинамічних явищ в моделюванні процесів розділення	144
3.6	Розробка алгоритму отримання та обробки даних моделювання	149
3.7	Вибір моделей механічних властивостей матеріалу	154
РОЗДІЛ 4 РОЗВИТОК МЕТОДІВ МАТЕМАТИЧНОГО		
МОДЕЛЮВАННЯ І ОСНОВНИХ ПОКАЗНИКІВ ЯКОСТІ ЛИСТОВОГО І		
СОРТОВОГО МЕТАЛОПРОКАТУ ПРИ РЕАЛІЗАЦІЇ ПРОЦЕСІВ ЙОГО		
ПОПЕРЕЧНОГО РОЗРІЗАННЯ		
4.1	Математичне моделювання напружено-деформованого стану металу і основних показників якості при поперечному розрізанні металопрокату на ножицях з паралельними ножами	171
4.1.1	Двовимірне математичне моделювання поперечного розрізання металопрокату на ножицях з паралельними ножами	171
4.1.2	Тривимірна модель процесу поперечного розділення на ножицях квадратних сортових заготовок в гарячому стані	186
4.1.3	Моделювання напружено-деформованого стану металу при поперечному розрізанні квадратних заготовок в холодному стані на ножицях з паралельними і фігурними ножами	189
4.2	Математичне моделювання напружено-деформованого стану і основних показників якості при поперечному розрізанні листових заготовок на ножицях похилими ножами і з криволінійним ножем	197
4.2.1	Аналіз впливу конструктивних особливостей різального інструменту на енергосилові параметри і показники якості процесу поперечного розрізання листових заготовок на ножицях з похилими (шевронними) ножами	197
4.2.2	Аналіз енергосилових параметрів процесу розрізання на ножицях з криволінійним ножем	204

4.3 Математичне моделювання напружено-деформованого стану металу і основних показників якості при розрізанні профілів зі складною формою поперечного перерізу	211
4.3.1 Моделювання процесу розділення круглого профілю ножами різної форми	211
4.3.2 Аналіз напружено-деформованого стану металу при розділенні кутика	216
4.3.3 Процес розділення швелера на ножицях і аналіз напружено-деформованого стану металу при розрізанні фасонними ножами	220
4.3.4 Аналіз впливу форми поперечного перерізу профілів на силові параметри процесу розділення	225
РОЗДІЛ 5 РОЗВИТОК МЕТОДІВ МАТЕМАТИЧНОГО МОДЕЛЮВАННЯ І ОСНОВНИХ ПОКАЗНИКІВ ЯКОСТІ ПРИ РЕАЛІЗАЦІЇ ПРОЦЕСІВ ПОЗДОВЖНЬОГО РОЗДІЛЕННЯ ЛИСТОВОГО МЕТАЛОПРОКАТУ	229
5.1 Математичне моделювання напружено-деформованого стану металу і основних показників якості при поздовжньому розрізанні товстих листів в гарячому стані	229
5.2 Математичне моделювання напружено-деформованого стану металу і основних показників якості при поздовжньому розрізанні товстих листів в холодному стані	235
5.3 Математичне моделювання напружено-деформованого стану металу і основних показників якості при поздовжньому розрізанні тонких листів і смуг	246
РОЗДІЛ 6 РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ПРОЦЕСІВ РОЗДІЛЕННЯ ЛИСТОВОГО І СОРТОВОГО МЕТАЛОПРОКАТУ	253
6.1 Результати експериментальних досліджень процесів поперечного розрізання листового металопрокату	253
6.1.1 Поперечне розрізання паралельними ножами	253

6.1.2	Поперечне розрізання похилими (гільйотинних) ножами	260
6.1.3	Поперечне розрізання шевронними ножами	265
6.2	Результати експериментальних досліджень процесів поперечного розрізання сортового металопрокату	271
6.2.1	Результати лабораторних експериментальних досліджень гарячого розділення квадратної і круглої заготовок паралельними і фасонними ножами	271
6.2.2	Результати лабораторних експериментальних досліджень холодного розділення квадратних, круглих і фасонних заготовок	274
6.3	Результати експериментальних досліджень процесів поздовжнього розрізання листового металопрокату	282
6.3.1	Дослідження кінематичних і енергосилових параметрів процесу поздовжнього розрізання дисковими ножами в гарячому стані	282
6.3.2	Дослідження кінематичних і енергосилових параметрів процесу поздовжнього розрізання дисковими ножами в холодному стані	286
6.3.3	Фізичне моделювання процесу розрізання з перекочуванням дугового ножа	290
6.4	Результати експериментального досліджень стійкості інструменту при розрізанні високоміцних сталей	292
РОЗДІЛ 7 АВТОМАТИЗОВАНЕ ПРОЕКТУВАННЯ ТА РОЗРОБКА ПРАКТИЧНИХ РЕКОМЕНДАЦІЙ ЩОДО ВДОСКОНАЛЕННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИХ РЕЖИМІВ ТА ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ РЕАЛІЗАЦІЇ ПРОЦЕСІВ ПОПЕРЕЧНОГО І ПОЗДОВЖНЬОГО РОЗРІЗАННЯ ЛИСТОВОГО І СОРТОВОГО МЕТАЛОПРОКАТУ		296
7.1	Аналіз впливу технологічних режимів процесів поперечного і поздовжнього розрізання листового і сортового металопрокату на енергосилові параметри і основні показники якості	296
7.1.1	Методика розрахунку сили гарячого розрізання паралельними ножами	296

7.1.2	Методика розрахунку відносного проникнення до сколювання при холодному розрізанні паралельними ножами	309
7.2	Автоматизоване проектування і вдосконалення технологічних режимів процесів поперечного та поздовжнього розрізання металопрокату	312
7.2.1	Вплив налаштування шевронного ножа на якість поперечного розрізання листового металопрокату	312
7.2.2	Удосконалення інструменту для розділення квадратної заготовки фасонним ножом в гарячому стані	316
7.2.3	Умова захоплювання листового прокату дисковими ножицями на початкових стадіях процесу розрізання	321
7.2.4	Взаємозв'язок кінематичних і енергосилових параметрів реалізації процесу поздовжнього розрізання дисковими ножами	323
7.3	Проектування і вдосконалення конструкцій обладнання процесу поперечного розрізання листового металопрокату шевронними ножами	327
7.4	Методика розрахунку силових параметрів процесу розділення фасонних профілів на ножицях	335
7.5	Проектування і вдосконалення конструкцій обладнання процесу поздовжнього розрізання листового металопрокату	349
	ВИСНОВКИ	358
	СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	361
	ДОДАТОК А СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ РОБІТ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЙНОЇ РОБОТИ	408
	ДОДАТОК Б АПРОБАЦІЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДИСЕРТАЦІЙНОЇ РОБОТИ НА МІЖНАРОДНИХ ТА ВСЕУКРАЇНСЬКИХ КОНФЕРЕНЦІЯХ	418
	ДОДАТОК В АКТИ ВИКОРИСТАННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДИСЕРТАЦІЙНОЇ РОБОТИ	420

ВСТУП

Актуальність теми. В умовах, коли у складі базових галузей промислового комплексу України чорна та кольорова металургія займають одне з ключових місць, пріоритетними напрямками розвитку виявляються підвищення якості готової продукції, збільшення виходу придатного, розширення технологічних можливостей існуючого і нового обладнання, оскільки це сприяє зростанню рівня конкурентоздатності в умовах світового ринку металопрокату.

Розділові операції присутні в технологічній схемі практично кожного прокатного виробництва, а тому успішне втілення зазначених цілей безпосередньо стосується процесів поздовжнього та поперечного розділення гарячого і холодного прокату та відповідного обладнання, що їх реалізує. Загалом ефективність виробництва прокатної продукції вимагає забезпечення швидкого і якісного розрізання з мінімальними енерговитратами та відходами при наданні готовому прокату заданої довжини і форми. Конструктивна і технологічна багатофакторність та неоднозначність впливу на енергосилові параметри і показники якості готової продукції потребує їх якісних і кількісних оцінок.

Все це вимагає дослідження перебігу напружено-деформованого стану (НДС) та руйнування в розрізуваному металі, бо дозволить встановити нові закономірності та вирішити ряд практичних задач, зокрема щодо процесів розрізання листів шевронними, дуговими і дисковими ножами та фасонних профілів і заготовок фасонними ножами. Вирішення цих задач сприятиме підвищенню ступеня наукового обґрунтування технологічних та проектно-конструкторських рішень і можливе за умови застосування наукомістких технологій і підходів, що здатні задовольнити сучасні вимоги. Насамперед, це стосується методу скінченних елементів (МСЕ), котрий є дуже інформативним і здатен вирішувати комплексні завдання. Це дозволить розробити науково обґрунтовані практичні рекомендації та програмні засоби з автоматизованого розрахунку показників енергосилових і конструктивних параметрів обладнання, математичні моделі профілювання ін-

струментів та прогнозування основних показників якості, технічні та технологічні рішення операцій розрізання на ножицях в умовах прокатного виробництва.

Спираючись на викладене, можна стверджувати, що науково-практична проблема з вдосконалення техніко-економічних показників процесів поздовжнього і поперечного розділення листового і сортового металопрокату, вирішенню якої присвячена дана робота, є **актуальною**.

Зв'язок з науковими програмами, планами, темами. Робота виконана в рамках кафедральних держбюджетних науково-дослідних робіт «Удосконалення технологічних процесів в галузі механіки машин» (ДонДТУ, м. Алчевськ, 2010) і «Удосконалення технологій та обладнання процесів правки листового і сортового металопрокату на основі розвитку методів по їх автоматизованому розрахунку і проектуванню» (ДДМА, м. Краматорськ, 2013), а також держбюджетних науково-дослідних робіт, передбачених планами Міністерства освіти і науки України наказ № 686 від 22.07.2009, робота 0110U000094 «Розвиток теоретичних основ безперервного розливання нержавіючих та автолистових сталей»; наказ № 1611 від 22.11.2013, робота 0114U002537 «Визначення механізмів та створення теорії електроімпульсної консолідації нових порошкових матеріалів», госпдоговірної науково-дослідної роботи з Міністерством освіти і науки України (робота 0109U000834 «Фізичне і математичне моделювання процесів твердіння»). У цих роботах автор брав участь як відповідальний виконавець.

Мета дисертаційної роботи і задачі дослідження:

Мета роботи спрямована на підвищення техніко-економічних показників технологій і обладнання процесів розділення металопрокату за рахунок розвитку теоретичних основ, розробки практичних рекомендацій з вдосконалення технологій, інструменту і обладнання операцій розрізання на ножицях в прокатному виробництві.

Для досягнення визначеної мети **поставлені і розв'язані задачі**:

– проаналізувати чинники, що впливають на показники процесів розрізання металопрокату на ножицях та вимагають урахування при математичному моде-

люванні процесів гарячого і холодного розділення в умовах прокатного виробництва, обґрунтувати вхідні параметри і структуру скінченно-елементних моделей;

– розробити узагальнені підходи та практичні рекомендації щодо дво- та тривимірному скінченно-елементного моделювання процесів поздовжнього і поперечного розрізання листового і сортового металопрокату в гарячому і холодному стані;

– оцінити адекватність розроблених математичних моделей шляхом зіставлення енергосилових показників і геометрії формоутворення в зоні розрізання та прилеглих до неї з експериментальними даними;

– розробити алгоритм обробки локальних і узагальнених параметрів НДС та руйнування за результатами чисельного скінченно-елементного моделювання;

– отримати дані про НДС і поведінку металу в осередку розрізання, що мають місце під час розділення гарячого і холодного металу на ножицях різних типів, а також встановити функціональний зв'язок між опором розрізанню й напруженням безпосередньо в зоні розрізання та величиною пластичної деформації й відносним проникненням ножів в метал при змінних умовах швидкості деформації;

– розробити програмні засоби з автоматизованого розрахунку енергосилових параметрів і основних показників якості при реалізації процесів поздовжнього і поперечного розділення листового і сортового металопрокату на ножицях;

– розробити нові технічні рішення, а також рекомендації щодо вдосконалення діючих технологій і обладнання, що забезпечують підвищення техніко-економічних показників розділових операцій продукції прокатного виробництва.

Об'єкт дослідження. Процеси і обладнання для здійснення поздовжніх і поперечних розділових операцій листового і сортового металопрокату на ножицях.

Предмет дослідження. Напружено-деформований стан і кінематика течії металу в осередку розділення і зонах деформації, прилеглих до нього, а також основні закономірності, що визначають енергосилові параметри процесу і показники якості металопрокату після розділення.

Методи дослідження. Реалізація досліджень виконувалась комплексним методом шляхом використання попередніх експериментальних даних з наступним моделюванням розділових процесів та подальшою оцінкою результатів експериментально.

Основу теоретичних досліджень енергосилових параметрів і показників якості процесів розділення становили комбіновані задачі із застосуванням теорій пружності і пластичності, механіки руйнування та можливим термодинамічним ефектом, реалізовані на базі методу скінченних елементів (МСЕ) в поєднанні з плануванням експерименту і статистичною обробкою. Також застосовувався метод чисельних рекурентних рішень скінченно-різницевого схем статичної рівноваги виділених елементарних об'єктів.

Експериментальні дослідження включали в себе методи фізичного моделювання в лабораторних умовах, із застосуванням методів тензометрії, виміру геометричних параметрів та енергосилових показників, а подальша обробка і порівняння з результатами моделювання здійснювалися з використанням методів кореляційного і регресійного аналізу.

Наукова новизна отриманих результатів.

1. *Вперше* обґрунтовано узагальнений підхід до розробки методом скінченних елементів плоских та об'ємних математичних моделей процесів гарячого та холодного розрізання на ножицях різних конструкцій, зокрема визначено типи скінченних елементів, правила контролю і управління формою та розмірами скінченних елементів в зоні розділення, процедуру моделювання появи та розвитку тріщини в пластичному матеріалі з ізотропним зміцненням під час розділення, що *дозволяє* теоретично досліджувати вплив широкого кола факторів на якісні та енергосилові показники процесів розрізання і вдосконалювати технологічні режими та обладнання.

2. *Вперше* на основі методу скінченних елементів і розробленого алгоритму з отримання та обробки даних моделювання щодо напружено-деформованого стану і руйнування *встановлено* вплив змінної в часі швидкості деформації на

функціональні зв'язки «опір розрізанню»-«напруження» та «відносне проникнення ножів»-«деформація» безпосередньо в зоні розрізання.

3. *Вперше* на основі результатів скінченно-елементного моделювання та експериментальних даних для процесу гарячого розрізання паралельними ножами встановлено закономірності та *надано* кількісні оцінки впливу на його силові характеристики хімічного складу розрізуваних сталей та швидкості руху ножів з урахуванням термодинамічних ефектів в металі та пружних характеристик ножиць, що дозволило підвищити точність розрахунку енергосилових параметрів.

4. *Розширено уявлення* для процесів холодного розрізання про вплив на величину відносного проникнення ножів в метал до сколювання сукупної взаємодії геометричної форми і висоти поперечного перерізу профіля, а також механічних властивостей матеріалу і швидкості руху ножа, що *дозволило* уточнити інтегральні значення енергосилових параметрів розрізання на ножицях.

5. *Уточнено* кількісні оцінки коефіцієнтів збільшення сили розрізання внаслідок зношення різальних кромки і збільшення бічного зазору для поперечного розрізання, що *дозволяє* при проектуванні підвищити точність визначення максимального навантаження на ножиці.

6. *Уточнено* шляхом об'ємного моделювання методом скінченних елементів процесів поперечного розділення фасонними (профільованими) ножами різних типів і *визначено* вплив їхніх геометричних параметрів на навантаження ножиць та залишкову деформацію в зонах розділення.

7. *Вперше* визначено вплив сукупності сил зовнішнього опору на кінематику руху металу при розрізанні товстих листів на дискових ножицях. Врахування цього фактору важливе для синхронізації швидкості машин при комбінуванні процесів поздовжнього розрізання з правкою та *сприятиме* поліпшенню умов захоплювання металу дисковими ножами, збільшенню товщини розрізуваних листів та запобіганню можливої серповидності готових листів.

Практичне значення отриманих результатів.

Практичну цінність становлять такі основні результати дисертаційної роботи:

– нові спосіб, методика розрахунку кінематичних параметрів та конструкція шевронного ножа з регульованим кутом нахилу різальних площин, а також нова конструкція опуклого шевронного ножа з постійним кутом нахилу різальних площин, що дозволяє збільшити відсоток листів, котрі відповідають підвищеним вимогам площинності. Новизна означених пропозицій підтверджена патентами України на корисні моделі;

– обґрунтовані практичні рекомендації щодо геометричних параметрів фасонних ножів для розрізання квадратних заготовок в гарячому стані, що дозволяють покращити якість торцевої поверхні розрізуваної заготовки;

– технічні рішення щодо вдосконалення процесу поздовжнього розрізання дисковими ножами шляхом його реалізації в декілька послідовних стадій та/або суміщенням з процесами правки, які спрямовані на розширення сортаменту і підвищення якості розрізання. Новизна запропонованих технічних рішень підтверджена патентами України на корисні моделі;

– комплекс методик та програмних засобів з автоматизованого розрахунку механічних параметрів матеріалів, що дозволяє з більш високою точністю визначати розрахункові навантаження на обладнання та показники якості при проектуванні і розробці технологічних режимів та може бути використаний в системах автоматизованого керування.

Результати роботи були передані ДП «УкрНТЦ «Енергосталь» (м. Харків), ПАТ «НДіПТІМ» (м. Краматорськ), ПрАТ «Новокраматорський машинобудівний завод» (м. Краматорськ), НВП «Дніпроенергосталь» (м. Запоріжжя).

Окремі результати роботи використовуються на кафедрі «Машинобудування та прикладна механіка» СНУ ім В. Даля в рамках курсів «Конструювання, розрахунок та САПР машин і обладнання» та «Дослідження, випробування та діагностика машин і обладнання», а також при виконанні курсових робіт та проектів, випускних кваліфікаційних робіт бакалаврів і магістрів за спеціальностями 133 «Галузеве машинобудування» та 131 «Прикладна механіка».

Особистий внесок здобувача складається з наступного: обґрунтування мети роботи; формування основних ідей і вибір методів теоретичних та експеримен-

тальних досліджень; постановка і розв'язання задач; розробка комплексу скінченно-елементних математичних моделей процесів розрізання металопрокату на ножицях; розробка та вдосконалення методик розрахунку енергосилових параметрів та показників якості процесів розрізання на ножицях; розробка рекомендацій щодо профілювання різальних інструментів; розробка технічних рішень щодо підвищення ефективності процесів та розширення технологічних можливостей ножиць. Автор розробляв нові та вдосконалював існуючі конструкції експериментальних установок; готував, планував та проводив експерименти; виконував обробку, аналіз та приймав участь у впровадженні результатів у виробництво. В роботах, що були опубліковані зі співавторами, особистий внесок автора представлений в анотації до списку опублікованих праць за темою дисертації.

Апробація роботи. Матеріали дисертаційної роботи доповідались та обговорювались на Міжнародній науково-технічній конференції «Нові наукомісткі технології отримання матеріалів і виробів підвищеної якості методами обробки тиском» (м. Краматорськ, 2011); Всеукраїнській науково-технічній конференції «Механічне та мехатронне обладнання заводів чорної металургії» (м. Донецьк, 2011); Міжнародних науково-технічних конференціях «Ресурсозбереження та енергоефективність процесів і обладнання обробки тиском в машинобудуванні та металургії» (м. Харків, 2011-2015, 2018, 2019); III Міжнародній науково-технічній конференції «Теоретичні та практичні проблеми в обробці матеріалів тиском і якість спеціального навчання» (м. Київ, 2012); Міжнародних наукових конференціях «Актуальні питання сучасної техніки і технології» (м. Липецьк, 2012, 2013); Міжнародній науково-технічній конференції «Металургійні процеси і обладнання» (м. Донецьк, 2013); Міжнародних науково-технічних конференціях «Нові наукомісткі технології отримання матеріалів і виробів підвищеної якості методами обробки тиском» (м. Краматорськ, 2012-2015, 2017-2020); III Міжнародній науково-технічній конференції "Машини та пластична деформація металів" (м. Запоріжжя, 2015); IV Міжнародній науково-технічній конференції «Машини та пластична деформація металів» (м. Кам'янське, м. Дніпро, 2018); Міжнародній науково-практичній конференції «Сучасні технології промислового комплексу»

(м. Херсон, 2020); Міжнародній науково-технічній конференції «Теорія, технологія та машини обробки металів» (м. Кам'янське, 2020); на розширених наукових семінарах кафедри ММК ДонДТУ (2010–2014 рр.) і кафедри АММіО ДДМА (2015).

Публікації. Матеріали і основні положення дисертаційної роботи опубліковані в 54 роботах з наукової тематики, в тому числі 46 статей опубліковано в наукових збірниках та журналах, з котрих 36 у наукових фахових видання України. Із загального числа всіх публікацій 16 включено в міжнародні наукометричні бази, з яких 4 в журналах включених до *Web of Science Core Collection*, 22 роботи опубліковані в матеріалах міжнародних науково-технічних конференцій. За результатами отримані 8 патентів на корисну модель.

Структура та обсяг роботи. Дисертація складається зі вступу, 7 розділів основної частини, висновків, списку використаних джерел та додатків. Загальний обсяг дисертації становить 428 сторінок машинописного тексту, з них 270 сторінок основного тексту, 176 рисунків і 30 таблиць частина з яких окремо на 67 сторінках, список використаних джерел з 414 найменувань на 47 сторінках, анотації на 8 сторінках і 3 додатки на 21 сторінці, до яких також входять список опублікованих праць за темою дисертації і перелік науково-технічних конференцій.

Представлені нижче результати отримані при сприянні викладачів і співробітників кафедр «Машини металургійного комплексу» та «Обробка металів тиском і металознавство» ДонДТУ, кафедр «Автоматизовані металургійні машини та обладнання», «Обробка металів тиском» і «Механіка та пластичне формування» ДДМА, інженерно-технічних працівників машинобудівних і металургійних підприємств, яким автор щиро вдячний за неоціненну допомогу в організації робіт, а також за вельми корисні поради і зауваження, висловлені на всіх етапах виконання даної роботи.

Окремо автор хотів би вшанувати пам'ять першого наукового консультанта і ідейного натхненника даної роботи професора Сатоніна Олександра Володимировича, котрий передчасно пішов з життя. Його авторитетна думка і професійні поради зробили неоціненний внесок у наукове становлення автора і дану роботу.

РОЗДІЛ 1

ТЕХНОЛОГІЇ, ОБЛАДНАННЯ, МЕТОДИ РОЗРАХУНКУ І ПЕРСПЕКТИВИ ЇХ РОЗВИТКУ СТОСОВНО ДО РОЗДІЛОВИХ ОПЕРАЦІЙ У ПРОКАТНОМУ ВИРОБНИЦТВІ (СТАН ПИТАННЯ)

1.1 Сортамент і технологічні схеми розділових операцій при виробництві листового і сортового металопрокату

В умовах прокатного виробництва розділення металопрокату в загальному випадку можна виконувати наступними способами [1-35]:

– механічним без зняття стружки, коли розділення виконують шляхом здійснення зсуву, розтягування, зламу, скручування (в чистому або комбінованому вигляді) між частинами, що треба розділити;

– механічним зі зняттям стружки, коли розділення відбувається за рахунок видалення різальним інструментом (пила, фреза) частини металу між частинами, що треба розділити;

– термічним, коли розділення реалізується шляхом видалення (плавлення, горіння) частки металу за заданою лінією або об'ємом за рахунок його проплавлення при локальному нагріванні газовим полум'ям, сфокусованим променем, плазмою та т. ін.

В умовах виробництва листового і сортового металопрокату розділові операції застосовують для обрізання переднього і заднього кінців, а також для розрізання на мірні довжини листових і сортових розкатів, обрізання бічних кромки і поздовжнього розпуску смуг і листів, поздовжнього розділення в ході багатолінійної прокатки-розділення [1-26].

Розділові операції, що базуються на механічних способах розділення без зняття стружки – найбільш ефективні та економічні процеси при масовому виробництві. Однак в технологічних схемах можуть використовувати і інші процеси. Зокрема, в умовах сортопрокатних станів досить широко використовують процес розрізання дисковими пилами, а також процеси термічного різання, як наприклад, газорізальні машини, лазер або плазма, які також є досить ефективними [27-35].

Щодо технологічних схем, коли розділові операції здійснюють механічним способом без зняття стружки, відносять наступні [1-26]:

- поперечне розрізання паралельними ножами (рис. 1.1, а), використовується переважно при розрізанні листових і сортових заготовок;
- поздовжнє і поперечне розрізання похилими (гільйотинними і шевронними) ножами (рис. 1.1, б і 1.1, в) широко застосовується при розрізанні листового металу і значно рідше при поперечному розрізанні дрібного сорту в пачках;
- поздовжнє і поперечне розрізання криволінійними (дуговими) ножами (рис. 1.1, г) використовується при розрізанні переважно товстих листів;
- поздовжнє розрізання листів і смуг та відрізання їх бічних крамок здійснюється дисковими ножами (рис. 1.1, д);
- поперечне розрізання на ходу (рис. 1.1, е і 1.1, ж), коли ножі рухаються по деякій замкнутій траєкторії і при розділенні металу їх швидкість, узгоджена зі швидкістю розкату, застосовується для поперечного розрізання простих фасонних профілів і смуг різної ширини;
- поперечне розрізання фасонними ножами (рис. 1.1, з), коли форма ножа максимально наближена до форми розрізуваного перерізу, застосовується для розрізання простих і складних профілів, при цьому рух одного або обох ножів здійснюється тільки в площині, поперечній заготівлі;
- прокатка-розділення (рис. 1.1, и, к) застосовується для формування з однієї заготовки або злитка одночасно двох і більше (до 8) розкатів, зчленованих між собою по ширині, і подальшого поздовжнього розділення, яке може здійснюватися за допомогою спеціальних пристроїв в міжклітьовому проміжку (рис. 1.1, и) або в прокатних валках (рис. 1.1, к).

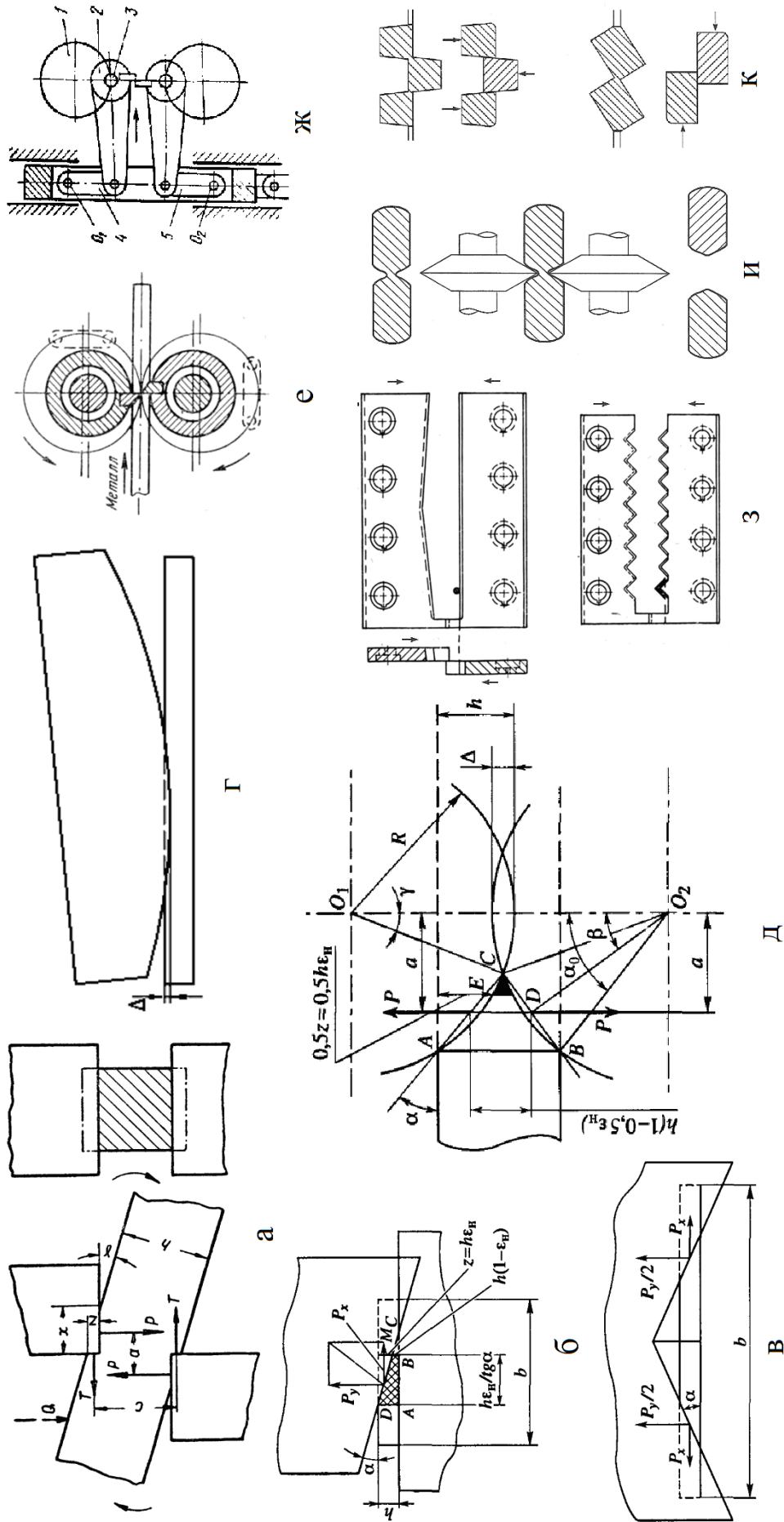


Рисунок 1.1 – Технологічні схеми розділових операцій прокату виробництва, здійснювані механічним способом без зняття стружки

Розділення розкату в міжклітьовому проміжку отримало назву «слітінг–процес» і складається з двох операцій: підготовка розкату до розділення і власне розділення [19-23]. Процес розділення безпосередньо в прокатних валках технологічно може здійснюватися наступними способами [19-21]:

- зрізанням перемичок шляхом повороту, зрушення або зсуву заготовок;
- розривом перемичок шляхом створення в зоні перемички напружень розтягування за рахунок взаємного зміщення з'єднаних заготовок під дією осьових сил;
- контрольованим розривом шляхом створення в зоні перемички напружень розтягування під дією осьових сил з боку бічних поверхонь гребнів багаторівчачкових калібрів, котрі проникають в метал.

Основними перевагами механічного розділення без зняття стружки є:

- відсутність втрат металу при реалізації процесу;
- висока пропускна здатність обладнання;
- високий ступінь механізації та автоматизації процесів.

Крім того, використовуючи різні технологічні схеми розділення металопрокату можна охопити практично весь сортамент прокатного виробництва. При цьому досить широко застосовують процеси гарячого розділення, що сприяє зниженню робочих навантажень на обладнання, розширенню сортаменту оброблюваного металопрокату, а також зниженню витрат на термообробку за рахунок застосування тепла прокатного нагріву [36-39].

1.2 Склад і конструктивні особливості обладнання по розділенню листового і сортового металопрокату

Вище були показані технологічні схеми механічних розділових операцій без зняття стружки і відзначені їх переваги. Для реалізації даних технологічних схем на практиці використовують різноманітне механічне обладнання (рис. 1.2), яке можна об'єднати в три групи:

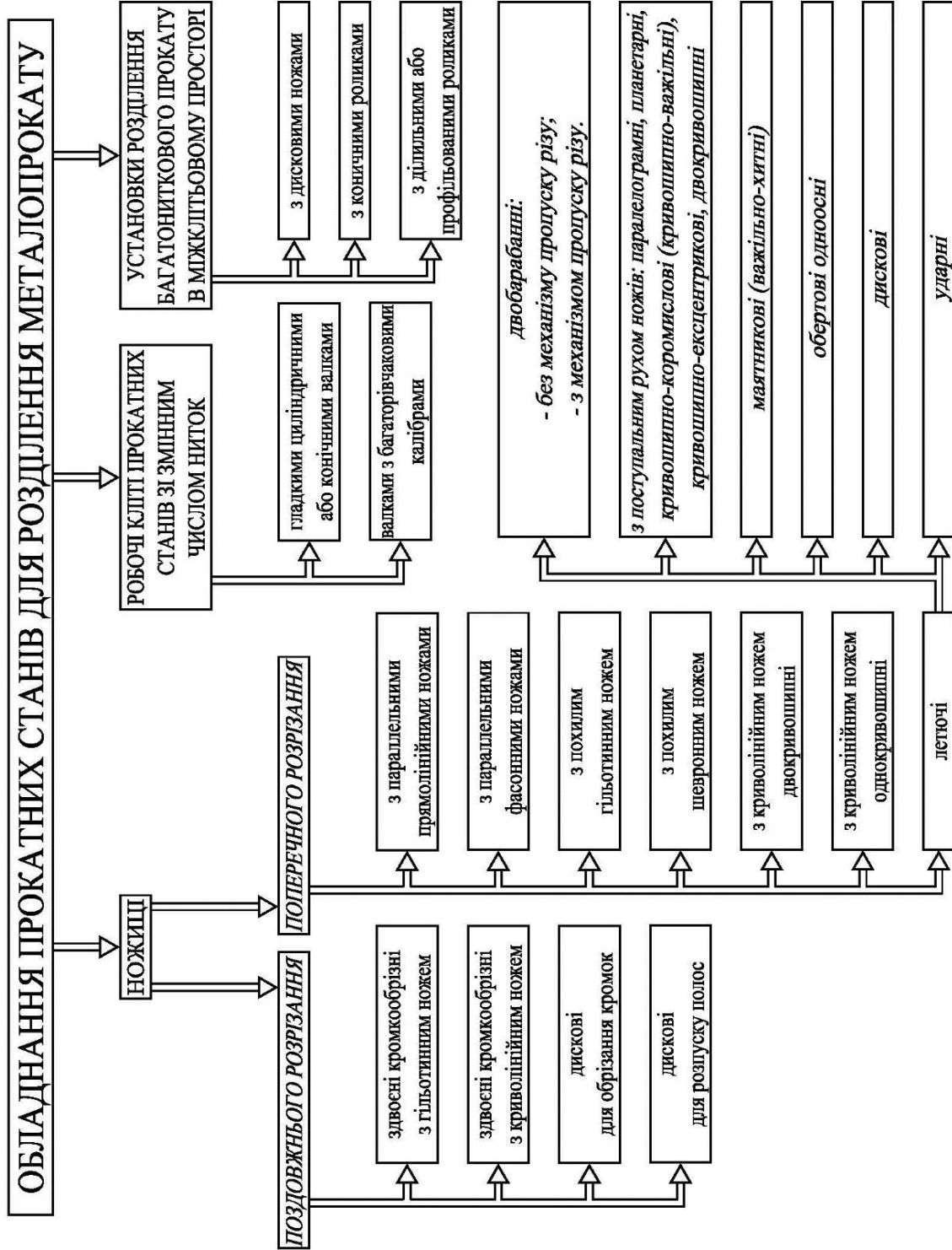


Рисунок 1.2 – Конструктивна класифікація обладнання механічного розділення металопрокату без зняття стружки

- ножиці, які в залежності від конструкції застосовують для поздовжнього або поперечного розрізання розкатів різного перерізу в холодному або гарячому стані після їх прокатки на прокатних станах;

- робочі кліті, встановлені в потоці прокатних станів, що працюють за принципом зі змінним числом ниток розкату, а процес поздовжнього розділення здійснюється прокатними валки з гладкою циліндричною або конічною бочкою чи тмкими, що утворюють багаторівчаккові калібри;

- установки поздовжнього розділення, які виконують розділення багатониткового прокату в міжклітьовому просторі в потоці прокатних станів гарячої прокатки, що працюють за принципом із змінним числом ниток.

Конструкції ножиць [9,13,14,40-52], використовуваних в прокатному виробництві можна поділити по типу розрізуваного металопродукату на листові і сортові.

Привод ножиць може бути в двох варіантах – електромеханічний і гідравлічний. При цьому останній, застосовують все більш широко, однак існують конструкції ножиць, в яких застосування гідравлічного приводу є неможливим або недоцільним за конструктивних або технологічних причин.

Станини ножиць можуть мати два виконання – відкритого і закритого типів.

З огляду на технологічні особливості реалізації процесу розрізання на ножицях в прокатному виробництві, існують такі конструкції [9,13,14, 40-52]:

- з паралельними (прямими або фасонними) ножами;
- з одним похилим ножем (гільйотинний або шевронний);
- з криволінійним ножем (дуговий або криволінійний);
- здвоєні кромкообрізні ножиці (ЗКОН);
- дискові;
- летючі.

Ножиці з паралельними ножами [9,13,14,40-43] широко використовують для поперечної розрізання гарячого металу квадратного, прямокутного і круглого перерізу після прокатки його на блюмінгах, слябінгах, заготівельних і сортових станах, а також і для поперечної розрізання холодного металу – в цьому випадку профіль ножа відповідає формі поперечного перерізу розрізуваного металу.

Конструкції ножиць поперечного розрізання з паралельними ножами (рис. 1.3), за способом реалізації процесу, можна розділити на:

- ножиці верхнім різанням (з верхнім рухливим ножем);
- ножиці нижнім різанням (з нижнім рухливим ножем);
- ножиці з горизонтальним напрямком різання.

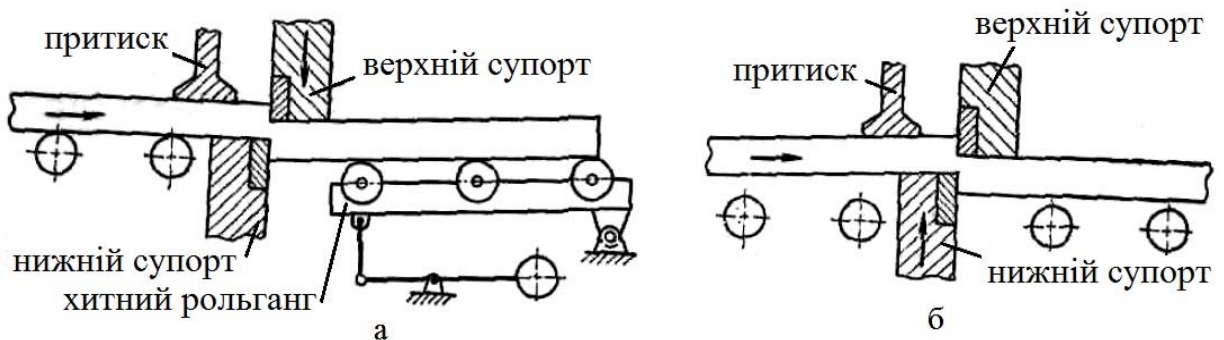


Рисунок 1.3 – Схема розрізання металу на ножицях з паралельними ножами [42,43]: а – з верхнім різанням; б – з нижнім різанням

Ножиці з паралельними ножами мають конструкційне виконання двох типів: з електромеханічним і гідравлічним приводами. У роботах [53-67] представлені різні конструктивні рішення, спрямовані на поліпшення конструкції ножиць з паралельними ножами і підвищення якості розрізання прямими, а в роботах [68-91] фасонними ножами.

Ножиці з похилим ножем [9,13,14,40-43] в залежності від схеми розрізання (див рис. 1.1, б і в) можуть мати гільйотинний або шевронний ніж і конструкційне виконання двох типів: відкритого і закритого (рис. 1.4).

У гільйотинних ножиць кут між ножами залежить від розрізуваного металу, але не має перевищувати $10...12^\circ$, щоб уникнути його виштовхування з ножів.

Шевронні ножі дозволяють при такому ж куті нахилу зменшити їх хід в 2 рази. Ножиці закритого типу виконують з верхнім або нижнім різанням. У гільйотинних ножицях з нижнім різанням нижній ніж може бути встановлений прямо або похило (рис. 1.4, в). При використанні шевронного ножа нижній ніж встановлюють прямо.

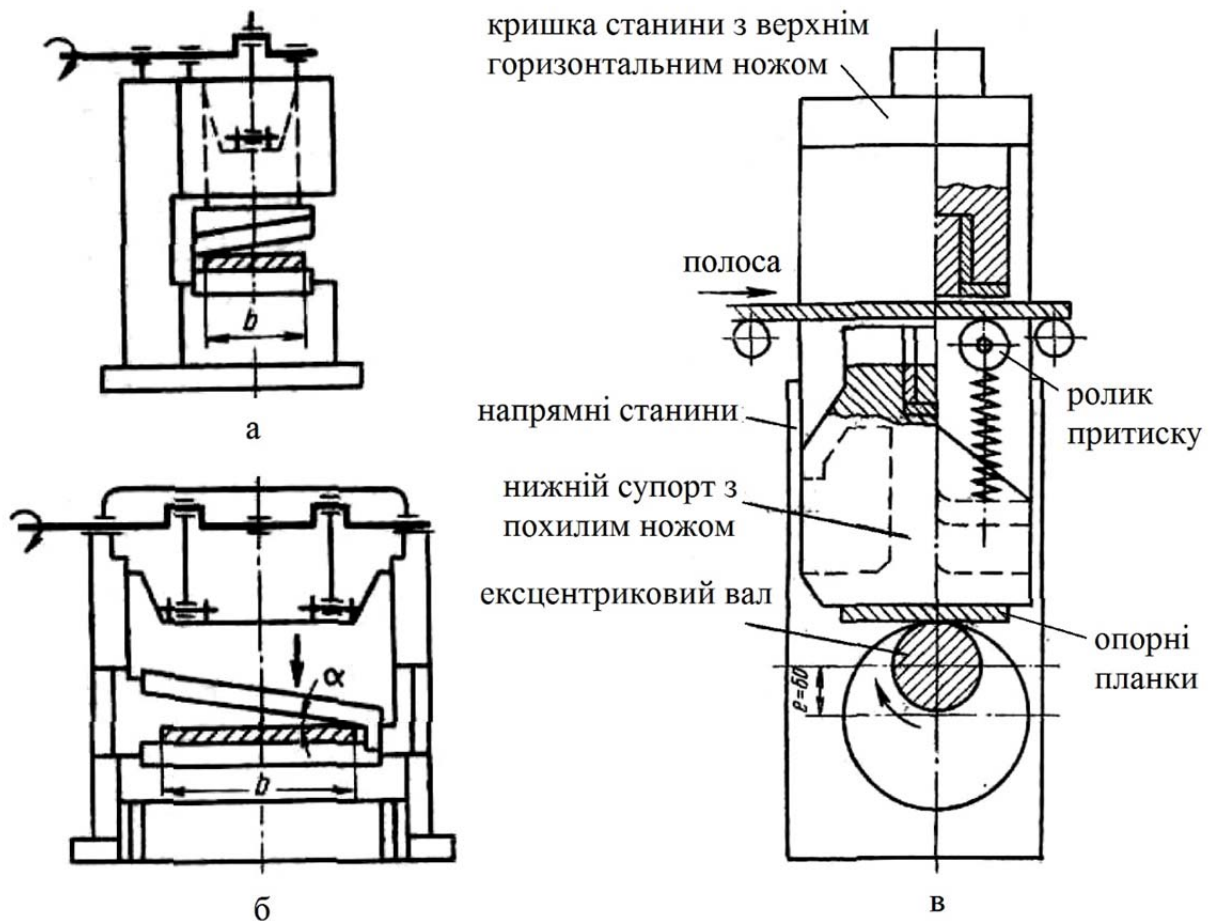


Рисунок 1.4 – Конструктивні схеми ножиць з похилим ножом [42,43]:

а – гільйотинні відкритого типу з верхнім різанням; б – гільйотинні закритого типу з верхнім різанням; в – гільйотинні з нижнім різанням

Автори робіт [92-104] пропонують ряд рішень, що сприяють підвищенню надійності роботи ножиць і поліпшенню якості розрізання гільйотинними і шевронними ножами.

Однак, суттєвим недоліком в роботі гільйотинних ножиць, як з похилими, так і з шевронними ножами в більшості випадків є істотна залишкова деформація (вигин і скручування) тої частини листа, котра при розділенні контактує з похилим або шевронним ножом, в наслідок чого значно знижує якість готового листа.

Суттєво знизити або навіть виключити цей недолік можуть ножиці з криволінійним (дуговим) ножом, що реалізують процес розрізання за рахунок перекошування ножа [13,40,42-48], конструктивні схеми яких представлені на рис. 1.5.

Залежно від способу реалізації кругового руху дугового ножа відомі конструкції двокривошипних ножиць з копиром (рис. 1.5, а) і з коромислом [40,42-47].

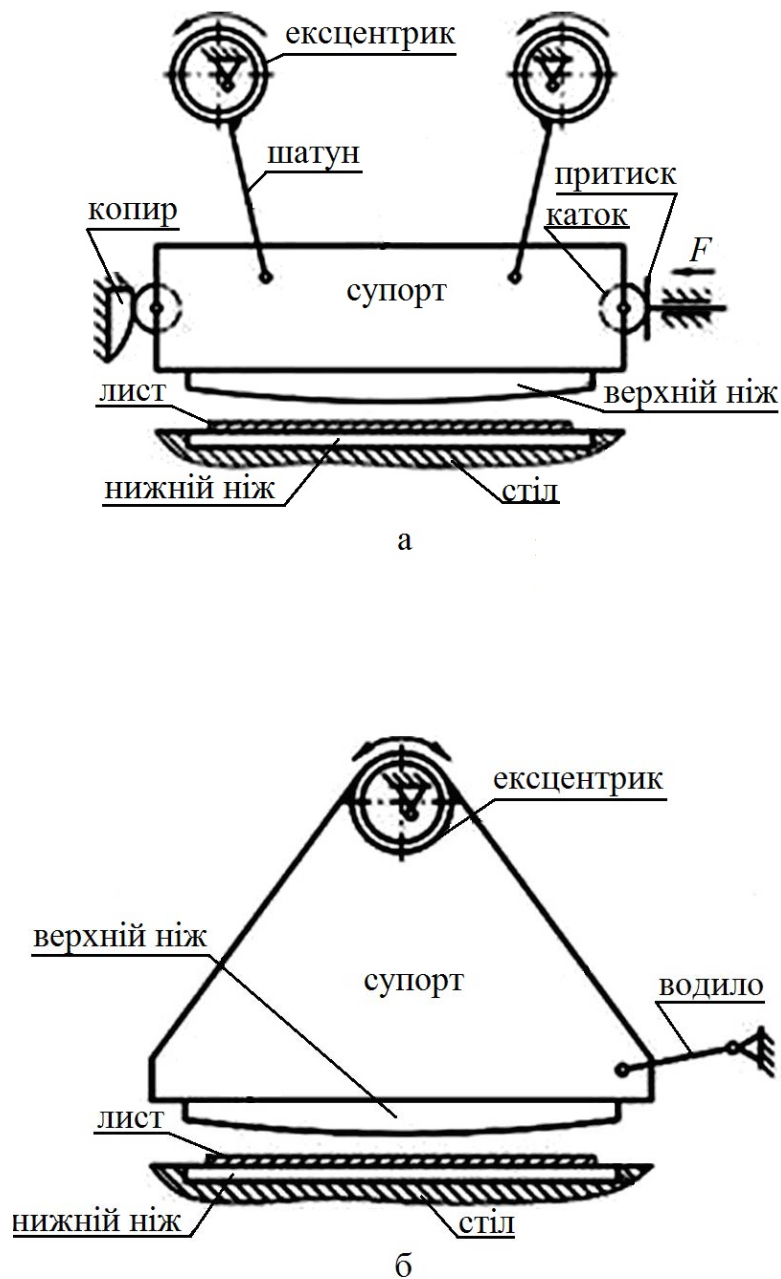


Рисунок 1.5 – Конструктивні схеми ножиць з перекочуванням ножа [42-48]:
а – двокривошипні з копиром; б – однокривошипні

Недоліком двокривошипної схеми приводу є досить складна кінематика. Співробітниками ВАТ КО ВНИИМЕТМАШ була розроблена конструкція однокривошипних ножиць з перекочуванням ножа [48].

Якість розрізання на ножицях з перекочуванням ножа забезпечується за рахунок застосування дугового ножа з великим (20...50 м) радіусом, що забезпечує мінімізацію кута різання $1,5...2^\circ$.

Практика експлуатації ножиць з перекочуванням ножа показала високу ефективність їх роботи, але також виявила і певні недоліки, для усунення яких запропоновано низку технічних і конструктивних рішень [105-122]. Крім того, ефективність роботи ножиць пропонується підвищувати за рахунок використання гідравлічного приводу [120-122].

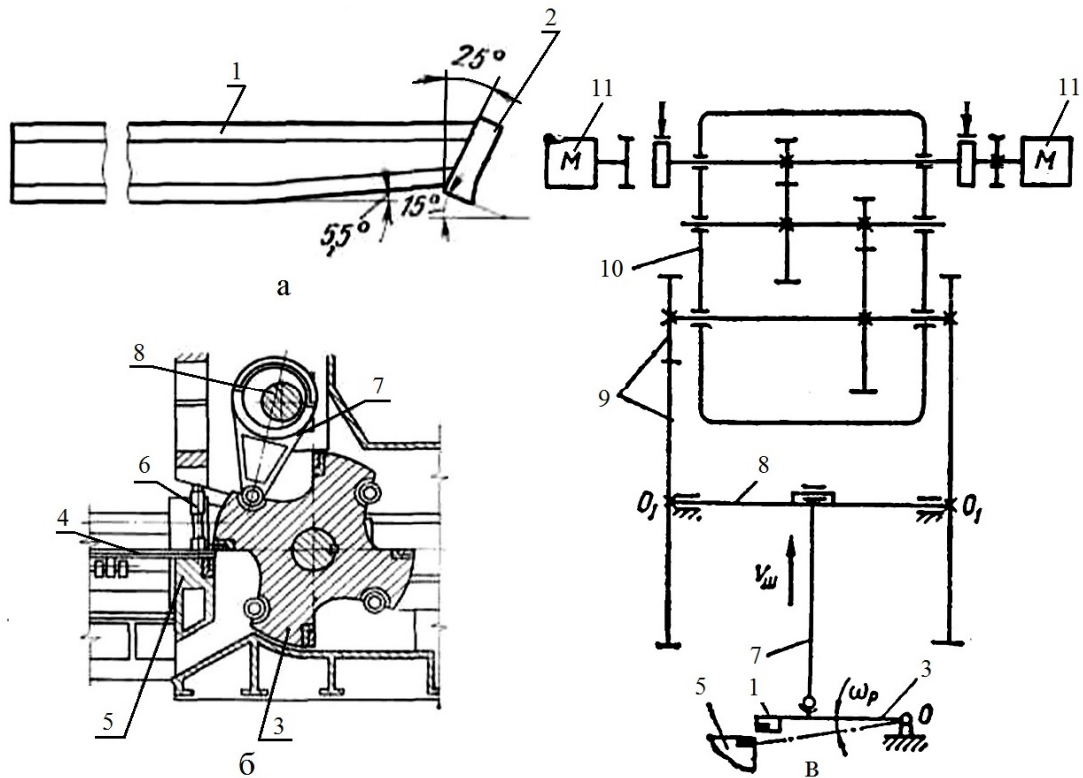
Описані конструкції ножиць з похилим і дуговим ножем застосовують для поперечного розділення металопрокату. Проте дані способи розділення використовують і при поздовжньому розрізанні, зокрема, під час обрізання бічних кромоч товстих листів [40,43,49-51]. При цьому на гільйотинних ножицях, з метою поєднання в часі операції відрізання поздовжньої кромки від листа і розділення її на мірні довжини, на гільйотинних ножах встановлюють кромкові ножі [40,49].

Здвоєні кромкообрізні ножиці (ЗКОН) представляють собою (рис. 1.6) пару ножиць (гільйотинних або з перекочуванням ножа), змонтованих на загальній рамі, призначених для одночасного обрізання обох поздовжніх кромоч у товстих широких (більше 3 м) холодних листів одночасно двома парами ножів [40,43,49].

Переваги перекочування ножа сприяли розробці ЗКОН з дуговим ножем [50,51, 123-125]. На рис. 1.7 представлені здвоєні кромкообрізні ножиці з дуговим ножем конструкції НКМЗ, які окрім дугового ножа 1 містять ніж поперечного розрізання 2 відрізуваної кромки на мірні довжини.

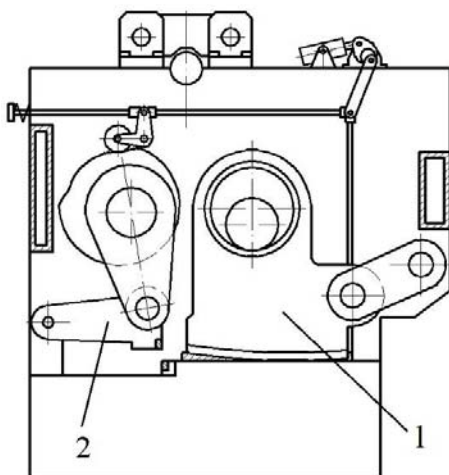
Дискові ножиці, що використовують в умовах прокатних станів, служать для обрізання кромоч у широких смуг і розрізання цих смуг уздовж на кілька вузьких смуг (розпуску) і тому завжди мають парне число дисків [9,13,14,40-42].

За товщиною металу, що розрізається, дискові ножиці можна розділити на тонколистові ($h \leq 4$ мм) і товстолистові ($h > 4$ мм). Перші працюють при максимальній швидкості і навантаженні по моменту при розрізанні листа будь-якої товщини. Другі з різною швидкістю, яка залежить від товщини металу, що розрізається, тобто при змінному статичному моменті і постійної потужності.



1 – рухливий гільйотинний ніж; 2 – поперечний ніж розрізання кромки; 3 – барабан; 4 – лист; 5 – нижній нерухомий супорт; 6 – притиск; 7 – шатун; 8 – ексцентровий вал; 9 – зубчаста передача; 10 – редуктор; 11 – електродвигун

Рисунок 1.6 – Кромкообрізні ножиці з похилим ножем: а – форма ножа; б – конструктивна схема; в – кінематична схема



а



б

Рисунок 1.7 – Здвоєні кромкообрізні ножиці (ЗКОН) з дуговим ножем конструкції НКМЗ: а– конструктивна схема; б – загальний вигляд

За кількістю пар дисків можна виділити – двопарні та багатопарні. Привод ножиць, здійснюється від одного електродвигуна через редуктор і загальний вал або шпindelні з'єднання.

За величиною і розташуванням конструкції ножиць бувають з дисками:

- однакових діаметрів, осі яких розташовані в одній вертикальній площині (рис. 1.8, а);
- однакових діаметрів, осі яких розташовані в різних вертикальних площинах (рис. 1.8, б);
- з дисками різних діаметрів (рис. 1.8, в).

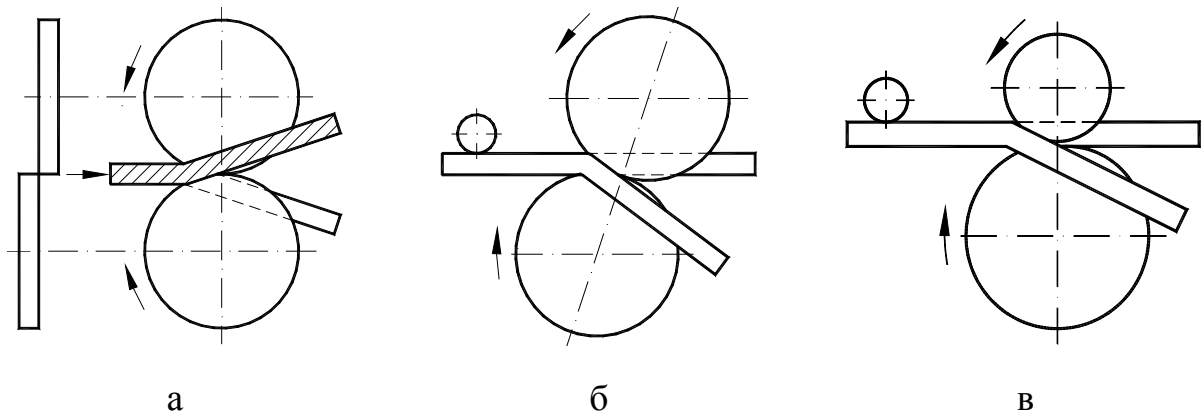


Рис 1.8 – Принципові схеми розташування ножів дискових ножиць

На листових станах гарячої прокатки зазвичай для обрізання бічних кромки застосовуються дискові ножиці з двома парами дисків з кріпленням кожного на окремому валу (рис. 1.9, а). На станах холодної прокатки, крім зазначених, для розпуску смуги на кілька частин застосовують ножиці з числом пар дисків до 10-16 і з кріпленням на двох загальних валах (рис. 1.9, б).

У ножиць невеликої потужності рух від приводу передається тільки нижнім диском, а верхні (холості) обертаються завдяки тертю. У ножиць для розрізання товстих листів рух передається і нижнім і верхнім диском.

Відрізані кромки (відходи) видаляють від ножиць двома способами:

- розрізанням кромки на мірні довжини кромкоподрібнювачами, встановленими за ножицями, і спрямуванням їх у встановлений внизу короб (рис. 1.10);

– змотуванням кромки на барабани спеціальними моталками кромки (застосовують тільки при обрізанні кромки у тонких смуг товщиною до 0,5 мм).

Необхідно відзначити, що існують і інші рішення, коли процес подрібнення кромки здійснюється безпосередньо на дискових ножицях шляхом встановлення додаткових конструктивних елементів [126-131].

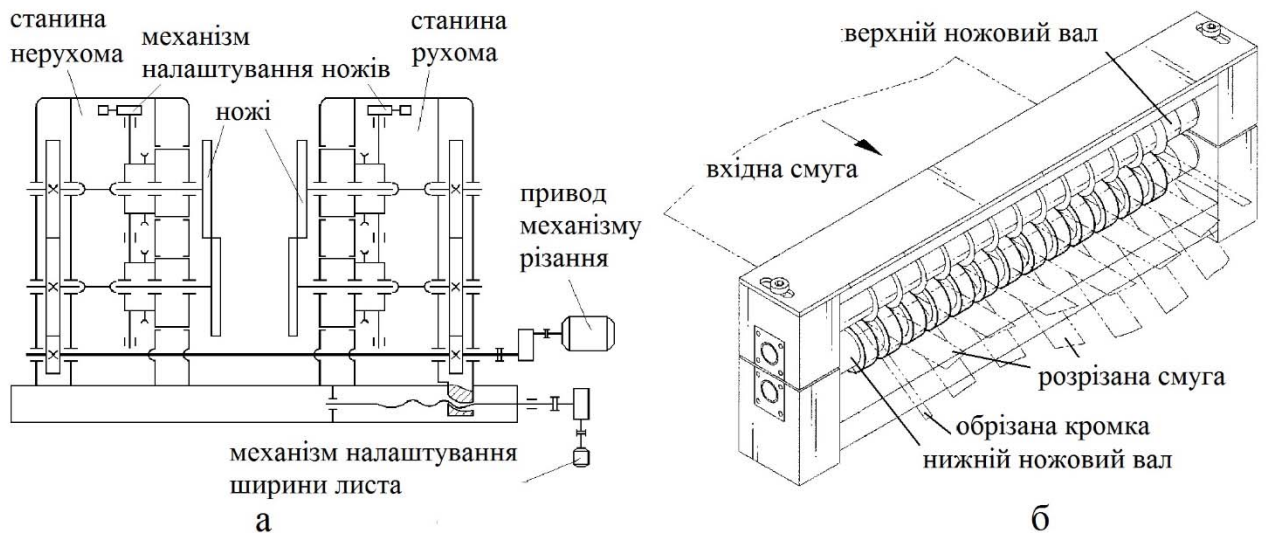


Рисунок 1.9 – Схема двопарних (а) і багатопарних (б) дискових ножиць

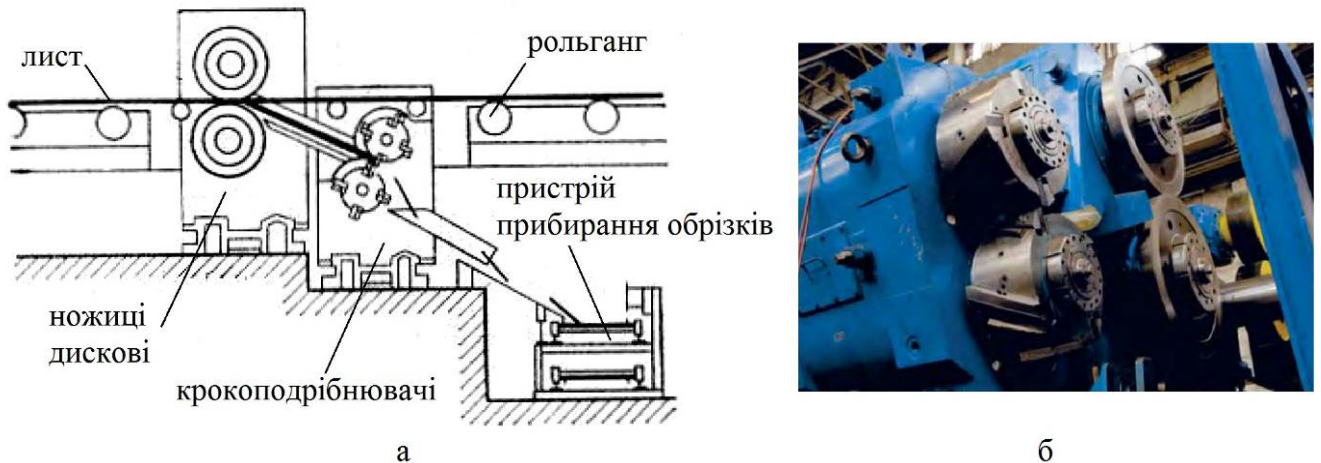


Рисунок 1.10 – Система подрібнення і прибирання бічних обрізків на дискових ножицях з використанням летючих кромкоподрібнювальних ножиць барабанного типу (а) загальний вигляд устаткування ножиць конструкції НКМЗ

Також відомі конструкції дискових ножиць з двома парами дискових ножів, закріпленими на двох загальних валах [132-133]. У деяких випадках на кожному

валу між ножами монтують опорні валки циліндричної або профільованої форми [133].

У роботах [134-150] представлений ряд рішень щодо вдосконалення конструкції двопарних, а в [151-170] багатопарних дискових ножиць, спрямованих на підвищення продуктивності ножиць, поліпшення якості розрізання, підвищенню виходу придатного, зниженню сил розрізання та ін.

Також для розширення сортаменту і підвищення якості розрізання товстих листів існують рішення [145,171], які передбачають реалізацію процесу в кілька стадій послідовно встановленими парами дисків з поступовим збільшенням надрізаня розрізуваного листа.

Летючі ножиці [9,13,14,40-42,52] призначені для розрізання металу на ходу ("на льоту") при його русі з великою швидкістю. У багатьох випадках працездатність цих ножиць визначає продуктивність прокатного стану.

Як показано на рис. 1.11 і 1.12, в залежності від призначення, конструкції і характеру руху, існують такі летючі ножиці [9,13,14,40-42,52]:

- двобарабанні: без механізму пропуску різання і з механізмом пропуску різання;
- з поступальним рухом ножів: паралелограмні, планетарні, кривошипно-коромислові (кривошипно-важільні), кривошипно-ексцентрикові, двокривошипні;
- важільно-хитні (маятникові);
- обертові одновісні;
- дискові;
- ударні.

Можна виділити два режими роботи летючих ножиць: 1) періодичних запусків і зупинок; 2) безперервної роботи. При безперервному режимі роботи мірна довжина відрізуваної смуги визначається довжиною пройденого шляху за час між двома послідовними різаннями.

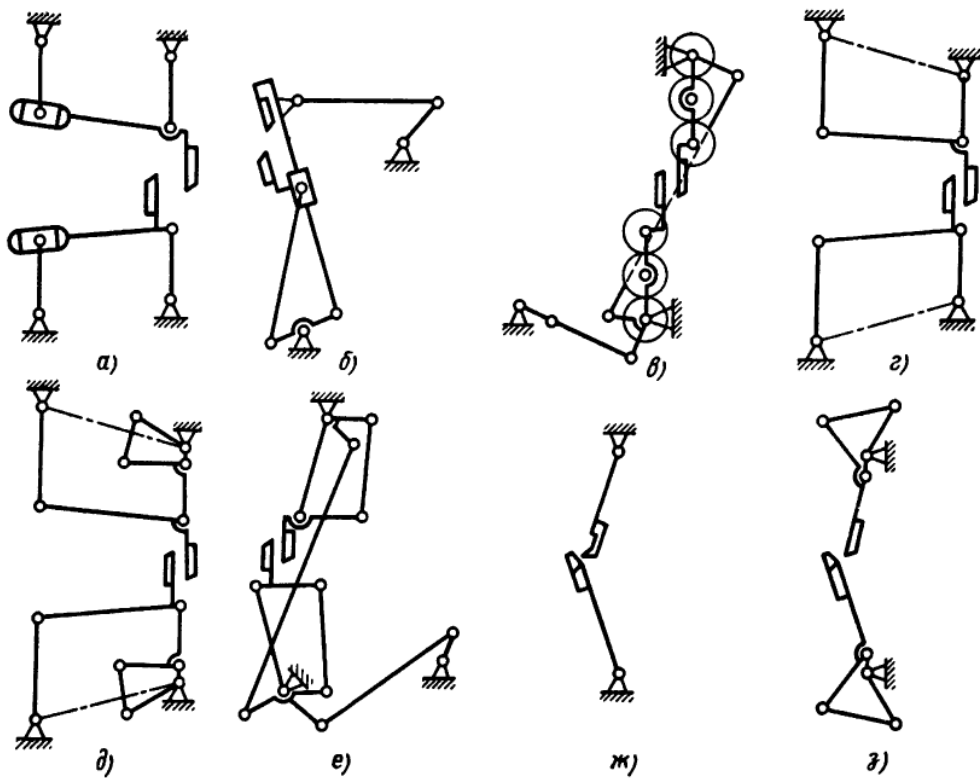


Рисунок 1.11 – Приклади кінематичних схем летючих ножиць [52]:

а – паралелограмні; б – хитні; в – планетарні; г – кривошипно-коромислові (кривошипно-важільні); д – кривошипно-ексцентрикові; е – двокривошипні; ж – двобарабанні без механізму пропуску різання; з – двобарабанні зі співвісним п'ятланковим механізмом пропуску різання

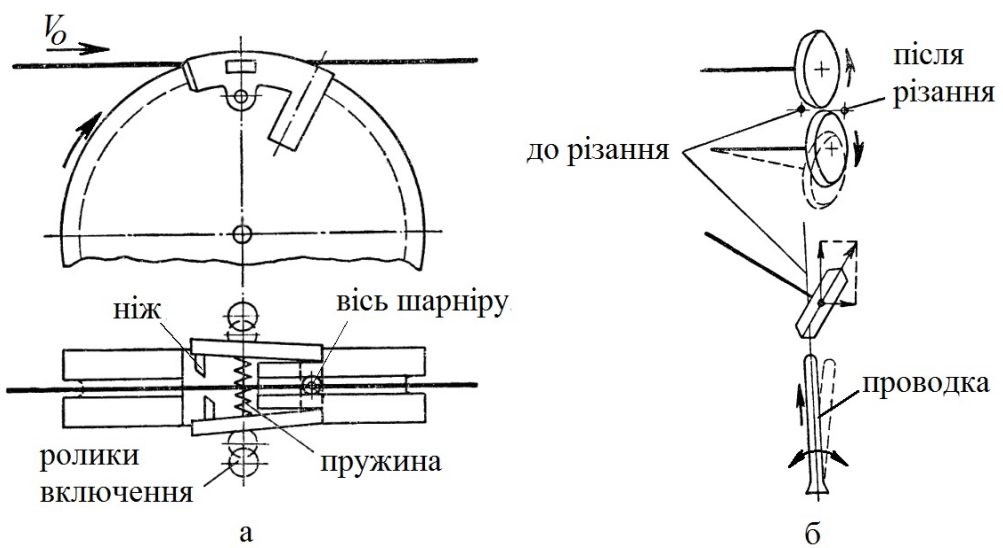


Рисунок 1.12 – Обертіві одновісні (а) і дискові (б) летючі ножиці [9,13]

Серед відомих конструкцій летючих ножиць найбільш простими за конструкцією і надійними в експлуатації є двобарабанні. Вони широко використовуються при гарячому розрізанні смуг ($h \leq 30$ мм) і дрібних сортових профілів, а також при холодному розрізанні смуг ($h \leq 3$ мм). При цьому швидкість розрізання складає 15 м/с і вище. Власне розрізання може здійснюватися паралельними, похилими або шевронними ножами.

Регулювання довжини відрізуваної смуги можуть здійснювати при однаковій швидкості руху смуги і окружної швидкості ножів за рахунок встановлення різного числа ножів на верхньому та нижньому барабанах або при установці ножів на барабанах різного діаметру. У разі неузгодженості швидкостей смуги і ножів можуть використовувати електричну або механічну синхронізацію. Крім того, в конструкціях двобарабанних ножиць може бути передбачений механізм пропуску різання.

У той же час, барабанні летючі ножиці не позбавлені недоліків, для усунення яких розроблений цілий ряд пропозицій [172-201].

Паралелограмні, планетарні, кривошипно-коромислові (кривошипно-важільні), кривошипно-ексцентрикові і двокривошипні конструкції летючих ножиць характеризуються поступальним рухом ножів, що дозволяє отримувати більш рівний зріз. Швидкість розрізання такими ножицями нижче.

Опис конструкцій летючих ножиць з поступальним рухом ножів можна знайти в літературі [9,13,14, 40-42,52]. У роботах [202-212] представлені деякі рішення, спрямовані на підвищення якості розрізання, а також надійності роботи кривошипно-важільних [202-205], кривошипно-ексцентрикових [206,207], паралелограмних [208,209], планетарних [210,211], двокривошипних [212] летючих ножиць.

Важільно-хитні (маятникові) ножиці [9,13] розрізають смугу за рахунок одночасного зближення ножів, а весь механізм різання при цьому нахиляється в напрямку руху смуги. Після закінчення розрізання ножі повертаються в початкове положення. Заходи, спрямовані на вдосконалення конструкції і підвищення якості

розрізання маятникових ножиць з механічним приводом представлені в роботах [213-214], а гідравлічних в [215-218].

Летючі дискові ножиці [13] можуть застосовувати для попереднього розрізання дрібного сорту зі швидкістю розрізання 10 м/с і вище. Однак ножиці даної конструкції не дозволяють отримувати пряму площину зрізання.

Також для попереднього розрізання дрібного сортового металу можна використовувати обертові одновісні ножиці [9]. Розрізання здійснюється за рахунок зближення ножів встановлених на обертальному диску при їх проходженні між роликami включення (див. рис. 1.12, а).

Практика експлуатації летючих ножиць і їх розвиток показали високу ефективність двобарабанных ножиць і ножиць з поступальним рухом ножів, що підтверджується їх широким застосуванням у виробничих умовах. Спостерігається суттєве зниження застосування важільно-хитних (маятникових) ножиць. Летючі дискові і обертові одновісні ножиці в даний час практично не використовуються при виробництві металопрокату.

Численні виробники сталі експлуатують прокатні стани в режимі роботи за принципом із змінним числом ниток розкату [19-23]. Залежно від потужності печі і розмірів продукції використовується технологія багаторівчачої прокатки-розділення (БПР), що дозволяє отримувати з однієї заготовки або злитка одночасно від двох до восьми розкатів.

Різні схеми розділення розкатів в процесі БПР, які можуть бути реалізовані в умовах реверсивної, послідовної або безперервної прокатки, представлені в роботах [19-21]. При цьому слід вказати, що процес розділення зрізанням перемичок може бути реалізований валками, які мають гладку бочку, або багаторівчачові калібри, а для реалізації процесу розділення шляхом розриву перемичок використовують багаторівчачові калібри або валки з клиновими буртами.

Різні технічні рішення, спрямовані на вдосконалення процесу БПР і підвищення якості розділення заготовок зрізанням перемичок можна знайти в роботах [219-228].

Рішення з тією ж метою, але стосовно до розділення заготовок розривом перемичок, представлені в роботах [229-244]. При цьому слід зазначити, що в роботі [238] пропонується спосіб холодної прокатки прутків із застосуванням технології БПР.

В цілому БПР може бути застосовна на діючих прокатних станах, однак, як вказується в роботі [20], при збільшенні перерізу початкової заготовки потрібна установка додаткових клітей, що вимагає додаткових капіталовкладень. Але навіть в цьому випадку може знижуватися швидкість входу заготовки в стан і, як наслідок інтенсивного зниження температури розкату, збільшуються енергосилові параметри процесу прокатки.

Така ситуація зумовила появу установок поздовжнього розділення в міжклітьовому просторі, які в більшості випадків виконують неприводними, за рахунок більш повного використання резерву складової втягування сил тертя в осередку деформації приводних прокатних клітей.

На рис. 1.13 представлений загальний вигляд неприводного ділильного пристрою і варіанти розташування кінцевих ділильних роликів залежно від отриманого числа ниток розкату. Такого роду ділильні пристрої встановлюють в проміжках між клітьми і, в цьому випадку, не потрібно істотних капіталовкладень і додаткових площ.

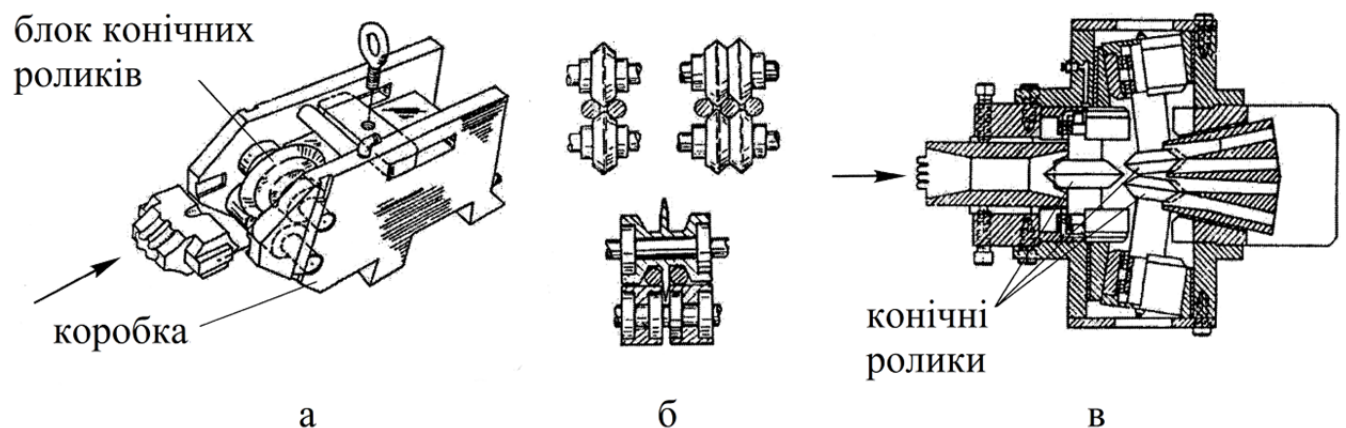


Рисунок 1.13 – Пристрої для поздовжнього розділення дво- і триниткового (а) розкату і схеми розділення кінцевими роликами (б) в коробці, а також конструкція для чотириниткового розкату (в) [19]

Ще один варіант встановлення неприводних ділильних пристроїв представлений на рис. 1.14. В даному випадку використовується пристрій з ділильними роликками, який встановлюється в робочій клітці в якості привалкової арматури.

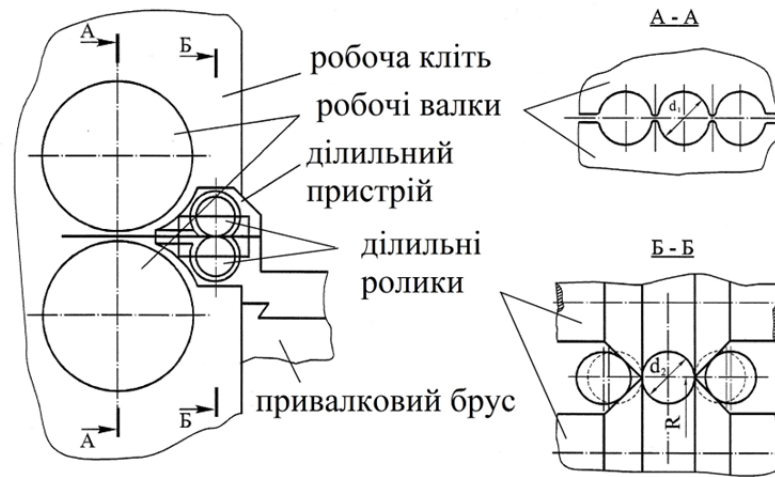


Рисунок 1.14 – Схема встановлення пристрою з ділильними роликками для поздовжнього розділення розкату [19]

Крім того, розділення розкатів може бути здійснено за рахунок використання дискових ножів, встановлених самостійно (рис. 1.15, а) або в комбінованих пристроях (рис. 1.15, б).

Розвиток і вдосконалення ділильних пристроїв йде в напрямку підвищення їх жорсткості, збільшення довговічності робочого інструменту і зростання якості розділення розкатів [19-23, 245-257].

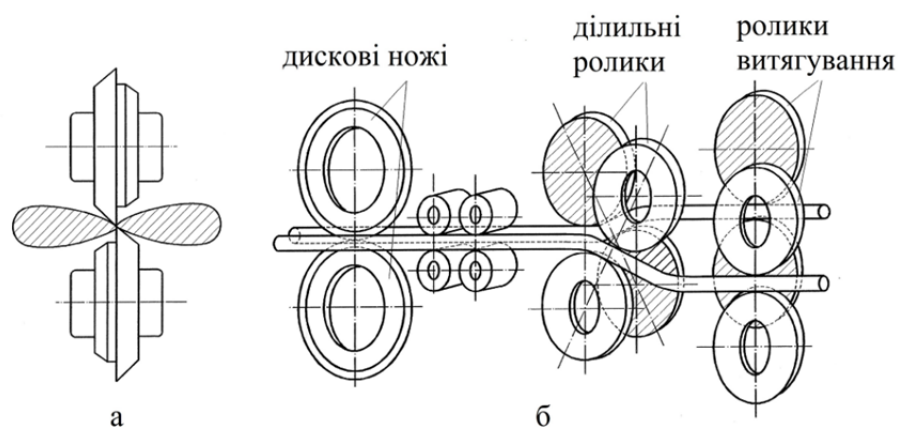


Рисунок 1.15 – Застосування дискових ножиць (а) для поздовжнього розділення двониткового розкату і пристрій фірми «Кобе Сэйкосе» (б) [19]

1.3 Методи розрахунку процесів розділення листового і сортового прокату

Процеси обробки металів тиском супроводжуються пластичними змінами форми металу в області деформації і характеризуються показниками напружено-деформованого стану. В ході розділових операцій крім пружно-пластичної стадії деформації металу мають місце етапи утворення і зростання тріщини в матеріалі з подальшим повним розділенням на частини за рахунок порушення його суцільності (сколювання, відрив).

З метою теоретичного аналізу зазначеного НДС, в залежності від призначення і трудомісткості проведених досліджень, обсягів і ступеня достовірності наданих результатів, основними можуть бути різні методи і підходи. Умовно їх можна розділити на інженерні, що представляють собою алгоритмічні поєднання різного роду явних аналітичних залежностей, і чисельні, що використовують чисельні методи на базі сучасних обчислювальних засобів.

Створення і розвиток теоретичних основ процесів розділення металу при обробці тиском базується на величезній кількості різноманітних наукових досліджень. Вагомий внесок у вивчення різних розділових операцій в прокатному виробництві в різний час внесли: О. І. Целіков, В. В. Носаль, А. А. Корольов, В. В. Смирнов, Н. І. Крилов, В. І. Дунаєвський, А. В. Сатонін, Б. Н. Поляков, В. І. Люленков, В. Ф. Єгоров, В. М. Клименко, В. Ф. Габайдулін, Г. М. Шульгін, С. М. Жучков та ін.

Аналіз результатів виконаних робіт дозволив встановити, що в даній області знань існує необхідність більш глибокого і всебічного вивчення питань розділення металу при обробці тиском, з метою зміцнення теоретичних основ і підвищення наукової обґрунтованості при прийнятті конструкторських і технологічних рішень, спрямованих на вдосконалення технологій і обладнання, підвищення якості готових виробів операцій розділення.

В основі сучасного уявлення про процес розрізання металу на ножицях лежать теоретичні та експериментальні дослідження академіка О. І. Целікова і створеної ним школи [13].

Поперечне розрізання паралельними ножами є найбільш простим для дослідження процесом розділення. У ножиць з паралельними ножами кут загострення ножів зазвичай дорівнює 90° (рис. 1.16).

Процес розрізання характеризується наступними трьома періодами (рис. 1.16, в) [13,14,40-44]:

I – вмивання ножів в метал, при якому спостерігається зростання сили розрізання до максимуму P_{\max} при відносному проникненні ножів в метал ε_0 ;

II – власне розрізання (зрушення металу по площині зрізання) з поступовим зниженням сили розрізання і збільшенням відносного проникнення;

III – сколювання (відривання) нерозділеної частини перерізу при відносному проникненні ε_n .

Відповідно до методики О. І. Целікова максимальну силу розрізання металу паралельними ножами визначають за формулою [13,14,42-44]:

$$P = k_1 k_2 k_3 \sigma_b b h (1 - \varepsilon_0), \quad (1.1)$$

де $k_1 = \tau_{\max} / \sigma_b$ – коефіцієнт переходу від границі міцності при розтягуванні σ_b до границі міцності при зрізанні τ_{\max} ;

k_2 – коефіцієнт, що враховує збільшення сили розрізання при затупленні ножів в процесі тривалої експлуатації;

k_3 – коефіцієнт, що враховує збільшення сили розрізання при збільшенні бокового зазору між ножами в процесі тривалої експлуатації;

b і h – ширина і висота розрізуваного перерізу металу.

Бокова горизонтальна сила розпору ножів визначається [13]:

– при розрізанні без притиску (рис. 1.16, а) $T = (0,15 \dots 0,25)P$;

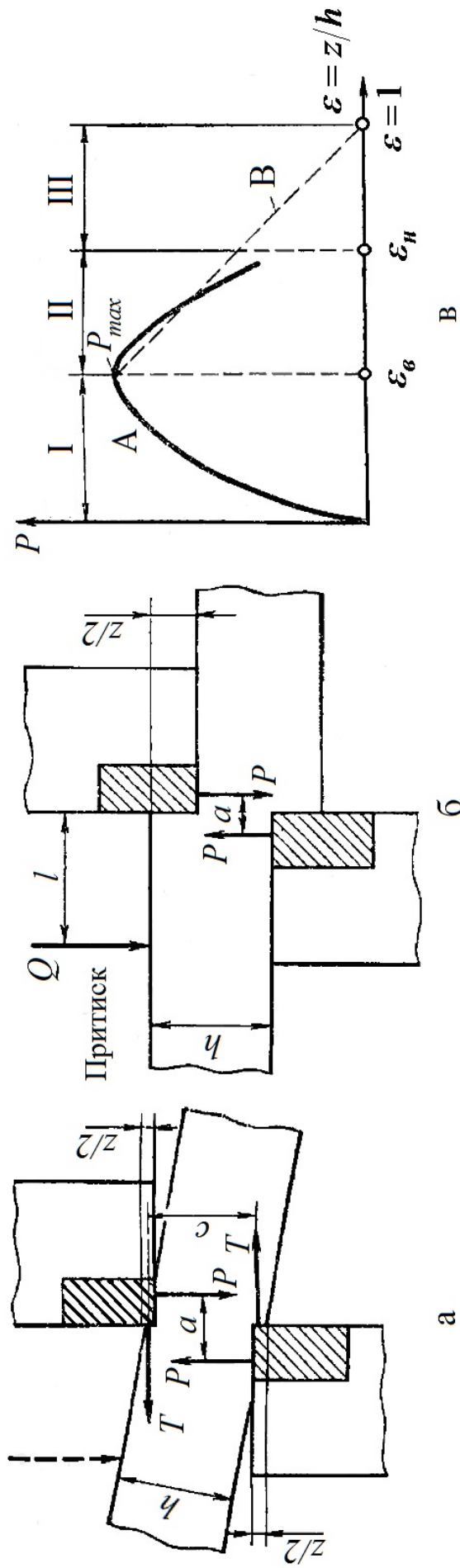


Рисунок 1.16 – Схема розрізання розкату на ножицях з паралельними ножами без притиску (а) і з притиском (б), а також зміни сили розрізання (в) в залежності від відносного проникнення ножів: А – експериментальна крива; В – пряма на ділянці власне розрізання

– при розрізанні з притиском (рис. 1.16, б) $T = (0,1\dots 0,15)P$.

Власне сила притиску дорівнює [13]:

$$Q = (0,03\dots 0,05)P.$$

Ще одним важливим показником процесу є робота розрізання, яка у відомому масштабі виражається площею кривої питомого опору розрізанню [13]:

$$A = \int b h \tau dz = \int b h \tau h d\varepsilon = b h^2 \int \tau d\varepsilon = b h^2 a, \quad (1.2)$$

де $\tau = f(\varepsilon)$ – питомий опір розрізанню, який визначається шляхом ділення експериментальних кривих сили розрізання на площу розрізуваного перерізу;

a – питома робота розрізання, яка може бути визначена за емпіричною залежністю [13]:

$$a = (1,0\dots 1,3)10^{-5} \tau_g \delta_5, \quad (1.3)$$

де τ_g – величина питомого опору розрізанню при величині відносного проникнення ε_g , коли сила розрізання сягає свого максимуму (див. рис. 1.16,в);

δ_5 – відносне подовження п'ятикратного зразка при випробуваннях на розрив.

У той же час розглянута методика не враховує цілий ряд факторів, що істотно впливають на величину і характер сили розрізання паралельними ножами. Більш точний розрахунок сили розрізання з урахуванням механічних властивостей розрізуваного металу, температури нагрівання, поперечного перерізу, бічного зазору між ножами, ступеня притуплення ножів та ін. запропонований в методиці В. Ф. Єгорова та В. І. Люленкова [40], яка базується на об'ємних експериментальних дослідженнях.

Зокрема В. Ф. Єгоров та В. І. Люленков [40] пропонують доповнити формулу О. І. Целікова додатковими коефіцієнтами:

$$P = k_{\alpha} k_1 k_2 k_3 \sigma_b b h (1 - \varepsilon_{\varepsilon}) z_T z_u z_{\varepsilon}, \quad (1.4)$$

де k_{α} – коефіцієнт напруженого стану залежно від b/h і $\varepsilon_{\varepsilon}$;

z_T – температурний коефіцієнт;

z_u – швидкісний коефіцієнт;

z_{ε} – коефіцієнт усталення металу при деформації.

За результатами досліджень Зайкова-Колесникова [40] сила при холодному розрізанні нормалізованих вуглецевих сталей із вмістом вуглецю $C = 0,19 \dots 0,68\%$, в залежності від відносного проникнення ε становить:

$$P = 0,575 k \xi \frac{\sigma_b}{1 - \psi_p} \left(\frac{\varepsilon_{\varepsilon}}{\psi_p} \right)^{\delta_p} \left(1 + \frac{b_n f}{2h} \right) b h (1 - \varepsilon), \quad (1.5)$$

де $k = 1,15 \dots 1,2$ – коефіцієнт, що враховує можливе притуплення ножів;

ξ – коефіцієнт, що враховує вплив торцевих сил тертя та змінюється в межах $\xi = 1,03 \dots 1,09$ при $f = 0,1 \dots 0,3$;

ψ_p і δ_p – відповідно рівномірне звуження і подовження зразка;

b_n – ширина площадки контакту металу з ножем.

При цьому границя міцності металу має визначатися формулою [40]:

$$\sigma_b = 320(1 + 2,5C) \text{ МПа}, \quad (1.6)$$

де C – вміст вуглецю в сталі, %.

Рівномірне звуження зразка, також залежить від вмісту вуглецю та термічної обробки [40]:

– для нормалізованих сталей:

$$\psi_p = 0,186(1,168 - C); \quad (1.7)$$

– для сталей без нормалізації:

$$\psi_p = 0,167(1,168 - C). \quad (1.8)$$

А рівномірне подовження зразка, при цьому визначають [40]:

$$\delta_p = \frac{\psi_p}{1 - \psi_p}. \quad (1.9)$$

Величина відносного проникнення ε_θ , коли сила розривання сягає свого максимуму, в даній методиці дорівнює:

$$\varepsilon_\theta = 1,8\psi_p. \quad (1.10)$$

За результатами експериментальних досліджень ВНДІМЕТМАШ максимальна сила розривання в холодному стані [44, 266] становить:

$$P = K_{opr} h^2 \varepsilon_\theta \sqrt{\sigma_T \sigma_b / K_\tau}, \quad (1.11)$$

де K_{opr} – коефіцієнт відриву, який визначається графічно (рис. 1.17, а) в функції ε_θ , яке в свою чергу залежить від товщини розрізуваного листа (рис. 1.17, б);

σ_T – границя текучості розрізуваного матеріалу;

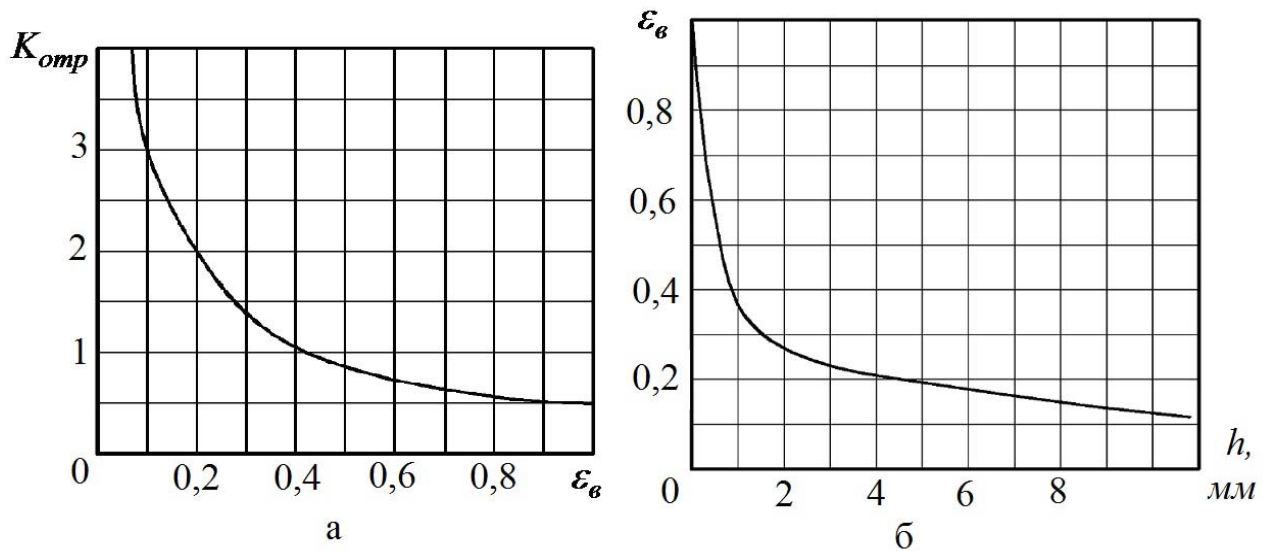


Рисунок 1.17 – Залежність коефіцієнту K_{omp} від відносного проникнення ε_ε (а) та відносного проникнення ε_ε від товщини h розрізуваної смуги з матеріалу з $\sigma_T/\sigma_b \leq 0,7$ і $\delta_5 = 10\dots 30\%$ при холодному розрізанні (б) [44, 266]

K_τ – коефіцієнт механічних властивостей розрізуваного матеріалу, який визначається графічно (рис. 1.18) у функції співвідношення границі текучості розрізуваного матеріалу до границі міцності при холодному розрізанні.

В роботі [44] вказується, що з метою використання графічних даних, при автоматизованих розрахунках можна використовувати наступні апроксимації при визначенні коефіцієнту механічних властивостей розрізуваного матеріалу:

$$K_\tau = \begin{cases} 2,5 \frac{\sigma_T}{\sigma_b} & \text{при } 0,3 \leq \frac{\sigma_T}{\sigma_b} \leq 0,6 \\ 1,5 + 4 \left(\frac{\sigma_T}{\sigma_b} - 0,6 \right) - 30 \left(\frac{\sigma_T}{\sigma_b} - 0,6 \right)^2 + 200 \left(\frac{\sigma_T}{\sigma_b} - 0,6 \right)^3 & \text{при } 0,6 < \frac{\sigma_T}{\sigma_b} \leq 0,8 \quad (1.12) \\ 2,7 + 19,5 \left(\frac{\sigma_T}{\sigma_b} - 0,8 \right) & \text{при } 0,8 < \frac{\sigma_T}{\sigma_b} \leq 1,0 \end{cases}$$

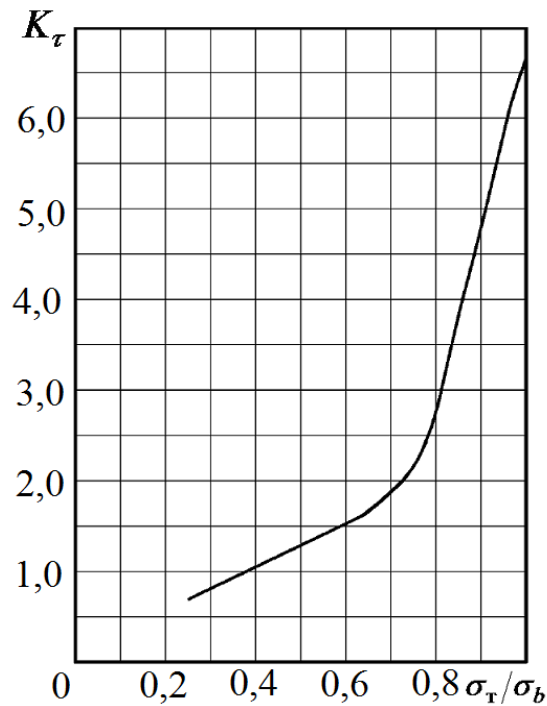


Рисунок 1.18 – Коефіцієнт механічних властивостей розрізаного матеріалу K_τ при співвідношенні σ_τ/σ_b в умовах холодного розрізання [44, 266]

При обчисленні величини відносного проникнення ε_g при $\frac{\sigma_\tau}{\sigma_b} \leq 0,7$ і $\delta_5 = 10 \dots 30\%$ пропонуються наступні апроксимації [44]:

$$\varepsilon_g = \begin{cases} 1 - 0,833h - 0,977h^2 + 2,035h^3 & \text{при } 0 < h \leq 0,48 \\ 0,184 + 0,543(1 - h/5)^{2,64} & \text{при } 0,48 < h < 5,0 \\ 0,1 + 0,012(12 - h) & \text{при } 5,0 \leq h \leq 12,0 \end{cases} \quad (1.13)$$

За умови $\frac{\sigma_\tau}{\sigma_b} > 0,7$:

$$\varepsilon_g = \begin{cases} \varepsilon_{g0} 0,7\delta_5/10(\sigma_\tau/\sigma_b) & \text{при } \delta_5 < 10\% \\ \varepsilon_{g0} 0,7\delta_5/30(\sigma_\tau/\sigma_b) & \text{при } \delta_5 > 30\% \end{cases}, \quad (1.14)$$

де ε_{60} – значення величини відносного проникнення отримане за попереднім рівнянням (1.13)

Приклади теоретичного аналізу процесу розрізання паралельними ножами на базі законів пластичної течії металу з використанням чисельних рішень диференціальних рівнянь і методу ліній ковзання можна знайти в роботах [258-262].

Крім того, проектування конструкцій ножиць та надійність їх експлуатації істотно залежать від точності теоретичних методів розрахунку кінематичних і динамічних параметрів ножиць [263,264].

Розрізання похилими ножами дозволяє знизити силу розрізання, яка містить три складові, а саме власне силу розрізання P_1 , силу згину відрізуваної частини листа P_2 и силу згину листа в зоні розрізання P_3 [13,14,40-43].

При розрізанні похилим ножем, опір розрізанню складає площа, обмежена трапецією ABMD (рис. 1.19). У літературі можна зустріти різні варіанти визначення максимальної сили розрізання похилими ножем.

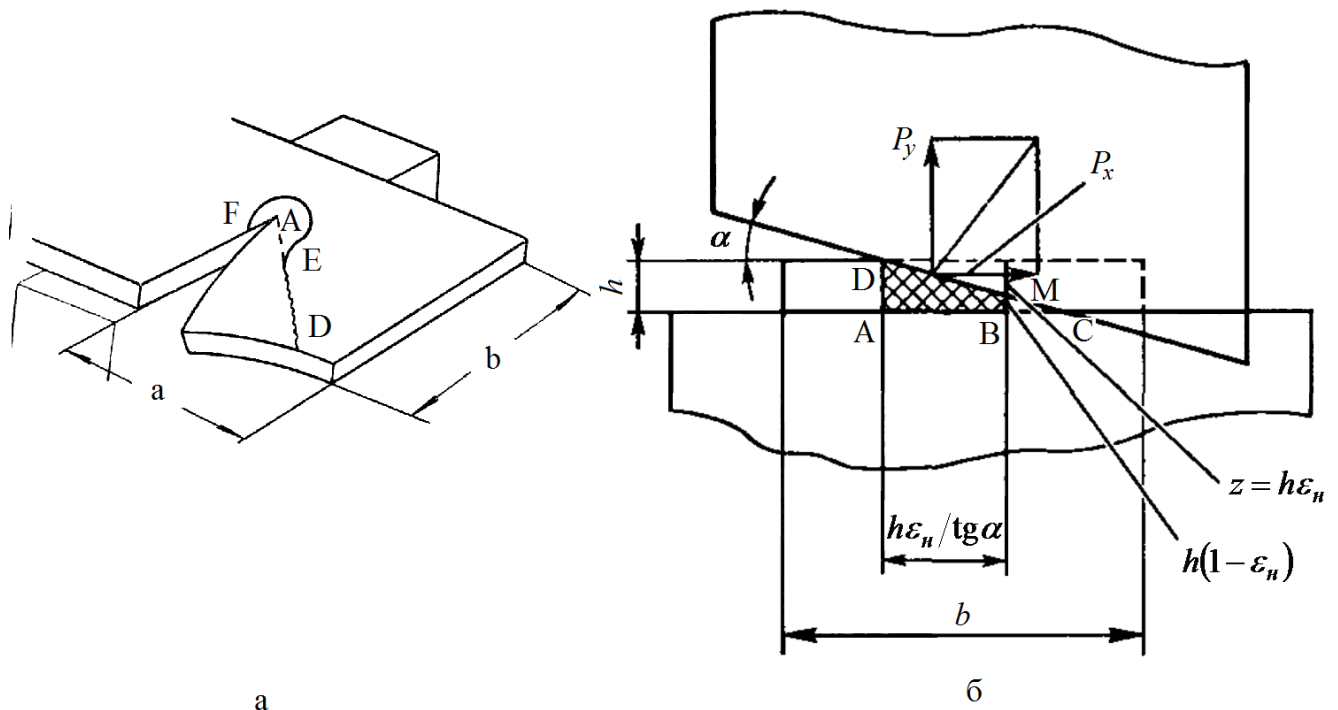


Рисунок 1.19 – Схематичне зображення листа, надрізаного похилим ножем (а) і розрахункова схема розрізання (б) [13, 14. 266]

За даними досліджень В. В. Носаля [265]:

$$P = \frac{0,6k\sigma_b\delta_5 h^2}{\operatorname{tg}\alpha} \left[1 + k_z \frac{\operatorname{tg}\alpha}{0,6\delta_5} + \frac{1}{1 + 10\delta_5 / (\sigma_b k_y^2 k_x)} \right] \quad (1.15)$$

де k – коефіцієнт, що враховує притуплення ножів і міцність розрізуваного металу і залежить від товщини розрізуваного листа;

α – кут нахилу верхнього ножа ножиць;

k_z – коефіцієнт, який визначається з графіка (рис. 1.20) в залежності від безрозмірної величини $\lambda = l_a \operatorname{tg}\alpha / (\delta_5 h)$ (тут l_a – ширина відрізуваної частини);

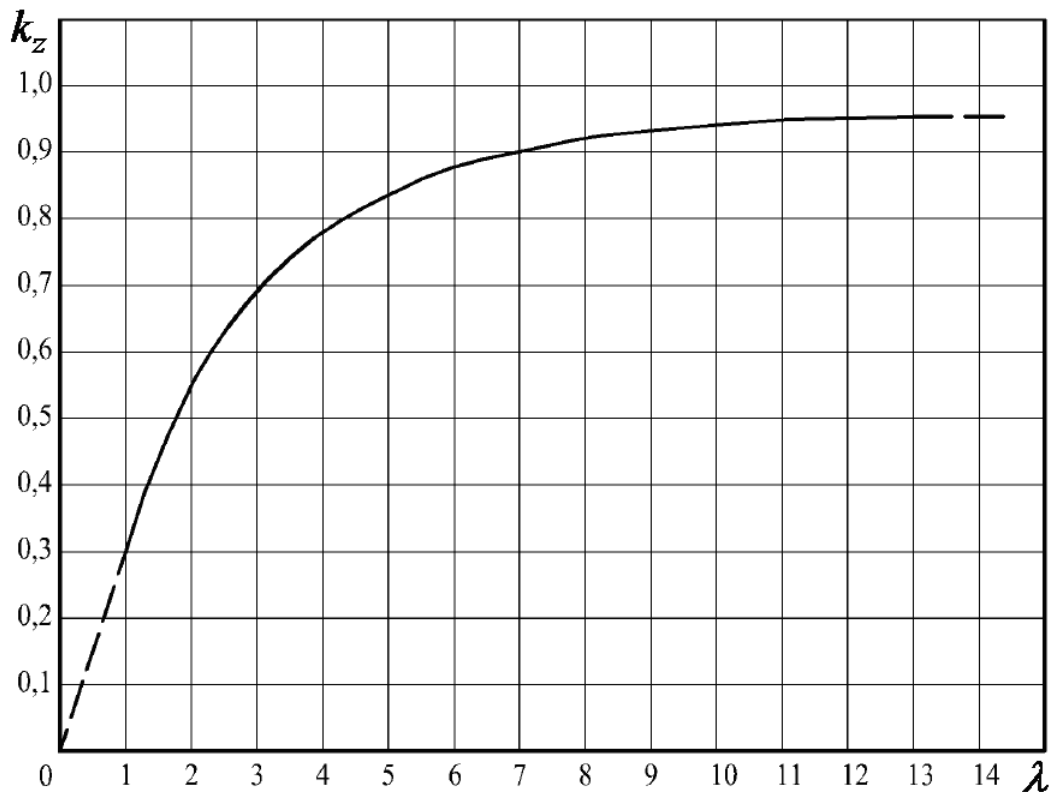


Рисунок 1.20 – Залежність коефіцієнта k_z від коефіцієнту λ [44, 266]

k_y – відносний поперечний зазор між ножами, який визначається як відношення поперечного зазору між ножами (залежить від товщини розрізуваного листа) до товщини розрізуваного листа;

k_x – коефіцієнт, що враховує дію притиску та визначається як відношення відстані між різальною кромкою нижнього ножа і центром притиску (залежить від товщини розрізуваного листа) до товщини розрізуваного листа.

Відповідно до даних Зайкова-Колесникова [40]:

$$P = 0,575k\xi\sigma_b \left(\frac{\varepsilon_m}{2\psi_p} \right)^{\delta_p} \left(1 + \frac{b_u f}{2h} \right) \frac{h^2}{\operatorname{tg}\alpha} \varepsilon_m \left(1 - \frac{\varepsilon_m}{2} \right), \quad (1.16)$$

де $k = 1,15 \dots 1,2$ – коефіцієнт, що враховує можливе притуплення ножів;

ε_m – ступінь проникнення правої кромки ножа, відповідний максимуму навантаження $\varepsilon_m = 2,38\psi_p$.

За результатами робіт ВНДІМЕТМАШ для визначення максимальної сили розрізання похилими ножами в холодному стані запропонована формула Крилова-Тарасова [266]:

$$P = K_{\varepsilon_n} K_{\text{omp}} \frac{h^2 \varepsilon_\varepsilon}{\operatorname{tg}\alpha} \sqrt{\frac{\sigma_\tau \sigma_b}{K_\tau}} + k_z h^2 \sigma_b, \quad (1.17)$$

де K_{ε_n} – коефіцієнт епюри (рис. 1.21).

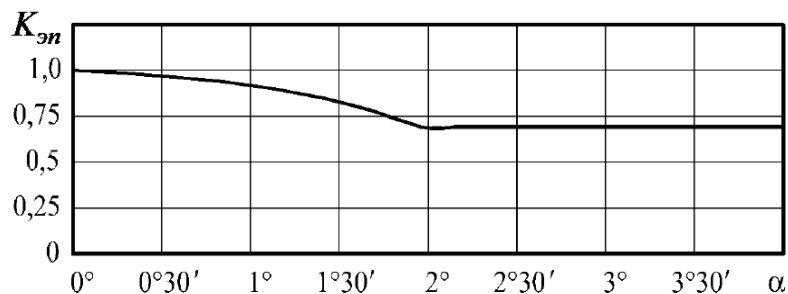


Рисунок 1.21 – Коефіцієнт епюри при куті нахилу верхнього ножа [266]

Однак найчастіше в літературі можна зустріти формулу А. А. Корольова з визначення максимальної сили розрізання похилим ножом [13,14,41-43]:

$$P = k_1 k_2 k_3 \frac{2 - \varepsilon_n}{2 \operatorname{tg} \alpha} \varepsilon_n h^2 \sigma_b. \quad (1.18)$$

У цій формулі і далі по тексту призначення коефіцієнтів k_1 , k_2 и k_3 аналогічно (1.1), проте слід зазначити, що їх величина може дещо змінюватись в різних джерелах [13,14,41-43], а їх добуток стосовно розрізання похилими ножами може становити $k_1 k_2 k_3 \approx 0,76 \dots 1,5$.

Дослідження, спрямовані на уточнення існуючих методик розрахунку сили розрізання похилим ножом можна знайти в роботах [266, 267].

Стосовно до розрізання шевронними ножами в літературі [13,14,41-43] пропонують величину сили, яка розрахована за однією з формул (1.15)-(1.18) помножувати на 2.

Розрахунок процесу розрізання дуговими ножами виконують за аналогією з похилими ножами [42, 266, 269, 270], замінюючи дугу верхнього ножа хордою. У процесі розрізання дуговий ніж перекочується по листу і кут нахилу хорди змінюється, що ускладнює визначення максимального значення сили розрізання.

У зв'язку з цим виконують кінематичний аналіз з метою визначення координат осей всіх важелів, при відомих характеристиках кривошипно-важільного механізму і технологічних режимах його роботи. Так на рис. 1.22 представлені кінематичні схеми ножиць з перекочуванням ножа – з двома кривошипами та коромислом (рис. 1.22,а,б) або копіром (рис. 1.22,в); а також з одним кривошипом (рис. 1.22,г).

Як зазначається в роботі [266] виконання кінематичного аналізу для ножиць з двома кривошипами та коромислом або копіром при постійному радіусі абсолютно ідентичні, а у випадку копіра зі змінним радіусом при розгляді кінематики повинна бути задана функція траєкторії руху осі катка.

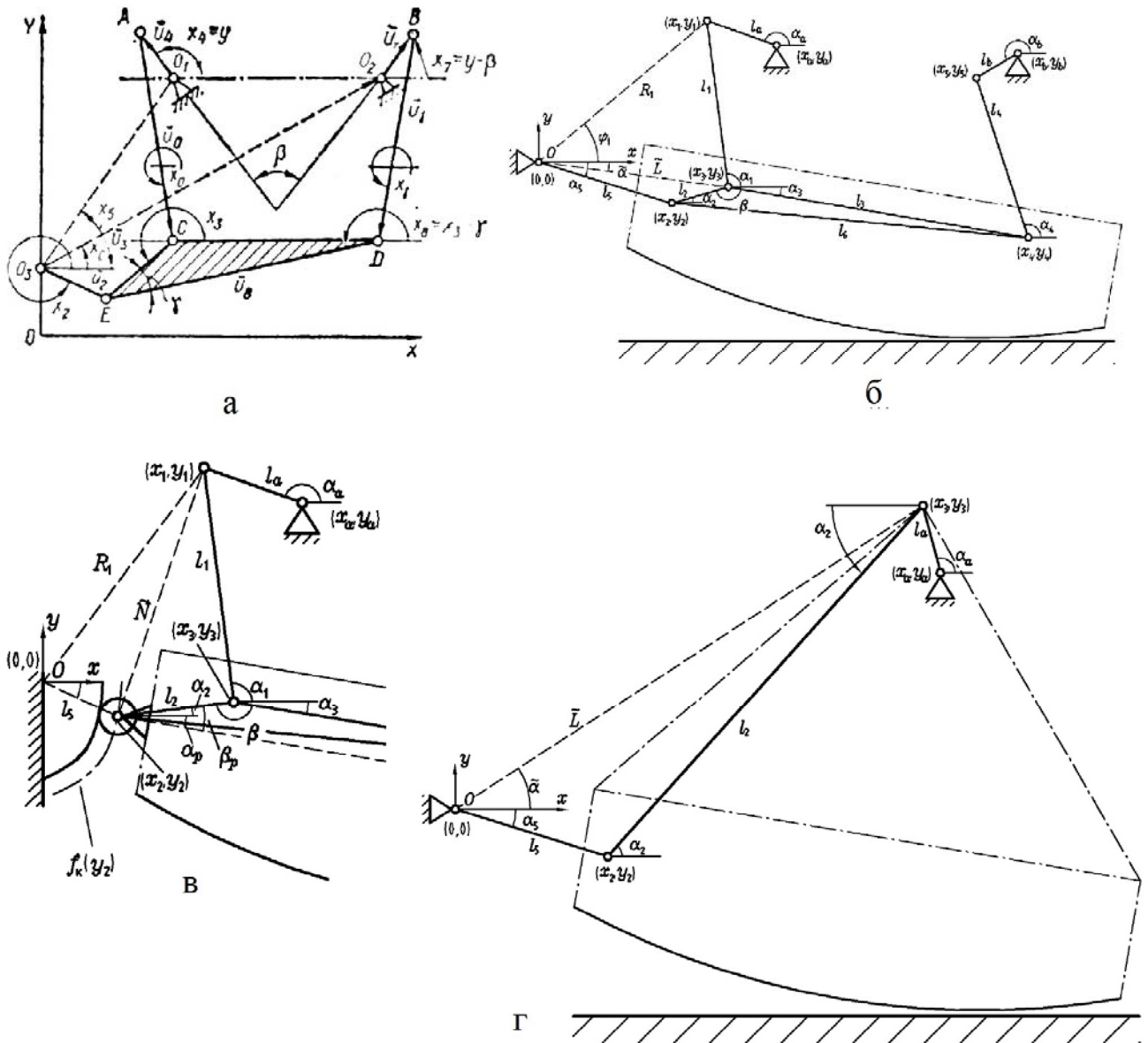


Рисунок 1.22 – Кінематичні схеми ножиць з перекочуванням ножа:
 а, б – з двома кривошипями та коромислом; в – з двома кривошипями та копіром;
 г – з одним кривошипом [40, 266]

Для аналітичного дослідження доцільно використовувати методикку Є. І. Фіщенко [40], згідно з якою вводять в систему координат ХОУ і складають розрахункову схему (див. рис. 1.22, а) для визначення положень важелів ножиць. Відповідно до методу векторних контурів записують два векторних рівняння:

$$\begin{aligned} \bar{u}_5 + \bar{u}_4 + \bar{u}_0 + \bar{u}_3 &= \bar{u}_2; \\ \bar{u}_0 + \bar{u}_7 + \bar{u}_1 + \bar{u}_8 &= \bar{u}_2. \end{aligned} \tag{1.19}$$

Проекцію векторних систем на координатні осі виконують з врахуванням співвідношень:

$$\begin{aligned} \bar{u}_0 = \bar{u}_1; \quad \bar{u}_4 = \bar{u}_7; \quad \bar{x}_4 = y; \quad x_7 = y - \beta; \quad x_8 = x_3 - \gamma; \\ \left\{ \begin{aligned} f_0 = u_0 \cos x_0 - u_2 \cos x_2 + u_3 \cos x_3 + u_4 \cos y + u_5 \cos x_5 = 0; \\ f_1 = u_0 \sin x_0 - u_2 \sin x_2 + u_3 \sin x_3 + u_4 \sin y + u_5 \sin x_5 = 0; \\ f_2 = u_1 \cos x_1 - u_2 \cos x_2 + u_3 \cos(x_3 - \gamma) + u_4 \cos x_6 + u_4 \cos(y - \beta) = 0; \\ f_4 = u_1 \sin x_1 - u_2 \sin x_2 + u_3 \sin(x_3 - \gamma) + u_4 \sin x_6 + u_4 \sin(y - \beta) = 0. \end{aligned} \right. \quad (1.20) \end{aligned}$$

Задля визначення швидкостей ланок механізму в роботі [266], у відповідності до кінематичного розрахунку запропонованого Бойденко Н. Г. отримують систему 4-х трансцендентних рівнянь (див. рис. 1.22, б):

$$\begin{bmatrix} l_1 \sin(\alpha_1 + \pi) & l_2 \sin(\alpha_3 - \beta) & 0 & -l_5 \sin \alpha_5 \\ l_1 \cos(\alpha_1 + \pi) & l_2 \cos(\alpha_3 - \beta) & 0 & -l_5 \cos \alpha_5 \\ l_1 \sin(\alpha_1 + \pi) & l_3 \sin \alpha_3 & -l_4 \sin(\alpha_4 + \pi) & 0 \\ l_1 \cos(\alpha_1 + \pi) & l_3 \cos \alpha_3 & -l_4 \cos(\alpha_4 + \pi) & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \omega_1 \\ \omega_2 \\ \omega_4 \\ \omega_5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -l_a \omega_a \sin \alpha_a \\ -l_a \omega_a \cos \alpha_a \\ l_b \omega_b \sin \alpha_b - l_a \omega_a \sin \alpha_a \\ l_b \omega_b \cos \alpha_b - l_a \omega_a \cos \alpha_a \end{bmatrix} \quad (1.21)$$

Для вирішення цієї системи, автор використовував чисельні методи.

При кінематичному аналізі ножиць з одним кривошипом кількість рівнянь скорочується до двох, а їх рішення істотно спрощується [266].

Розвиток методики розрахунку процесу розрізання на ножицях з дуговим ножом запропоновано в роботі [271]. В рамках даної роботи розроблена одновимірна математична модель процесу розрізання на базі чисельного рекурентного рішення скінченно-різницевої форми статичної рівноваги по визначенню геометричних характеристик і енергосилових параметрів в рамках кожного окремо виділеного елементарного об'єму осередку розрізання, що сприяє підвищенню точності виконуваних розрахунків.

При розрахунку процесу розрізання металу на дискових ножицях визначають силу P і момент M розрізання, що дозволяє розрахувати потужність приво-

ду ножиць. Найменш трудомісткими є добре відомі методики О. І. Целікова [13,40] і А. А. Корольова [41-43].

За результатами досліджень А. А. Королева для розрахунку сили розрізання (рис. 1.23, а) була запропонована наступна формула [41-43]:

$$P = k_1 k_2 k_3 \frac{2 - \varepsilon_n}{4 \operatorname{tg} \alpha} \varepsilon_n \sigma_b h^2, \quad (1.22)$$

де α – кут прикладання рівнодіючої сили розрізання.

На відміну від А. А. Корольова в методиці О. І. Целікова (рис. 1.23, б) пропонується крім сили власне розрізання P_1 (визначається за формулою (1.22)) враховувати додатково ще і силу згину P_2 відрізуваної частини смуги (кромка), що особливо важливо при обрізанні щодо широких кромek листів [13,40]:

$$P = P_1 + P_2 = k_1 k_2 k_3 \frac{2 - \varepsilon_n}{4 \operatorname{tg} \alpha} \varepsilon_n \sigma_b h^2 \left(1 + z_1 \frac{\operatorname{tg} \alpha}{\delta_5} \right), \quad (1.23)$$

де z_1 – коефіцієнт згину, що визначається в залежності від співвідношення ширини відрізуваної кромки b_k до товщини листа h :

b_k/h	0	5	10	15	20
z_1	0,0	0,8	1,3	1,4	1,4

Визначивши силу розрізання на дискових ножицях за формулами (1.9) і (1.10), автори представлених вище методик пропонують для розрахунку моменту розрізання парою дисків наступну формулу:

$$M = PD \sin \alpha, \quad (1.24)$$

де D – діаметр дискових ножів.

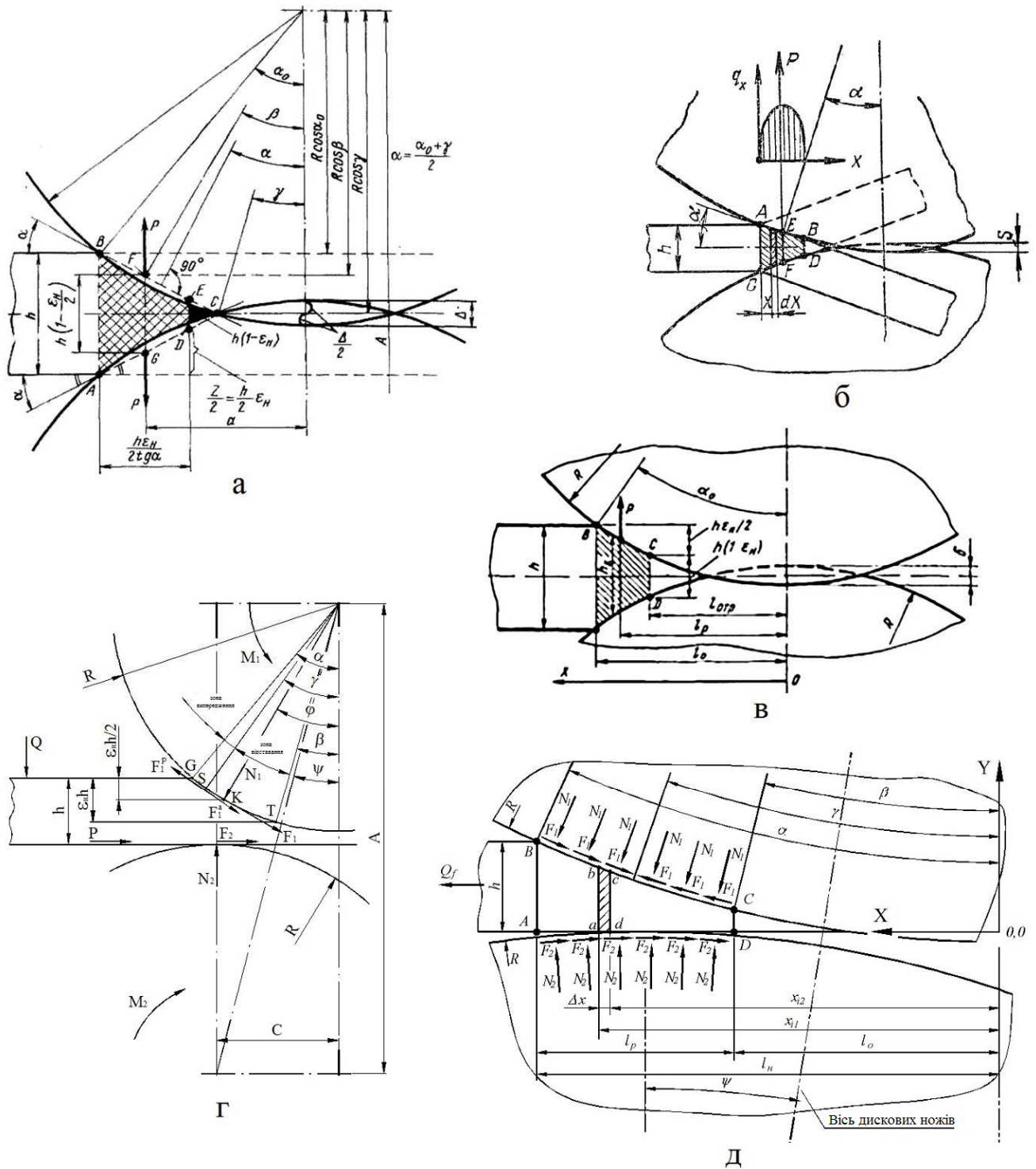


Рисунок 1.23 – Розрахункові схеми розрізання дисковими ножами при симетричному (а-в) та несиметричному (г, д) проникненні та різних методиках розрахунку: А. А. Корольов (а) [42. 43]; О. І. Целіков (б) [13, 14. 266], ; В. І. Дунаєвський, О. В. Сатонін, А. С. Ткаченко (в) [272]; С. М. Носенко (г) [276]; одномірна математична модель на основі чисельного рекурентного рішення скінченно-різницевої форми статичної рівноваги (д) [276]

При визначенні сили розрізання за формулами (1.22) і (1.23) виходять з апроксимації контактних поверхонь хордами, що дозволяє вести викладки по аналогії з процесом розрізання похилими ножами.

З метою підвищення точності виконуваних розрахунків шляхом урахування реальної форми робочого інструмента (див. рис. 1.23, в) в роботах [272, 273], для визначення сили розрізання, що припадає на одну пару дисків, пропонується формула вигляду:

$$P = k_1 k_2 k_3 \sigma_b F_{ABCD} = k_1 k_2 k_3 \sigma_b \left[\frac{(h + \Delta)(l_o^3 - l_{omp}^3)}{3l_o^2} - \Delta(l_o - l_{omp}) \right], \quad (1.25)$$

де F_{ABCD} – площа зрізання;

l_o – загальна протяжність осередку деформації;

l_{omp} – загальна протяжність зони відриву.

Плече прикладання сили розрізання пропонується визначати за формулою:

$$l_p = \frac{3(l_o^2 - l_{omp}^2) \left[(h + \Delta)(l_o^2 + l_{omp}^2) - 2\Delta l_o^2 \right]}{4(h + \Delta)(l_o^3 + l_{omp}^3) - 12\Delta l_o^2 (l_o - l_{omp})}. \quad (1.26)$$

Величина моменту розрізання, що приходить на одну пару дисків, в даному випадку визначається формулою:

$$M = 2Pl_p. \quad (1.27)$$

Автори робіт [274, 275] пропонують для розрахунку енергосилових параметрів процесу розрізання дисковими ножами використовувати чисельні математичні моделі, що дозволяє підвищити точність виконуваних розрахунків.

Слід зазначити, що всі розглянуті вище методики розрахунку енергосилових параметрів процесу розрізання дисковими ножами виходять із припущення симетричного проникнення ножів в розрізуваний метал і рівному розподілі моменту розрізання між верхнім і нижнім ножами.

Однак, в разі «звалювання» верхнього ножа у напрямку руху листа, коли осі дисків розташовані в різних вертикальних площинах (див. рис. 1.7, б), описані умови не виконуються.

Вперше дане питання, як зазначається в роботі [276], було розглянуте в роботах С. М. Носенко. Зокрема, він вказав на наявність деякої точки, котра ділить нейтральним кутом дугу контакту верхнього ножа з кромкою на дві частини (див. рис. 1.23, г): реактивну – «відставання», де окружна швидкість ножа більше швидкості кромки, і активну – «випередження», де вона менше швидкості кромки. Дане явище призводить до того, що сила тертя в зоні «відставання» перешкоджає розрізанню, а в зоні «випередження» захоплює розкат в ножі і саме цим пояснюється нерівномірний розподіл моменту розрізання між верхнім і нижнім ножами.

Уточнення в даному питанні було здійснено в роботі [276], за результатами якої запропонована чисельна одномірна математична модель (див. рис. 1.23, д) процесу розрізання дисковими ножами. В основу даної моделі було покладено чисельне рекурентне рішення скінченно-різницевої форми статичної рівноваги по визначенню геометричних характеристик і енергосилових параметрів в рамках кожного окремо виділеного елементарного об'єму осередку розрізання.

Також в літературі можна зустріти математичні моделі стосовно процесу розрізання дисковими ножами, які спрямовані на оцінку якості розрізання [277,278] і зношення дискових ножів [279].

Максимальна сила розрізання на барабанних летючих ножицях (рис. 1.24) виникає в кінці періоду вмикання ножа в метал (на початку розрізання) і залежить від конфігурації ножів встановлених в ножицях [40,42].

Оскільки ножі встановлені паралельно щодо осей барабанів і розрізання відбувається на невеликих дугах траєкторії ножів, можна вважати, що ножі проникають в метал назустріч один одному.

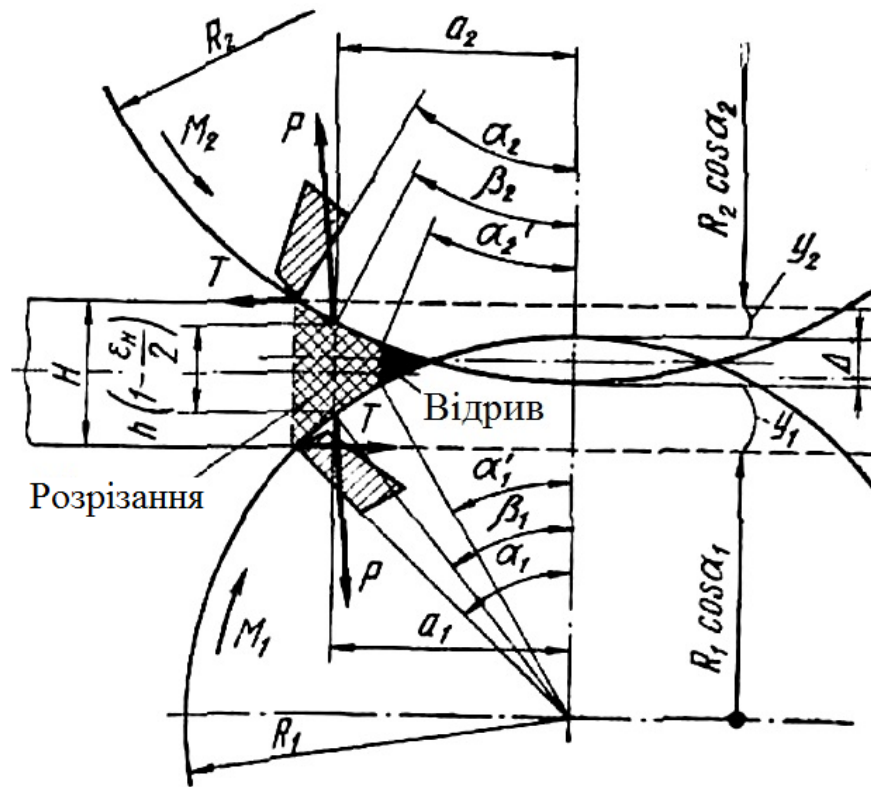


Рисунок 1.24 – Схема розрізання листа на барабанних летючих ножицях [40,42]

Таким чином, максимальну силу розрізання визначають за формулами [40,42]:

– для ножиць з паралельними ножами:

$$P = k_1 k_2 k_3 \sigma_b h \left(1 - \frac{\varepsilon_H}{2} \right); \quad (1.28)$$

– для ножиць з верхнім похилим і нижнім прямолінійним ножами:

$$P = k_1 k_2 k_3 \frac{3 - \varepsilon_H}{2 \operatorname{tg} \alpha} \varepsilon_H \sigma_b h^2; \quad (1.29)$$

– для ножиць з верхнім ножем шевронної форми:

$$P = 2k_1 k_2 k_3 \frac{3 - \varepsilon_n}{2 \operatorname{tg} \alpha} \varepsilon_n \sigma_b h^2. \quad (1.30)$$

В разі розрізання на барабанах різного діаметру сили будуть спрямовані під деяким кутом до вертикалі (див. рис. 1.24), однак, з огляду на незначну величину цього кута прийнято вважати їх вертикальними [40,42].

З огляду на те, що верхній барабан ведений, а нижній приводний, сумарний момент розрізання, на нижньому барабані (приймаючи $\beta_1 \approx \beta_2$, $a_1 \approx a_2 \approx a$), визначають, як [40,42]:

$$M = Pa \left(1 + \frac{R_1}{R_2} \right). \quad (1.31)$$

Ще одним важливим аспектом процесу розрізання на летючих ножицях є точність розрізання на мірні довжини. Методики розрахунку пов'язані з точністю розрізання і синхронізацією швидкостей ножів зі швидкістю смуги або роликів можна знайти в роботах [40, 42, 280, 281].

Стосовно розрізання профілів відмінних від прямокутних розрахунок максимальної величини сили розрізання А. А. Корольов [42] пропонує проводити за формулою (1.1) при цьому привести розрізуваний непрямокутний переріз (наприклад, круг) до рівнозначного по площі прямокутного перерізу.

Однак в методиці В. Ф. Єгорова та В. І. Люленкова [40], відзначається, що навіть при розрізанні квадратного перерізу, але по діагоналі (на летючих ножицях), при використанні фасонних ножів, необхідно враховувати нерівномірність швидкості деформації металу по ширині перерізу.

Так при розрізанні заготовки квадратного перерізу по діагоналі сторону еквівалентного квадрату пропонується визначати:

$$h_e = k'h, \quad (1.32)$$

де h – сторона квадрату розрізуваного по діагоналі;

k' – коефіцієнт переходу від дійсного квадрата до еквівалентного, значення якого визначають графічно в залежності від ступеня проникнення і кута розхилу різальних кромки (рис. 1.25).

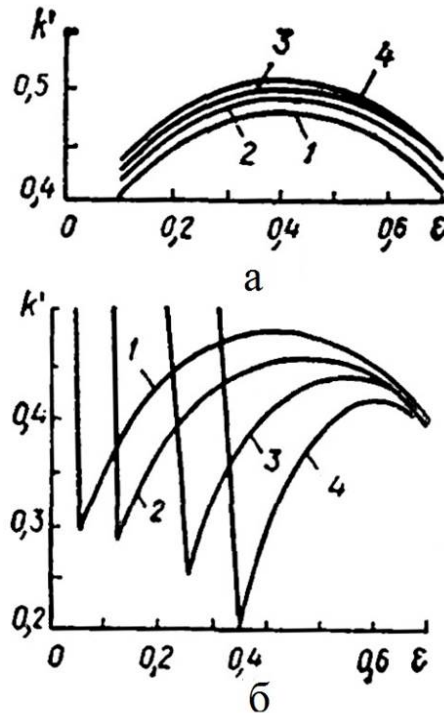


Рисунок 1.25 – Значення коефіцієнту переходу від дійсного квадрата до еквівалентного в залежності від ступеня проникнення і кута розхилу різальних кромки при значеннях кута розхилу $2\alpha = 90^\circ$ (а, 1); 88° (а, 2); 86° (а, 3); 84° (а, 4); 92° (б, 1); 97° (б, 2); 105° (б, 3); 112° (б, 4) [40]

Стосовно критичного ступеня проникнення ножів в метал пропонується рівняння:

$$\varepsilon_a^e = k \varepsilon_e, \quad (1.33)$$

де ε_e – критичний ступінь проникнення ножів в метал при розрізанні квадрату паралельними ножами;

k – коефіцієнт перерахування критичного ступеня проникнення ножів в метал при розрізанні по діагоналі, значення якого визначають графічно в залежності від кута розхилу різальних кромок (рис. 1.26).

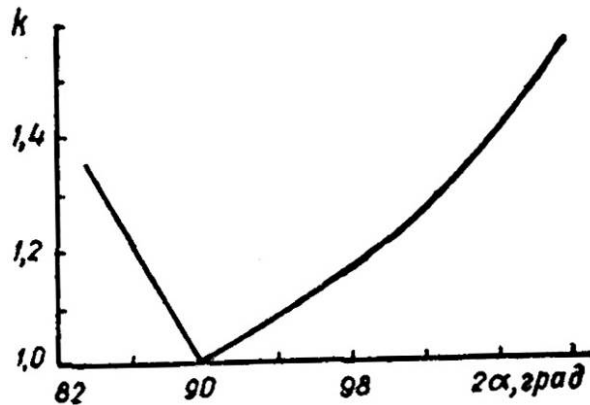


Рисунок 1.26 – Значення коефіцієнту перерахування критичного ступеня проникнення ножів в метал при розрізанні по діагоналі в залежності від кута розхилу різальних кромок [40]

У зв'язку з цим, останнім часом намітилася тенденція до розвитку методик розрахунку енергосилових параметрів процесу розрізання складних профілів, на базі чисельних методів [282-285].

Поздовжнє розділення прокату в процесі багаторівчачової прокатки-розділення, як було показано в підрозділі 1.2, полягає в руйнуванні перемички зрізанням, розривом або розрізанням. Причому розроблено безліч комбінацій і модифікацій способів, застосування яких викликано їх призначенням, конкретними умовами прокатного стану, типом стану, його сортаментом і т. інш. [19].

При цьому в залежності від способу реалізації процесу розділення, далеко не завжди вирішальними є енергосилові показники. У ряді випадків основним критерієм реалізації процесу розділення слід вважати геометричні розміри перемички, при яких гарантовано відбудеться її руйнування [19-24].

Процес поздовжнього розділення розкату неприводними дисковими ножами, як правило, здійснюється за рахунок наявності резервних сил тертя в осередку деформації прокатної кліті [286, 287].

Слід зазначити, що всі розглянуті вище методики розрахунку процесів розділення металу в тій чи іншій мірі можна вважати інженерними математичними моделями, яким поряд з відносною простотою, малою трудомісткістю і високою швидкістю властивий відносно обмежений діапазон їх ефективного використання.

Незважаючи на те, що в ряді розглянутих випадків в ході теоретичного аналізу використовували метод полів ліній ковзання [288], а також планування експерименту і подальший регресійний аналіз, в цілому, при розробці даних моделей має місце прийняття цілого ряду припущень. Особливо, таких як точкове усереднення показників механічних властивостей і умов зовнішнього тертя, апроксимація контактних дуг хордами і багато інших, які знижують ступінь достовірності отриманих результатів.

Крім того, явно недостатньою є інформативність про локальні характеристики НДС, кількісні оцінки основних показників якості готової металопродукції і цілого ряду інших техніко-економічних параметрів. У більшості випадків, наведені методики практично не дозволяють оцінити вплив форми інструменту (кут загострення різальної кромки, зміна форми твірної і т. інш.) на напружено-деформований стан і визначити характер формозміни матеріалу в зоні розділення. Оцінка ж впливу зазначених параметрів на величину сили і моменту, в більшості випадків, виконується наближено шляхом застосування емпіричних коефіцієнтів.

Використання методу полів ліній ковзання [19, 20, 282, 288] стосовно до математичного моделювання процесів розділення в прокатному виробництві, дає можливість двовимірного аналізу. Структура даного методу дозволяє в тій чи іншій мірі врахувати двовимірний характер механізмів формування напружень і деформацій, разом з тим їх використання робить необхідним одночасне прийняття ряду істотних припущень, пов'язаних зі спрощенням геометричних форм осередку деформації, а також з усередненням механічних властивостей і кількісних оцінок умов контактного тертя. Відповідно до цього найбільшого поширення метод полів ліній ковзання і його похідні знайшли застосування в аналізах процесу розрізання паралельними ножами [282] і прокатки-розділення [19, 20].

Все сказане вище, поряд з швидким зростанням можливостей сучасних обчислювальних засобів, являє собою основу для розвитку чисельних математичних моделей процесів обробки металів тиском взагалі і процесів розрізання металів на ножицях зокрема, в основу яких покладені методи теорії пружності і пластичності, а також питання механіки руйнування. Виходячи з постановки вирішуваних завдань і використовуваних структур, дані математичні моделі можуть бути розділені на двовимірні і тривимірні.

Найбільш строгими по постановці є тривимірні математичні моделі, засновані на використанні варіаційних методів [289-293], а також методів скінченних [294-298] або граничних [299-303] елементів. У стадії розвитку знаходяться метод скінченних об'ємів [304-308], бессітковий метод [309-312] і метод нейронних мереж [313-316]. Порівняльний аналіз даних методів виконаний авторами робіт [317-319].

Двовимірна і тривимірна інтерпретація методу скінченних елементів (МСЕ), останнім часом все більш широко використовується в моделюванні розділових операцій [320-339]. Такі моделі мають більш повну інформативність, але разом з тим, трудомісткість і великі витрати машинного часу, враховуючи ітераційний підхід до вирішення завдань формоутворення в цілому і процесу розділення зокрема. Приклади аналізу МСЕ процесів розрізання на ножицях і в штампах можна знайти в роботах [320-333], а стосовно прокатки-розділення – [334-339].

Таким чином, існують різні методи визначення енергосилових показників і показників якості розділових операцій в прокатному виробництві, які відрізняються ступенем достовірності і можливістю використання в кожному конкретному випадку.

Разом з тим, враховуючи ітераційний підхід до вирішення задач формоутворення в цілому і процесів розділення зокрема, кожна чисельна реалізація є досить трудомісткою і вимагає великих витрат машинного часу, особливо при використанні тривимірних методів аналізу [325,331].

З огляду на необхідність раціонального поєднання трудомісткості виконуваних досліджень і ступеня достовірності отримуваних результатів, математичне

моделювання напружено-деформованого і кінематичного стану металу при реалізації різних технологічних схем процесів розділення металу раціональніше здійснювати на основі чисельних рішень методом скінченних елементів [340].

В основі побудови моделей процесів розділення лежать рівняння рівноваги, які повинні виконуватися з урахуванням граничних умов, в тому числі контакту з інструментом і співвідношень, що враховують властивості і поведінку оброблюваного матеріалу. Поведінка матеріалу в процесі деформації описується відомими законами і співвідношеннями механіки суцільного середовища в цілому і теорії пластичної течії зокрема [291,325,326].

В якості рівняння рівноваги, з точки зору теорії пластичної течії, застосовують наступний варіаційний принцип [291]:

$$\int_V \sum \sigma_{ij} \cdot \delta \dot{\varepsilon}_{ij} dV = \int_S \sum F_i \cdot \delta v_i dS, \quad (1.42)$$

де σ_{ij} – тензор напружень;

$\delta \dot{\varepsilon}_{ij}$ – тензор приросту швидкостей деформацій;

dV – елементарний об'єм;

F_i – вектор зовнішніх сил, заданий на поверхні S ;

δv_i – вектор приросту швидкостей переміщень;

dS – елемент площі поверхні тіла.

Результати операцій розділення залежать від форми інструментів і їх руху, тому при моделюванні контактна модель повинна відповідати таким математичним умовами [325,326]:

$$\begin{aligned} g &\geq 0 \\ \tau_N &\leq 0 \\ \tau_N \cdot g &= 0 \end{aligned} \quad (1.43)$$

де g – величина зазору між інструментом і матеріалом;

τ_N – нормальне контактне напруження.

Тертя, як правило [325, 326], моделюється у вигляді поведінки, подібної до пружно-пластичного матеріалу, а пластичні властивості матеріалу враховують апроксимуючою кривою, близькою до істинної діаграми напруження-деформація, отриманої за результатами випробувань при розтягуванні [325]. Проте в роботі [325] зроблений акцент на те, що, зокрема, в процесі розрізання величина еквівалентної пластичної деформації може досягати значення 4, тоді як при розтягуванні тільки 0,2...0,4, тобто апроксимуюча функція може добре узгоджуватися з результатами експериментальних вимірів і давати значну похибку при екстраполяції. Крім того, необхідно враховувати швидкість деформації в зоні розділення [366,342].

Розрахунок вичерпання матеріалом здатності до пластичного деформування і настання початку руйнування, може здійснюватися різними способами, ґрунтуючись на законах механіки руйнування [325].

В методі скінченних елементів, весь об'єм тіла розбивають на скінченне число елементів і наближено вирішують рівняння рівноваги (1.41). При вирішенні задач пластичної течії, широко використовується, так зване, формулювання ALE (Arbitrary Lagrangian Eulerian) – довільне формулювання Лагранжа-Ейлера [321,325,326].

Стаціонарні процеси, подібні розрізанню гільйотинними або дисковими ножами, можуть розглядатися як задачі течії з поверхнями, що вступають в контакт з інструментами, вільними поверхнями, великими локальними деформаціями і в'язким руйнуванням. Сталий стан стаціонарного процесу може визначатися за допомогою продовження швидкоплинного обчислення, поки не буде досягнуто сталого стану [325]. Коли починають обчислення, то модельований об'єм досить близький до сталого стану і включає тріщину (рис. 1.35), при цьому можна уникнути спотворення сітки і досягти коректного описання вільних поверхонь [340]. Це означає, що обчислення геометрії сталого стану необхідно зробити для початкової сітки, коли точна форма вільних поверхонь і тріщини ще невідомі.

При вирішенні рівнянь в формулюванні ALE існують різні підходи, кожен з яких позначається на кінцевому результаті моделювання. Порівняльний аналіз даних підходів, з точки зору об'ємів і швидкості обчислень, виконаний в роботі [325] для моделювання процесів розрізання, проте порівняння кінцевих результатів не виконано. Таким чином складно оцінити ступінь впливу кожного з підходів на результати симуляції.

Отже перевага серед теоретичних методів аналізу процесів розділення належить чисельній реалізації методом скінченних елементів і полягає в можливості більш повної і, в той же час, досить диференційованої оцінки ступеня впливу різних факторів. При цьому з'являється можливість сприяти підвищенню ступеня наукової обґрунтованості прийнятих технічних рішень.

1.4 Перспективи розвитку технологій і обладнання розділових операцій в прокатному виробництві

В умовах сьогодення істотно підвищується значимість основних напрямків розвитку прокатного виробництва – розширення сортаменту і підвищення якості продукції при одночасному зниженні її собівартості.

Для досягнення зазначених цілей в прокатному виробництві широко впроваджуються різноманітні технологічні рішення, що базуються на більш раціональних схемах процесу прокатки, оптимізації технологічних режимів, а також підвищенні ступеня їх автоматичного контролю і регулювання. При цьому дуже важлива роль відведена операціям з розділення металопрокату, технологічні схеми яких, як зазначалося в підрозділі 1.1, дуже різноманітні і можуть бути реалізовані на різному обладнанні (див. підрозділ 1.2) в залежності від виду прокату, що розділяється, та умов його розділення, а також етапу технологічного ланцюга, на якому вона реалізується.

У комплексі прокатних станів і агрегатних ліній досить відповідальними машинами є ножиці, одні з найбільш складних машин за кінематикою та конструкцією.

Завдання розширення сортаменту і зниження собівартості, при одночасному задоволенні і підвищенні якості металопродукції, що розрізається на ножицях, переважно можна вирішити за рахунок комплексної реалізації наступних основних напрямків:

- вдосконалення конструкції різальних інструментів [55, 65, 73-77, 83, 84, 87, 90, 91, 102-104, 107, 108, 118, 126-131, 140, 172, 177, 181, 186, 188], спрямоване на зменшення сил розрізання, підвищення стійкості ножів, зниження вартості ножів і спрощення їх виготовлення, а також підвищення якості при розділенні металопрокату;

- оптимізація траєкторій руху різальних інструментів [48, 59, 63, 78, 79, 97, 106, 117, 119, 121, 189, 191, 193, 213, 215] з метою, підвищення продуктивності, зниження робочих навантажень, забезпечення якості розрізання і надання необхідних форм кромки,

- більш широке використання процесів гарячого розрізання [36-39, 80, 145, 182, 276, 283], що дозволяє, крім зниження робочих навантажень, використовувати тепло прокатного нагріву в наступних технологічних операціях;

- вдосконалення кінематики ножиць і зниження динамічних навантажень в їх роботі [173, 174, 202, 211], з огляду на те, що в більшості випадків ножиці працюють в режимі періодичних запусків і зупинок;

- розширення автоматизації обладнання і процесів розрізання на ножицях [66, 67, 93, 195, 199, 201].

Крім того, в залежності від місця встановлення ножиць в технологічному ланцюгу прокатного виробництва до них може бути висунутий ряд додаткових вимог, як то:

- підвищення швидкості виконання операції розділення [86, 92, 196, 198, 202, 210], з метою забезпечення необхідної пропускної спроможності ділянки розрізання і продуктивності стану в цілому;

- розширення технологічних можливостей і підвищення продуктивності [88, 95, 101, 105, 109, 111, 124, 134, 135, 151, 154-156, 163-166, 180, 185, 188, 203, 204,

206-208, 211, 212], особливо в умовах реконструкції станів і вдосконалення технології виробництва;

– підвищення якості розрізання або надання певної форми кромки після розрізання для виконання наступних технологічних операцій [46, 72, 133, 157-161, 176, 178, 183, 190, 209, 214] (наприклад, при встановленні ножиць барабанних лентючих між чорною і чистою групами клітей, передній кінець підкату після розрізання повинен мати опуклу шевронну форму, що необхідно для забезпечення сприятливих, з точки зору навантаження станів, умов захоплювання металу валками чистових клітей і зниження динамічних навантажень);

– поєднання кількох технологічних операцій [96, 112, 125, 141-145, 148-150, 170] (наприклад, обрізання бічної кромки листів і її дроблення на мірні довжини або розрізання на мірні довжини і пакетування).

Відносно аналізу питань вдосконалення обладнання для розрізання металопрокату, використовуваного в умовах сучасного прокатного виробництва, можна відзначити наступні тенденції:

– підвищення надійності ножиць і збільшення терміну їх служби [56, 57, 62, 94, 117, 123, 136, 137, 139, 146, 152, 153, 167, 171, 173-175, 177, 179, 182, 184, 186, 187, 197, 205], наприклад, за рахунок виключення з приводних ліній зазвичай встановлюваних зубчастих муфт, що мають значний бічний зазор в зачепленні, а в механізмах налаштування бічного зазору між ножами за рахунок встановлення пристроїв для вибирання люфтів;

– спрощення конструкції, зниження металоємності ножиць і їх вартості, що досягається за рахунок розробки нових конструкторських рішень і зниження динамічних навантажень [53, 54, 58, 64, 81, 82, 85, 98, 100, 110, 113-116, 121, 122, 132, 162], що базуються на підвищенні точності проектних розрахунків, а також шляхом більш широкого застосування гідроприводу супорта і інших механізмів в ножицях різних конструкцій, замість дорогого електромеханічного приводу [60, 61, 68-71, 89, 99, 119, 120, 216-218].

У той же час, як зазначалося в підрозділі 1.1, поряд з розділовими операціями металопрокату на ножицях, численні виробники стали в умовах прокатних ста-

нів використовують численні схеми і варіанти БПР [19-23] для вирішення різних задач спрямованих на розширення технологічних можливостей станів, зниження собівартості і забезпечення якості металопродукції. Перспективи подальшого розвитку даної технології і шляхи досягнення основних цілей в цьому напрямку детально наведені в роботах [19-23, 220, 227, 228-230, 232-235, 244, 250-255], а питання подальшого вдосконалення обладнання БПР докладно представлені в роботах [19-23, 219, 220, 223-226, 231, 232, 235-245, 246-249, 251-257].

Вочевидь, що резерви вдосконалення технологій розділових операцій прокатного виробництва і механічного обладнання, на якому реалізуються ці процеси, вичерпані далеко не повністю. При цьому для оцінки ефективності технологічних і конструктивних можливостей вже існуючого і проектного обладнання, доцільно використовувати комплексні підходи, що базуються на розробленні та дослідженні нових технологічних рішень, максимально можливого використанні систем і підсистем автоматизованого розрахунку проектно-конструкторських робіт, здатних підвищити техніко-економічні показники процесів і обладнання.

ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 1

1. В обробці металів тиском, як правило, застосовуються розділові операції без зняття стружки, що здійснюють розрізання металопрокату на окремому обладнанні або його розділення в процесі прокатки, і займають окрему нішу, оскільки в переважній більшості сприяють суттєвому зменшенню або відсутності втрат металу при реалізації процесів, мають високу пропускну здатність обладнання і високий ступінь механізації та автоматизації, а також дозволяють широко застосовувати процеси гарячого розділення, що сприяє зниженню робочих навантажень на обладнання, розширенню сортаменту оброблюваного металопрокату, а також зниженню витрат на термообробку за рахунок застосування тепла прокатного нагріву.

2. Технологічні схеми механічних розділових операцій на практиці вимагають використання різноманітного за принципом дії та кінематикою руху механіч-

ного обладнання, що вимагає узагальнення уявлень про процеси, котрі протікають в металі та розроблення, на їх основі, уніфікованих математичних моделей і методів аналізу, здатних враховувати вплив геометрії профілів, механічних властивостей матеріалу та змінних кінематичних умов в осередку розділення на енергосилові параметри та показники якості, що робить можливим вдосконалення діючих, а також розроблення, створення і промислове впровадження та освоєння нових високоефективних технологій і обладнання, за рахунок підвищення ступеня наукового обґрунтування при прийнятті технологічних і проектно-конструкторських рішень в індивідуальних умовах конкретного виробництва.

3. Відомі методи розрахунку розділових операцій, зокрема розрізання на ножицях, в сучасних умовах не здатні в повній мірі вирішувати задачі сучасного прокатного виробництва, що вимагає застосування методів математичного моделювання напружено-деформованого стану та основних показників якості на базі чисельних методів, зокрема методу скінченних елементів.

4. Максимально повний ступінь симуляції реальних процесів розділення можливий за умови коректного вибору типу скінченних елементів, застосування ефективних правил контролю і управління геометрією скінченних елементів в зоні розділення, застосування адекватної процедури формування та зростання тріщини, врахування впливу пружних характеристик ножиць, врахування термодинамічних ефектів в матеріалі під час розділення та врахування змінних кінематичних умов протікання процесу.

5. При вдосконаленні операцій розділення металопрокату основними слід вважати оптимізацію технологічних схем розділення і підвищення ефективності технологічних режимів спрямованих на розширення технологічних можливостей і зростання продуктивності, підвищення якості, а також розвиток обладнання та зростання його надійності й терміну служби, спрощення конструкції, зниження металоємності і собівартості стосовно до процесів розрізання на ножицях. Все це може бути досягнуто за рахунок розробки нових конструкторських рішень, що базуються на сучасних методах розрахунку і проектування, а також за рахунок

більш повного використання математичного моделювання та автоматизованого проектування при виконанні проектно-конструкторських робіт.

РОЗДІЛ 2

ВИБІР НАПРЯМКУ І МЕТОДІВ ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕХНОЛОГІЙ І ОБЛАДНАННЯ РОЗДІЛОВИХ ПРОЦЕСІВ ЛИСТОВОГО І СОРТОВОГО МЕТАЛОПРОКАТУ

2.1 Розширення сортаменту, підвищення якості та зниження собівартості готового металопрокату, як основний напрямок наукових досліджень в області розділових операцій в прокатному виробництві

Досягти максимально ефективних рішень в завданнях спрямованих на розширення сортаменту і підвищення якості готової продукції при одночасному зниженні її собівартості та економії матеріальних і енергетичних ресурсів представляється можливим тільки за рахунок комплексного підходу, що включає в себе:

- вдосконалення існуючих та розробку нових технологій, з мінімальними термінами їх впровадження і освоєння;
- пошук резервів на всіх етапах технологічного ланцюга з метою отримання максимально збалансованого виробничого процесу;
- впровадження нових високоефективних технологічних процесів і їх окремих операцій і обладнання.

Використання всебічного, комплексного підходу є необхідним при аналізі кожної операції розділення окремо, оскільки тільки одночасне врахування всіх початкових і результуючих параметрів, з урахуванням технологічної та конструктивної специфіки обладнання може дати узагальнену оцінку економічної ефективності конкретних технічних рішень і розроблених на їх основі рекомендацій.

Вочевидь, для реалізації комплексного підходу, стосовно процесів розділення можуть бути виконані наступні основні заходи:

- аналіз технологічних можливостей вже існуючого обладнання і розробка рекомендацій по діапазонах його найбільш ефективного використання;
- вдосконалення діючих технологій з метою розширення сортаменту при одночасному підвищенні якості вироблюваних операцій.

Все сказане вище вказує на необхідність виконання наступних дій:

- уточнити початкові дані і розширити уявлення про протікання процесів розділення, що дозволить виявити прихований потенціал в реалізації кожної окремо взятої розділової операції;
- розробити математичні моделі, на базі чисельних методів моделювання, котрі мають максимальний ступінь інформативності, що дозволить уточнити, розширити і вдосконалити методи розрахунку, а також буде сприяти збільшенню обсягів наданої інформації і підвищенню ступеня достовірності;
- розробити рекомендації спрямовані на вдосконалення технологій розділення стосовно до конкретного механічного обладнання;
- сформулювати і вирішити завдання з автоматизованого проектування технологічних режимів і механічного обладнання процесів розділення в прокатному виробництві.

Таким чином, вочевидь, що при дослідженні розділових операцій необхідний не тільки розвиток відповідних методів автоматизованого розрахунку і проектування, а й виконання комплексного техніко-економічного аналізу з одночасною розробкою і експериментальної оцінкою конкретних практичних рекомендацій. Все це, поряд з посиленням наукової аргументації і підвищенням ефективності процесів розділення дозволить скоротити терміни промислового освоєння при одночасному вельми істотному зниженні питомих капітальних витрат.

Перевага теоретичних методів аналізу дозволяє досліджувати нові і раніше маловивчені аспекти протікання процесів розділення за рахунок більш повної і диференційованої оцінки ступеня впливу різних факторів і їх сукупності, а також застосовувати різноманітні підходи при виявленні причинно-наслідкових зав'язків між початковими та вихідними параметрами процесу. При цьому максимально використовуються можливості сучасної обчислювальної техніки в сукуп-

ності з чисельними математичними моделями, в основу яких покладені методи теорії пружності і пластичності, а також питання механіки руйнування.

Незаперечним також є і той факт, що експериментальні дослідження процесів розділення в промислових умовах пов'язані з цілою низкою фінансових і організаційних витрат, тому експериментальні методи досліджень головним чином необхідні для уточнення початкових передумов і оцінки ступеня достовірності результатів теоретичного аналізу.

2.2 Вибір методів теоретичних досліджень процесів поперечного і поздовжнього розрізання листового і сортового металопрокату

Необхідну інформацію для проектування технологій і обладнання з розділення металопрокату найбільш доцільно отримувати методами математичного моделювання. При цьому необхідно розуміти, що математична модель будь-якого процесу або явища за своєю суттю завжди носить наближений характер і будь-яка спроба підвищити її точність, як правило, призводить до її ускладнення і збільшення часу обчислень.

Як було показано в підрозділі 1.3 в основу більшості теоретичних досліджень технологій і обладнання розділових операцій прокатного виробництва були покладені інженерні математичні моделі і методи статистичного аналізу, в ряді випадків були застосовані метод полів ліній ковзання і метод скінченних елементів [258-285]. Практична значимість останнього істотно зросла [294-298], завдяки підвищенню можливостей сучасної обчислювальної техніки і успішному розвитку його теоретичних основ, які дозволяють вирішувати різноманітні задачі, в тому числі такі, що базуються на методах теорії пружності і пластичності, а також механіки руйнування.

Загалом модельованому матеріалу надають властивості пружно-пластичного середовища, при цьому тіло в будь-який момент часу знаходиться в стані пластичної рівноваги і задача полягає у визначенні прирощень напружень і деформацій в будь-якій точці тіла. Метою рішення в даному випадку є визначення

швидкостей деформацій і напружень, як функцій координат і часу, за усім об'ємом досліджуваного тіла так, щоб виконувалося рівняння рівноваги. Математично цю умову можна представити в наступному вигляді [325,326]:

$$\begin{cases} \text{Знайти } \mathbf{v}(\mathbf{x},t) \text{ і } \boldsymbol{\sigma}(\mathbf{x},t) \quad \forall \mathbf{x}(t) \in V(t), \\ \boldsymbol{\sigma} \cdot \bar{\nabla} = 0. \end{cases} \quad (2.1)$$

Де t – час;

\mathbf{x} – поточні координати точок тіла;

$\boldsymbol{\sigma}$ – тензор поточних напружень;

\mathbf{v} – поточні швидкості точок тіла;

V – об'єм матеріалу, що деформується;

$\bar{\nabla}$ – градієнт.

При цьому повинні задовольнятися реологічні співвідношення.

Поверхню тіла, що деформується, за характером граничних умов можна розділити на три частини (рис. 2.1) таким чином, що [325,326]:

$$\begin{cases} S(t) = S_v(t) \cup S_T(t) \cup S_c(t), \\ S_v(t) \cap S_T(t) = \emptyset, \quad S_T(t) \cap S_c(t) = \emptyset, \quad S_v(t) \cap S_c(t) = \emptyset. \end{cases} \quad (2.2)$$

Для цих границь у момент часу t повинні задовольнятися наступні вимоги [325,326]:

$$\begin{cases} \mathbf{v} = \mathbf{v}_0 & \text{на } S_v(t); \\ \boldsymbol{\sigma} \cdot \mathbf{n} = \mathbf{T} & \text{на } S_T(t); \\ h(\mathbf{v}) \leq 0 & \text{на } S_c(t); \\ \boldsymbol{\tau} = \boldsymbol{\tau}_T & \text{на } S_c(t), \end{cases} \quad (2.3)$$

де \mathbf{v}_0 – вектор початкових швидкостей на поверхні;

\mathbf{T} – вектор початкового навантаження на поверхні;

$h(\mathbf{v})$ – функція, що описує умову взаємного непроникнення матеріалів інструменту та заготовки;

τ_T – дотичні напруження на поверхні контакту.

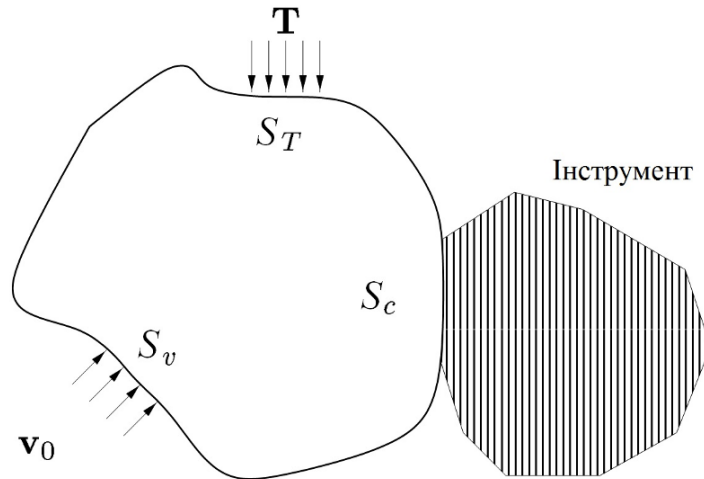


Рисунок 2.1 – Граничні умови [326]

Граничні умови на границях $S_v(t)$ і $S_T(t)$ є нормальними до поверхні, а на границі $S_c(t)$ накладають змішані граничні умови, оскільки одночасно виникають нормальні та дотичні до границі компоненти сил контактної взаємодії.

Рівняння (2.1)–(2.3) представляють собою строге аналітичне рішення задачі. Знайти аналітичне рішення в загальному випадку неможливо, тому для вирішення завдання слід користуватися чисельними методами. З метою ефективного реалізації комплексного підходу щодо розширення уявлень про процеси розділення на ножицях і, як наслідок, уточнення та розвитку методів розрахунку енергосилових параметрів і показників якості було обрано чисельне математичне моделювання на базі методу скінченних елементів [294-298].

Максимально повний ступінь відображення реальних процесів розділення на базі методу скінченних елементів може бути отриманий при дотриманні наступних умов:

- коректного вибору типу скінченних елементів;
- застосування ефективних правил контролю і управління геометрією скінченних елементів в зоні розділення;

- застосування адекватної процедури формування та зростання тріщини;
- врахування впливу пружних характеристик ножиць;
- врахування термодинамічних ефектів в матеріалі під час розділення;
- врахування змінних кінематичних умов протікання процесу.

Необхідність врахування специфіки процесів розділення і умов їх реалізації вимагає розвитку методик розрахунку і програмних засобів з автоматизованого проектування для більш повного і коректного визначення впливу сукупності всіх чинників, що мають місце за технологічних умов реалізації процесів.

В МСЕ вводяться допущення, що всі прирощення нескінченно малі, тому всі визначальні рівняння можуть бути лінеаризовані. Таким чином тіло можна розбити на безліч елементів скінченних розмірів і розглядати як сукупність скінченних елементів.

Завдяки варіаційному формулюванню, коли функціонал формозміни досягає мінімального значення [291], а теоретичною основою умови рівноваги є принцип мінімуму віртуальної роботи, стан границі матеріалу залежить від функції $\delta \mathbf{v}$, яка є кінематично можливим віртуальним полем швидкостей і інтегрується за усім об'ємом тіла [325,326]:

$$\int_V (\delta \mathbf{v} \bar{\nabla}) : \boldsymbol{\sigma} dV = \int_{S_c} \delta \mathbf{v} \cdot \boldsymbol{\tau}_T dS + \int_{S_r} \delta \mathbf{v} \cdot \mathbf{T} dS, \quad \forall \delta \mathbf{v} \in \delta \mathcal{V}_c(t). \quad (2.4)$$

Ця умова рівноваги (2.4) може також інтерпретуватися як рівняння віртуальної роботи [325]:

$$\delta W_{in} = \delta W_{ext}. \quad (2.5)$$

де δW_{in} – внутрішня віртуальна робота;

δW_{ext} – зовнішня віртуальна робота.

В методі скінченних елементів дискретизація досліджуваної області здійснюється шляхом її розбиття на скінченне число елементів. Число і тип використо-

вуваних скінченних елементів визначаються специфікою розв'язуваної задачі і застосовуваними підходами. Вибір типу скінченних елементів є важливим кроком, оскільки помітно впливає на точність і ефективність розрахунку. Стосовно до вирішення широкого кола задач обробки матеріалів тиском застосовують скінченні елементи, що моделюють поведінку суцільного деформованого середовища [296].

Даний підхід дозволяє істотно розширити урахування числа факторів, що впливають на енергосилові показники процесу розділення і мінімізувати використання коефіцієнтів запасу, величина і застосування яких далеко не завжди є достатньо аргументованими і обґрунтованими.

Нестационарні задачі формозміни, що моделюються МСЕ, як правило, вирішують із застосуванням формулювання Лагранжа, яке дозволяє досить легко контролювати історію деформування матеріалу. Однак, при моделюванні процесів розділення металопрокату (особливо в гарячому стані) мають місце великі пластичні деформації в локальних об'ємах матеріалу, що може призводити до значного спотворення і виродження сітки (рис. 2.2) [296,325,326].

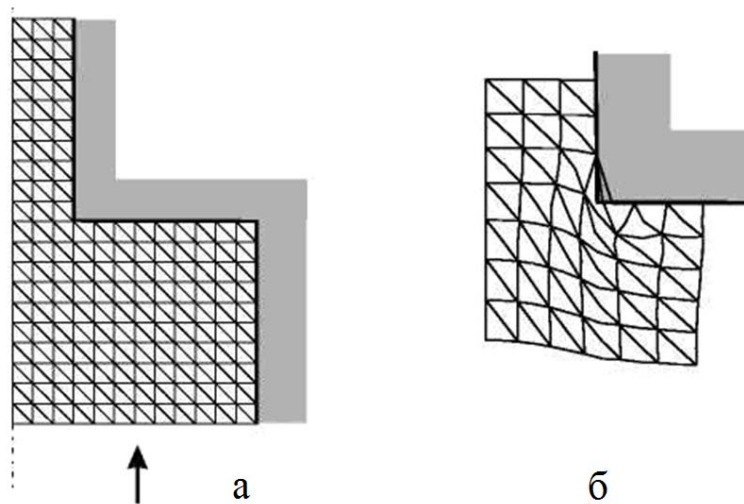


Рисунок 2.2 – Моделювання екструзії з використанням формулювання Лагранжа: а – початкова сітка; б – спотворення сітки в зоні великих пластичних деформацій [296]

В такому випадку єдиним виходом є перестроювання скінченно-елементної сітки заготовки кожен раз, коли вона зазнає такого роду спотворення. Для того

щоб зберегти історію деформування матеріалу, при побудові нової сітки необхідно здійснити перенесення інформації про змінні стану, що веде до зростання похибки обчислень. У зв'язку з цим, при вирішенні задач процесів розділення, як правило, було використане формулювання Лагранжа-Ейлера [296,325] в якому забезпечується можливість безперервної перебудови (адаптації) сітки (рис. 2.3).

Процес руйнування металу розглядався як в'язке руйнування – необоротне порушення суцільності металу, що супроводжується помітною пластичною деформацією і значними витратами енергії, при якому відбувається розділення деформованого твердого тіла на частини внаслідок поширення в тілі макроскопічних тріщин. При цьому в матеріалі спостерігається накопичення пошкоджень – порушення пластичної рівноваги, обумовлене розпушенням матеріалу, яке веде до локалізації деформації і подальшого руйнування [296,325].

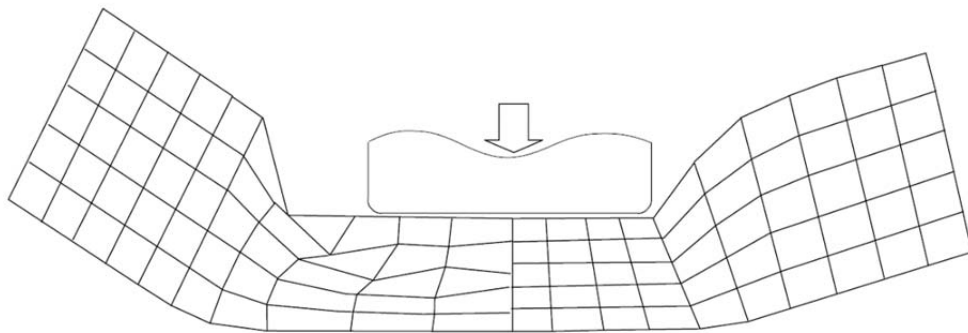


Рисунок 2.3 – Моделювання процесу осадження заготовки за умови використання: ліворуч – стандартного формулювання Лагранжа; праворуч – формулювання Лагранжа-Ейлера [325]

Для оцінки настання руйнування була використана функція пошкоджуваності, яка є інтегралом функції напруження та шляху деформування, а руйнування починається, коли пошкоджуваність досягає критичного рівня [296,325]. Поведінка функції пошкоджуваності визначається законом розвитку втрати ступеня міцності матеріалу в процесі деформування і може мати різний характер.

Модель руйнування базувалася на критерії пластичності, котрий є феноменологічною моделлю для прогнозування початку пошкодження матеріалу внаслідок зародження, зростання і злиття пустот.

Модель передбачає, що еквівалентна пластична деформація на початку пошкодження є функцією показника трьохосного напруженого стану і швидкості деформації [325,326]:

$$\bar{\varepsilon}_D^{pl} = f(\eta, \dot{\varepsilon}^{pl}), \quad (2.6)$$

де η – показник трьохосного напруженого стану;

$\dot{\varepsilon}^{pl}$ – еквівалентна швидкість пластичної деформації.

Показник трьохосного напруженого стану визначається, як [325,326]:

$$\eta = \frac{-p}{q}, \quad (2.7)$$

p – гідростатичний тиск;

q – інтенсивність напружень по Мізесу.

Ініціювання критерію початку ушкоджень в матеріалі відбувається, коли виконується умова [327]:

$$\omega_D = \int \frac{d\bar{\varepsilon}^{pl}}{\bar{\varepsilon}_D^{pl}} = 1, \quad (2.8)$$

де ω_D – змінна стану, котра монотонно зростає зі збільшенням пластичної деформації.

При кожному збільшенні приросту часу аналізу приріст змінної стану ω_D визначається як [327]:

$$\Delta\omega_D = \frac{\Delta\bar{\varepsilon}^{pl}}{\bar{\varepsilon}_D^{pl}} \geq 0. \quad (2.9)$$

На рис. 2.4 продемонстровано в порівнянні характерну поведінку в ході деформації матеріалу з ізотропним зміцненням без пошкоджень та при наявності пошкоджень [327]. В контексті пружного матеріалу з ізотропним зміцненням пошкодження проявляються в зниженні границі текучості і пружності. Суцільна крива представляє криву текучості матеріалу з урахуванням накопичення пошкоджень в ході деформації, тоді як пунктирна крива їх не враховує. Тож можна бачити, що до певного значення еквівалентної пластичної деформації $\bar{\varepsilon}_0^{pl}$ модуль пружності матеріалу E залишається незмінним, а пошкодження в матеріалі відсутні ($D = 0$). При подальшому збільшенні еквівалентної пластичної деформації в матеріалі накопичуються ушкодження до настання повного руйнування при $\bar{\varepsilon}_f^{pl}$, коли сумарне значення пошкоджень сягає $D = 1$.

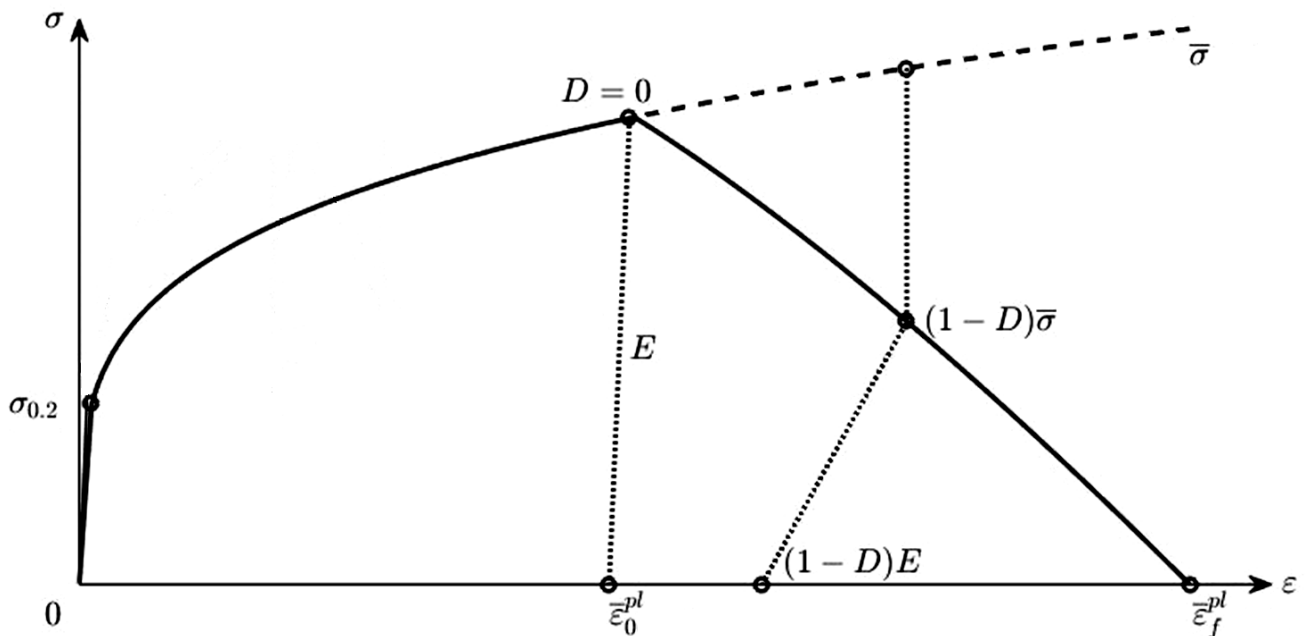


Рисунок 2.4 – Крива деформації матеріалу [327] з ізотропним зміцненням без пошкоджень (---) та при наявності пошкоджень (—)

Еквівалентна пластична деформація руйнування $\bar{\varepsilon}_f^{pl}$ для пластичних матеріалів може бути визначена з діаграми пластичності (рис. 2.5) в залежності від показника напруженого стану та швидкості пластичної деформації.

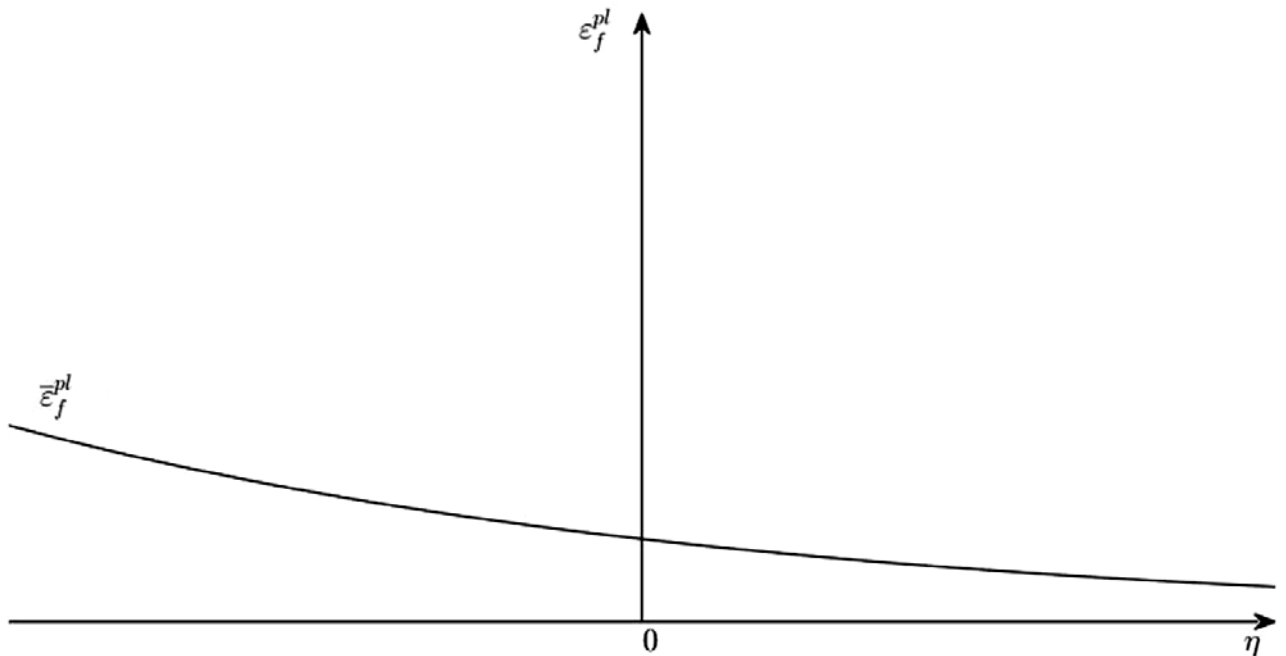


Рисунок 2.5 – Діаграма пластичності матеріалу [325]

Проте цей показник є інтегральним, оскільки в експериментах визначається для всього зруйнованого перерізу, хоча в локальних об'ємах мають місце як більші так і менші значення пластичної деформації. Насамперед, це пояснюється тим, що ці локальні об'єми руйнуються не одночасно і мають в ці моменти дещо різні показники напруженого стану. Проте визначити їх експериментально не представляється можливим і за результат беруть узагальнені значення.

Саме такий підхід стосовно скінченних елементів запропонував Хіллерборг (Hillerborg) [327]. В основі даного підходу, використовується концепція крихкого руйнування, що визначає енергію, необхідну для відкриття одиначної області тріщини, як параметр матеріалу. При такому підході втрата міцності після виникнення пошкоджень характеризується зниженням напруження. Тобто при досягненні інтегрального показника еквівалентної пластичної деформації величини, котра відповідає граничному значенню при якому настає руйнування $\bar{\varepsilon}_f^{pl}$, раху-

ється, що в даному скінченному елементі починають накопичуватися пошкодження, котрі зменшують напруження.

Таким чином, очевидно, що пластична деформація руйнування $\bar{\varepsilon}_f^{pl}$ буде різною для скінченних елементів різного розміру і тому не може використовуватися в якості параметра матеріалу для специфікації закону розвитку пошкоджень в матеріалі.

Підхід Хіллеборга дозволяє закон розвитку пошкоджень в матеріалі визначити у вигляді еквівалентного пластичного переміщення \bar{u}^{pl} або розсіювання енергії руйнування G_f , що зводить до мінімуму залежність результатів від параметрів сітки.

Реалізація цієї концепції в МСЕ вимагає визначення характеристичної довжини L , пов'язаної з точкою інтегрування. Енергія руйнування тоді визначається як [327]:

$$G_f = \int_{\bar{\varepsilon}_0^{pl}}^{\bar{\varepsilon}_f^{pl}} L \bar{\sigma} d\bar{\varepsilon}^{pl} = \int_0^{\bar{u}_f^{pl}} \bar{\sigma} d\bar{u}^{pl}, \quad (2.10)$$

де \bar{u}_f^{pl} – еквівалентне пластичне переміщення, при якому відбувається повне руйнування.

Рівняння (2.10) вводить визначення еквівалентного пластичного переміщення \bar{u}^{pl} , оскільки робота руйнування пов'язана з межею текучості після ініціації пошкоджень (робота на одиницю площі тріщини). При цьому до моменту початку пошкодження $\dot{\bar{u}}^{pl} = 0$, після початку пошкодження $\dot{\bar{u}}^{pl} = L \dot{\bar{\varepsilon}}^{pl}$ або $d\bar{u}^{pl} = L d\bar{\varepsilon}^{pl}$ [327].

Визначення характеристичної довжини залежить від геометрії і формулювання елемента. Загалом типова довжина є лінія поперек елемента для елементів першого порядку і половина тієї ж типової довжини для елементів другого порядку. Визначення характеристичної довжини використовується тому, що напрямок, в якому відбувається руйнування, заздалегідь невідомий [327]. Отже, елементи з

великими пропорціями матимуть досить різну поведінку в залежності від напрямку, в якому вони розтріскуються: через цей ефект зберігається деяка чутливість сітки, і рекомендуються елементи, які мають пропорції, близькі до одиниці.

Також важливим при моделюванні МСЕ процесів розділення є вибір моделі накопичення пошкоджень, що впливає на залежність сили розрізання [347].

Функція пошкоджуваності D є інтегралом функції напруження та шляху деформування, а руйнування починається, коли рівень пошкоджуваності досягає критичного рівня D_f [327].

Поведінка функції пошкоджуваності визначається законом розвитку втрати міцності матеріалом в процесі деформування і може мати різний характер.

Накопичення пошкоджуваності засноване на ефективному пластичному переміщенні використовуване в Abaqus, представляє залежність критерію початку в'язкого руйнування d від ефективного пластичного переміщення \bar{u}^{pl} [327]:

$$d = \begin{cases} \left(1 - e^{-\alpha(\bar{u}^{pl}/\bar{u}_f^{pl})}\right) / (1 - e^{-\alpha}), & \text{якщо } \alpha \neq 0; \\ \bar{u}^{pl} / \bar{u}_f^{pl}, & \text{якщо } \alpha = 0, \end{cases} \quad (2.11)$$

де α – показник закону накопичення пошкоджуваності.

Руйнування матеріалу моделювалося шляхом виключення елементів з розрахунку, після вичерпання ресурсу пластичності [296,325].

При визначенні механічних властивостей модельованих матеріалів в гарячому стані спирались на відому методику Андреюка-Тюленєва [343].

При холодному розділенні металопрокату механічні властивості матеріалу, визначали із застосуванням апроксимації Надаї, за результатами експериментальних даних роботи [341], де запропоновано алгоритм розрахунку констант та показників зміцнення для конструкційних матеріалів при статичних випробуваннях.

При вирішенні термодинамічних задач, що враховують деформаційний нагрів в осередку деформації і руйнування, будувалося поле розподілу початкових

температур, а механічні властивості матеріалу задавали з урахуванням зміни в залежності від температури металу.

В основу контактної взаємодії було покладено закон тертя Амонтона-Кулона, як відношення напруження тертя (дотичного) до зовнішнього контактного тиску між контактуючими тілами, аналогічно з процесами прокатки на основі відомих степеневих аналітичних представлень стосовно сталого стану [5].

З огляду на специфіку процесів розділення при розробці моделей МСЕ застосовувався дво- і тривимірний підходи. Двовимірний підхід був використаний при моделюванні процесу розрізання паралельними ножами, оскільки стосовно до даних умов напружено-деформований стан металу можна вважати близьким до умов плоскої деформації. При моделюванні всіх інших розділових операцій був застосований тривимірний підхід, оскільки будь-яка двовимірна інтерпретація вносить істотну частку похибки в результати моделювання. Для спрощення тривимірних моделей і скорочення обсягів обчислення, при наявності площини симетрії, до розгляду брали тільки одну симетричну її частину.

З метою отримання більш зручних для практичного використання математичних моделей у вигляді рівнянь регресії при моделюванні процесів розділення МСЕ використовувалися методи планування експерименту [349].

На основі методів статистичної обробки теоретичних експериментів і експериментальних даних були отримані залежності з визначення механічних властивостей матеріалів стосовно процесів розділення.

Оцінка адекватності розроблених математичних моделей проводилася з використанням методів кореляційного і регресійного аналізу [349].

Статистична обробка отриманих експериментальних даних здійснювалася з використанням прикладної програми STATISTICA [350].

Отримані математичні моделі і результати їх чисельної реалізації були використані при розробці конкретних практичних рекомендацій і технічних рішень, а також при створенні технологій та обладнання процесів розділення в умовах прокатного виробництва.

2.3 Вибір методів експериментальних досліджень процесів поперечного і поздовжнього розрізання листового і сортового металопрокату

Основною метою проведення експериментальних досліджень було підтвердження адекватності та достовірності розроблених математичних моделей та розширення практичної інформації для обґрунтування кількісних показників, при розробці математичних моделей. Переважно експериментальні дослідження процесів розділення металопрокату проводилися на лабораторному обладнанні.

З огляду на можливий вплив на процеси розділення металу конструктивних і швидкісних характеристик ножиць, при експериментальних дослідженнях однакових процесів розділення використовували різні конструкції ножиць. Зокрема процес поперечного розрізання, досліджувався на трьох конструкціях ножиць з різними характеристиками.

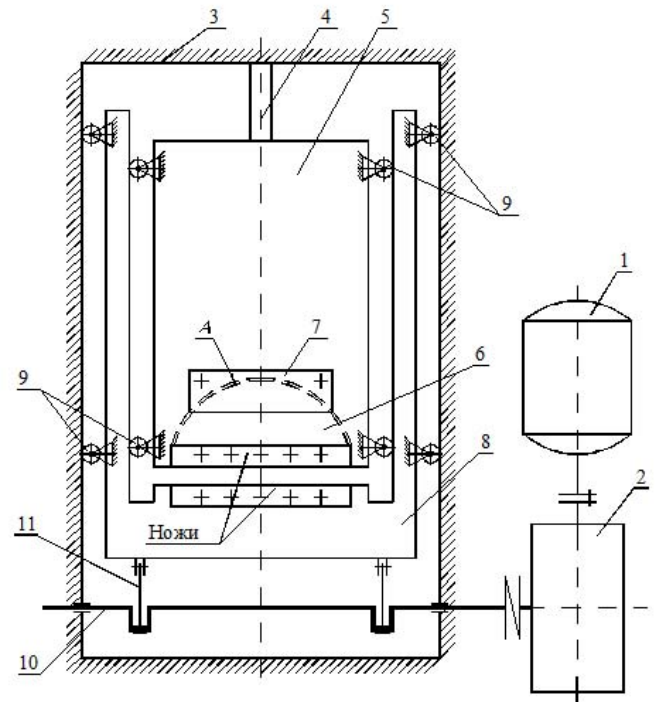
Так, при вивченні процесів поперечного розділення листового і сортового металопрокату із застосуванням ножів різних конфігурацій, використовували кривошипно-шатунні з паралельним розташуванням супортів лабораторні ножиці кафедри «Машини металургійного комплексу» Донбаського державного технічного університету (м. Алчевськ, Україна).

Ножиці розраховані на максимальну силу розрізання 200 кН. Максимальний хід нижнього ножа становить 35 мм. При роботі ножиць нижній супорт здійснює зворотно-поступальний рух, а верхній залишається нерухомим. При цьому допускається розрізання сталевих смуг шириною до 200 мм. Загальний вигляд лабораторних кривошипно-шатунних ножиць і їх конструкція представлені на рис. 2.6.

При реалізації процесу розрізання паралельними ножами встановлення ножів в супорти здійснювалося паралельно, а для розрізання гільйотинним ножем, здійснювався поворот верхнього (нерухомого) ножа в супорті, з метою зміни кута його нахилу. Дана конструкція ножиць передбачає можливість дискретно змінювати кут нахилу з кроком 3° в інтервалі від 0° до 9° .



а)



б)

Рисунок 2.6 – Загальний вигляд кривошипно-шатунних з паралельним розташуванням супортів лабораторних ножиць (а) і їх конструкційна схема (б)

Під час дослідження процесів розділення фасонних профілів в супорти ножиць встановлювали відповідні профільовані ножі (рис. 2.7).

Як випливає з конструкції ножиць (див. рис. 2.6, б) привод здійснюється від електродвигуна 1 типу МА-203-2-6 ($N = 18 \text{ кВт}$, $n = 960 \text{ хв}^{-1}$) через одноступінчастий черв'ячний редуктор 2 з глободним черв'яком ($u = 59$).

Механізм різання ножиць змонтований на рамі 3, яка сприймає силу розрізання через месдозу 4 від верхнього нерухомого супорта 5. В супорті фіксується зубчастий сектор 6 з укріпленим в ньому ножем. Кут нахилу ножа змінюється шляхом повороту зубчастого сектора. Контакт сектора 6 з верхнім супортом 5 здійснюється по поверхні А зубчастої обойми, котра виконана по сегменту кола.

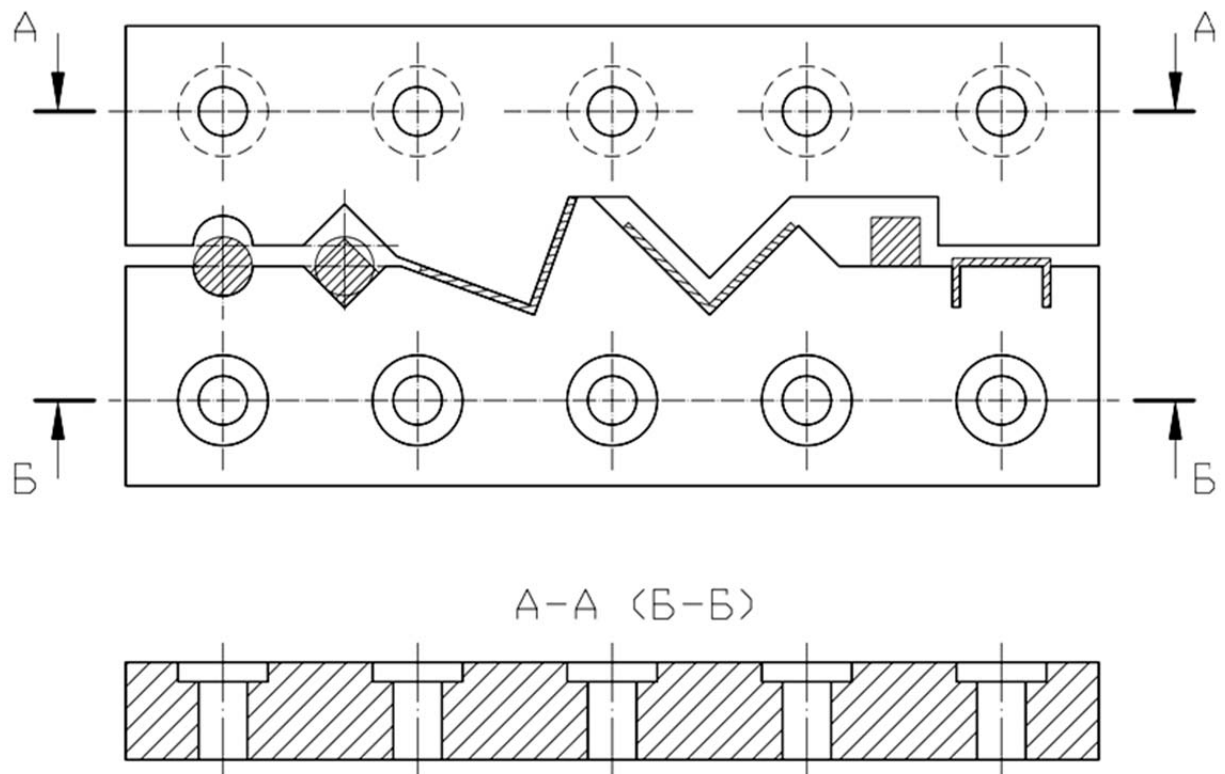


Рисунок 2.7 – Схема профільованих ножів для кривошипно-шатуних лабораторних ножиць при дослідженні процесів розділення фасонних профілів

Зубчасте зачеплення сектора і обойми забезпечує фіксацію кута нахилу ножа і запобігає повороту сектора в процесі роботи. Після встановлення сектора в обойму здійснюється фіксація сектора в супорті за допомогою планки 7 і болтів.

Переміщення нижнього супорта 8 здійснюється в напрямних пазах рами 3 і верхнього супорта 5 за допомогою підшипників 9, що виконують функцію роликів, оскільки зовнішні кільця підшипників перекочуються по напрямних пазах, що обумовлено мінімізацією втрат енергії на тертя.

Зворотно-поступальний рух нижнього супорта надається від черв'ячного редуктора 2 за допомогою ексцентрикового валу 10 ($e = 25 \text{ мм}$) через шатуни 11.

Для контролю основних силових параметрів, була використана вимірювальна система, структурна схема якої показана на рис. 2.8, а її технічні характеристики наведені в табл. 2.1.

Таблиця 2.1 – Технічна характеристика вимірювальної системи лабораторної установки кривошипно-шатунних ножиць

Найменування	Характеристика
Комп'ютер	IBM – сумісний
Розрядність процесора	32
Операційна система	MS DOS
Аналого-цифровий перетворювач (АЦП)	плата L-154A фірми L-CARD
Використовуване програмне забезпечення для АЦП	програма OSCILOSCOPE фірми L-CARD
Максимальна кількість каналів АЦП	16 диференційованих або 32 з загальною землею
Кількість використаних в експерименті каналів АЦП	2 з загальною землею (месдоза і реохорд)
Розрядність АЦП	12 біт
Максимальна частота перетворення електричних сигналів АЦП	70 кГц.
Використовувана частота перетворення АЦП	200 Гц.
Кількість і тип використовуваних підсилювачів	1 підсилювач «Топаз – 3» з загальним контуром заземлення
Кількість каналів в одному підсилювачі	10
Загальна кількість тензорезисторних перетворювачів	1
Схема включення тензорезисторних перетворювачів	мостова
Живлення вимірювального моста	постійне напруження 4,5 В
Використовувані тензодатчики	дротові, 100 Ом
Використовувана схема включення	міст
Датчик переміщення	реохорд, включений в схему

Вимірювальна система складається з тензорезисторних перетворювачів, одного десятиканального підсилювача «Топаз-3», який включений в ланцюг регульованого блоку живлення і IBM сумісного комп'ютера з встановленою на його шині платою L-154A, дванадцятирозрядного багатоканального аналого-цифрового перетворювача (АЦП) фірми L-CARD .

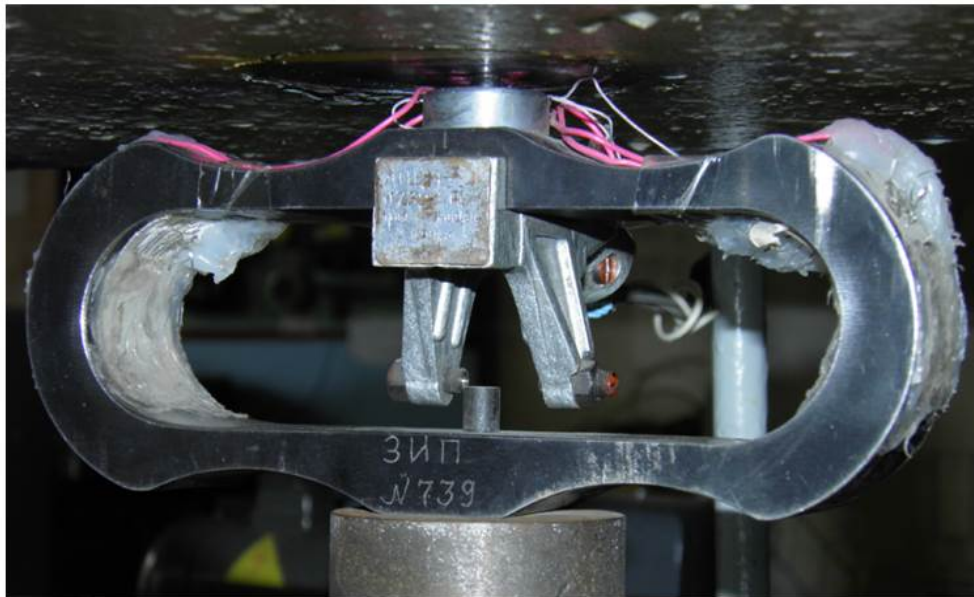
За допомогою тензорезисторних перетворювачів, здійснювали вимірювання сили розрізання. Для цього чотири дротяних тензодатчика опором 100 Ом, з'єднані по мостовій схемі, закріплювали на месдозі кільцевого типу (рис. 2.9, а). Центрування месدوزи уздовж лінії дії сили розрізання було забезпечене за рахунок встановлення між контактними поверхнями рами і месдоза кульового елемента.

Тарування месدوزи (рис. 2.9, б) здійснювали за зразковому динамометрі, шляхом її послідовного встановлення в силовий ланцюг з кульовим елементом поміж контактних поверхонь и подальшим спільним навантаженням.

В якості перетворювача переміщення застосовувався реохорд (рис. 2.9, в), в ланцюг котрого були включені 4 дротяні тензодатчики опором 100 Ом, з'єднаних по мостовій схемі. Включення в ланцюг тензодатчиків застосовувалося задля збільшення вихідного сигналу, що сприймається АЦП.

Тарування реохорда здійснювали шляхом паралельного контролю зміщення нижнього рухливого супорта відносно верхнього нерухомого супорта. Контроль здійснювали за допомогою закріпленої на верхньому супорті вимірювальної шкали і покажчика, що переміщається разом з ніжнім супортом. З метою забезпечення необхідної точності вимірювань, приведення в рух нижнього супорта виконували вручну від муфти, що встановлена на валу двигуна.

Підсилювач під час роботи з тензодатчиками забезпечує їх живлення стабілізованою постійною напругою, робить їх балансування і тарування вимірювального тракту за методом «масштабних опорів». Крім того, гарантується можливість компенсації перед виміром дрейфу нуля підсилювача і перешкод термоелектричного і гальванічного походження.



а



б



в

Рисунок 2.9 – Месдоза кільцевого типу, встановлена в ножицях (а), тарування месдози (б) і датчик переміщення встановлений в ножицях (в)

Електричний сигнал, який представляє собою напругу постійного струму, що виникає при розбалансуванні вимірювальних мостів, по екранованих кабелях надходить на вхідні канали підсилювача. Потім електричний сигнал подається на вхід АЦП, де перетворюється в 12-ти розрядні двійкові числові коди. Подальша обробка цифрової інформації виконується ЕОМ в реальному масштабі часу за допомогою прикладної програми OSCIL.EXE фірми L-CARD, що поставляється в комплекті з АЦП. В ході експериментальних досліджень процесів поперечного розділення листового металопрокату при низьких швидкостях розрізання використовували лабораторну установку прес-ножиць в умовах кафедри «Механіки та пластичного формування» Донбаської державної машинобудівної академії (м. Краматорськ, Україна).

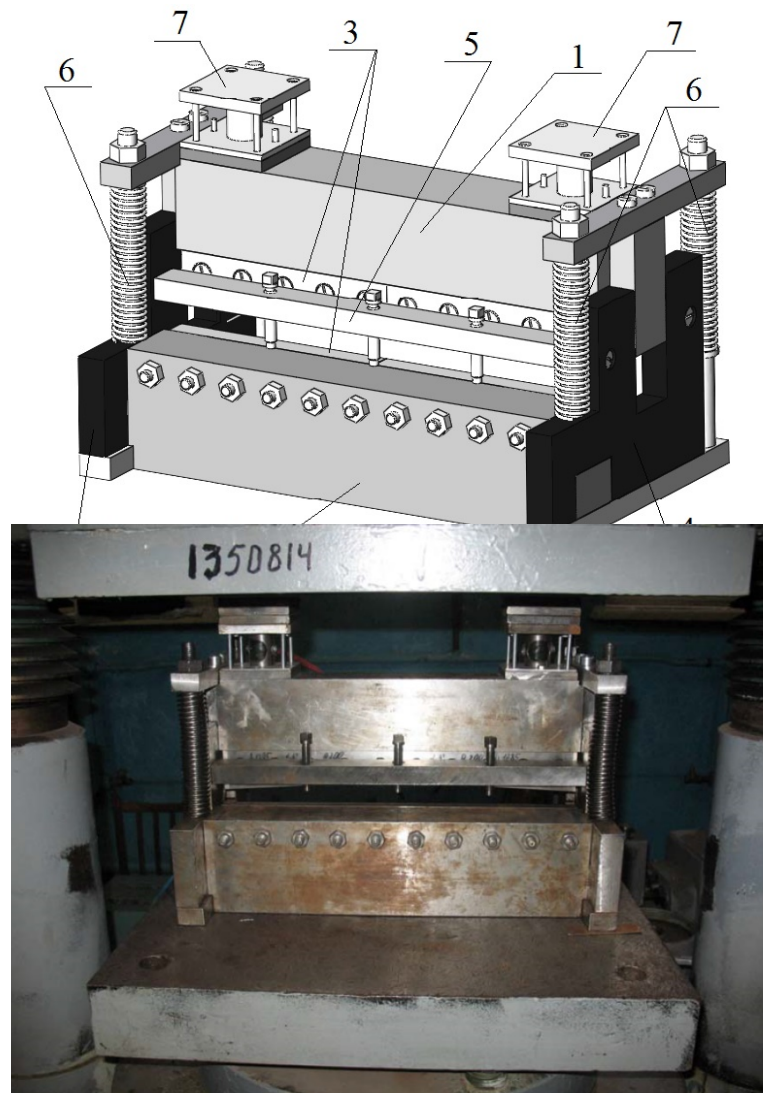
Конструкція прес-ножиць і їх розташування на пресі в умовах лабораторії представлені на рис. 2.10.

Конструкція прес-ножиць (рис.2.10,а) складається з верхнього рухливого 1 і нижнього нерухомого супорта 2 в які встановлювали і кріпили ножі 3 конструкції, відповідної до цілей експерименту. Напрямок руху верхнього супорта забезпечують дві напрямні стойки 4. Притиск листа в процесі розрізання здійснює притискний пристрій 5, який включає в себе поперечну планку з трьома гвинтами.

З метою утримання ножів (супортів) в розведеному початковому положенні в конструкції прес-ножиць передбачені чотири пружини 6, крім того дані пружини забезпечують повернення верхнього супорта з ножем у вихідне (крайне верхнє) положення після завершення операції розрізання.

Для контролю сили розрізання в конструкцію ножиць включені дві симетрично розташовані месдозы стиснення 7. Для реалізації процесу розрізання, прес-ножиці встановлювали на гідравлічний прес з максимальною силою 5 МН і швидкістю руху нижньої плити 0,6 мм/с, встановлений в лабораторії тієї ж кафедри.

В ході реалізації процесу розрізання, нижня плита пресу рухається вгору і верхній супорт після встановлення контакту між верхньою плитою і месдозами, закріпленими на верхньому супорті, приводився в рух. При цьому контролювали силу розрізання і зближення верхнього і нижнього супортів.

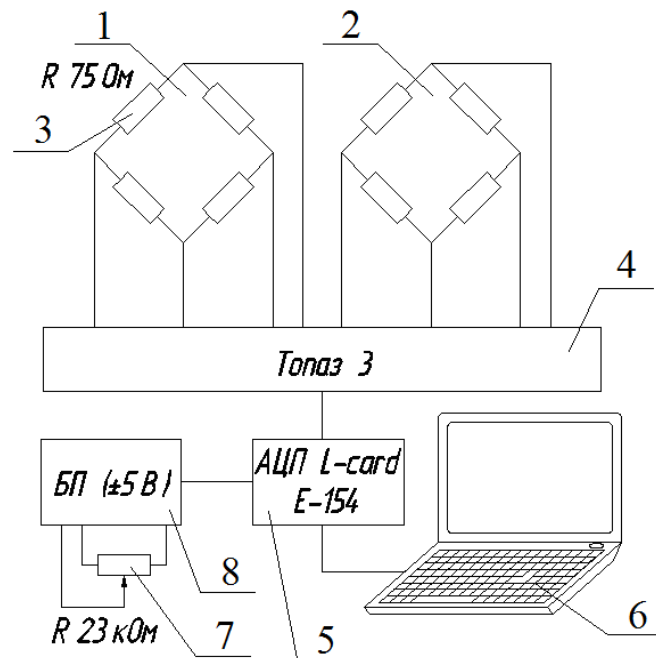


а

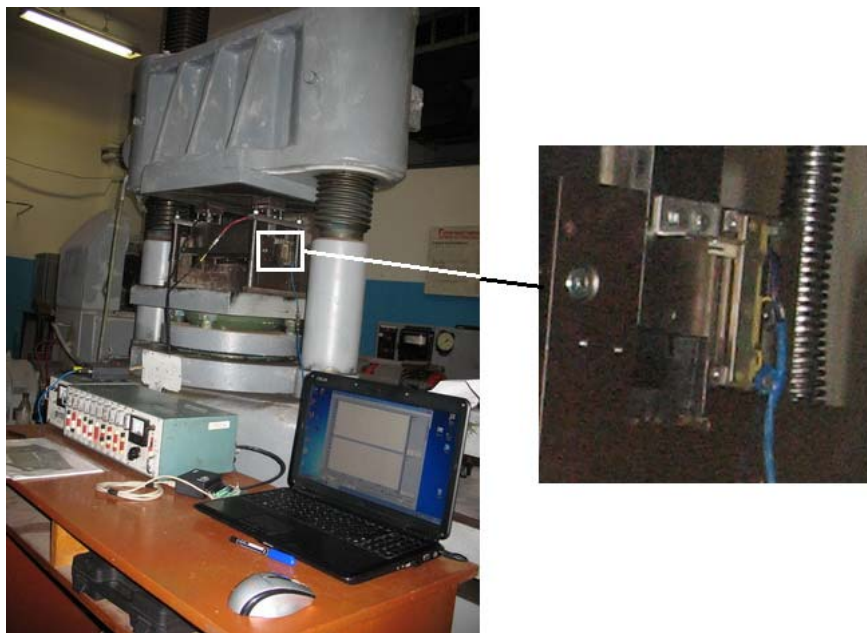
б

Рисунок 2.10 – Конструкція (а) прес-ножиць і їх розташування на пресі (б) в умовах кафедри «Механіки та пластичного формування» Донбаської державної машинобудівної академії

Вимірювальна система даної лабораторної установки представлена на рис. 2.11. В електричну схему, даної вимірювальної системи (рис. 2.11, а), включені дві месدوزи стиснення 1 і 2 з граничним навантаженням кожної 200 кН. Тензорезисторні перетворювачі 3, призначені для вимірювання сили розривання й розташовані на месдозах, являють собою тензодатчики з номінальним опором $R = 75 \text{ Ом}$.



а



б

Рисунок 2.11 – Узагальнена електрична схема (а) і загальний вигляд (б) вимірювальної системи лабораторних прес-ножиць (збільшено показана установка датчика переміщення)

Сигнал з мостових схем надходив на тензометричний підсилювач 4 (Топаз-3), з наступною обробкою аналого-цифровим перетворювачем 5 (фірми L-card, модель E-154) та введенням в ЕОМ 6 з використанням штатного програмного забезпечення.

Контроль зближення верхнього і нижнього супортів при розрізанні здійснювали за допомогою установки відповідного датчика (рис. 2.11, б), побудованого на базі змінного резистора 7 пересувного типу з максимальним опором $R = 23$ кОм. В основу датчика переміщення був покладений принцип подільника напруги з незалежним живленням від додаткового джерела напруги 8.

Тарування використовуваних месдоз здійснювали із застосуванням, в якості зразкового, гідравлічного преса кафедри «Механіки та пластичного формування» Донбаської державної машинобудівної академії, з максимальною силою 500 кН, який може працювати в двох режимах 200 і 500 кН.

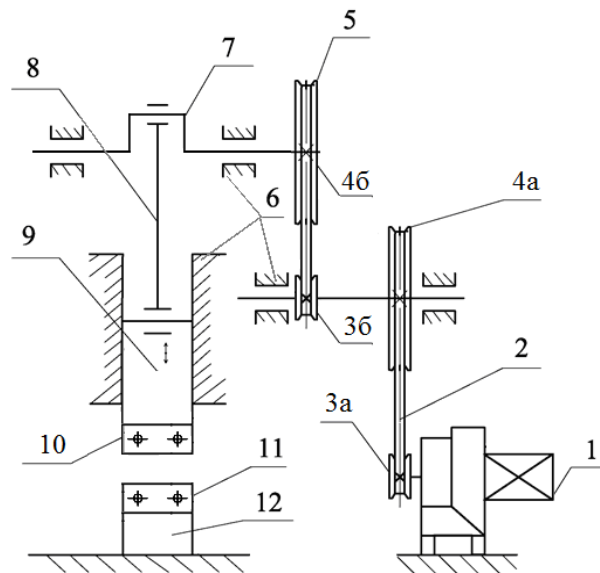
Експериментальні дослідження з визначення опору розрізання паралельними ножами в холодному стані здійснювали на лабораторній установці кафедри «Автоматизовані металургійні машини та обладнання» Донбаської державної машинобудівної академії (м. Краматорськ, Україна).

Загальний вигляд даної експериментальної установки в ході проведення тарування та її принципова кінематична схема представлені на рис. 2.12.

Різальний механізм експериментальної установки приводиться в дію від електродвигуна 1 типу А41-6 потужністю 1 кВт і частотою обертання 930 об/хв через дві пасові передачі 2 і 5 та ексцентриковий вал 7. Тяговий шків 3а пасової передачі 2 розміщений безпосередньо на валу електродвигуна 1, а ведений шків 4а – на одному валу з тяговим шківом 3б пасової передачі 5 від якого обертання передається на ведений шків 4б, розташований на консолі ексцентрикового валу 7, розміщеного в корпусі 6 установки ножиць. Ексцентриковий вал 7 за допомогою шатуна 8 шарнірно пов'язаний з верхнім рухливим супортом 9, котрий здійснює зворотно-поступальне вертикальне переміщення в напрямних вузла станин 6.



а



б

Рисунок 2.12 – Загальний вигляд в ході тарування (а) і конструктивна схема (б) експериментальної установки ножиць з паралельними ножами ДДМА, використовуваної при дослідженні опору розрізанню паралельними ножами в холодному стані

У нижній частині верхнього рухливого супорта 9 розміщений верхній ніж 10, а нижній нерухомий ніж 11 різального пристрою був розміщений в нижньому нерухомому супорті 12, котрий жорстко зв'язаний з вузлом станин 6 (див.

рис. 2.12, б). Верхній 10 і нижній 11 паралельні ножі були виготовлені зі сталі 5ХВС з термообробкою до HRC = 50...55.

Для даної конструкції ножиць величина максимально допустимої сили розрізання складала 10 кН.

Робочі і компенсаційні тензометричні датчики опору, призначені для вимірювання сили розрізання, що діє на верхній ніж 10 і верхній супорт 9 (див. рис. 2.12, б), були наклеєні безпосередньо на тіло шатуна 8 і підключені по мостовій схемі.

Сигнал з мостової схеми надходив на тензометричний підсилювач (Топаз-3) та оброблювався, за допомогою стандартного програмного забезпечення, аналого-цифровим перетворювачем (фірми L-card, модель E-154) та введенням в ЕОМ з використанням штатного програмного забезпечення.

Тарування вимірювальної системи сили розрізання виконували за допомогою системи важеля шляхом імітаційного навантаження верхнього ножа силою відомої величини (див. рис. 2.12, а).

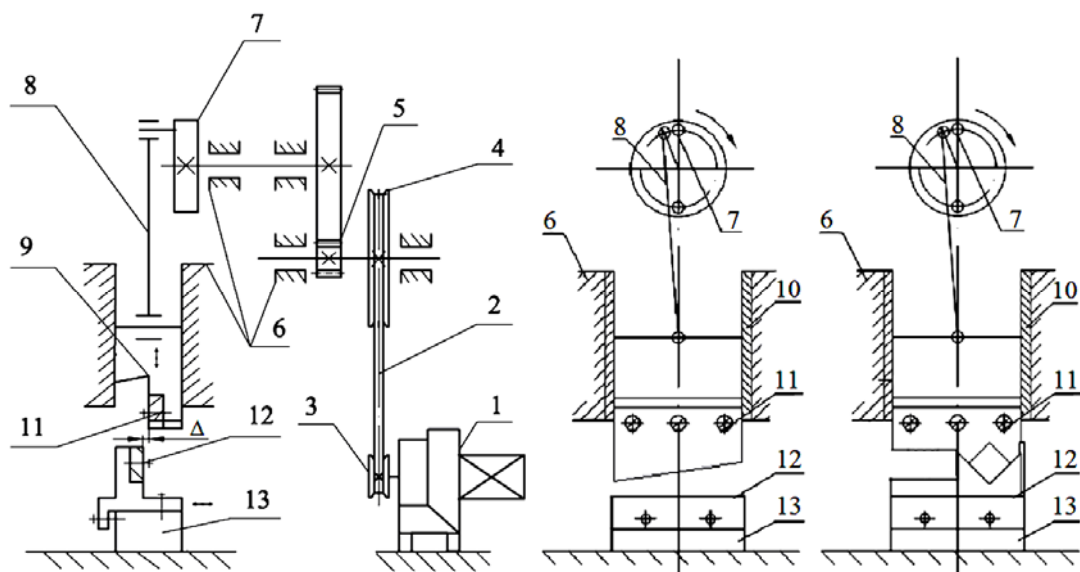
Експериментальні дослідження процесу розрізання похилими ножами в лабораторних умовах були проведені на ножицях поперечного розрізання Н-20 ДДМА. При дослідженні процесів розділення фасонних профілів в супорти ножиць встановлювали відповідні профільовані ножі.

Загальний вигляд і принципова кінематична схема ножиць проілюстровані на рис. 2.13. Привод експериментальної установки (рис. 2.13, б), здійснюється від мотор-редуктора 1 типу МЦ2С-63 з електродвигуном змінного струму через клинопасову передачу 2, тяговий шків 3 якої розміщений безпосередньо на валу мотор-редуктора 1, а ведений шків 4 – на вхідному валу одноступінчастого зубчастого циліндричного редуктора 5, який знаходиться в корпусі 6 установки ножиць.

На вихідному хвостовику валу циліндричного зубчастого редуктора 5 знаходиться ексцентрик 7 шарнірно сполучений за допомогою шатуна 8 з верхнім рухливим супортом 9, який здійснює зворотно-поступальне вертикальне переміщення в напрямних 10 вузла станин 6.



а



б

в

г

Рисунок 2.13 – Загальний вигляд (а) і конструктивна схема (б) експериментальної установки ножиць Н-20 ДДМА, при експериментальних дослідженнях процесів поперечного розрізання похилими (в) або фасонними (г) ножами

У нижній частині верхнього рухливого супорта 9 розміщений верхній похилий (рис. 2.13, в) або профільований (рис. 2.13, г) ніж 11, а нижній нерухомий ніж 12 різального пристрою розміщений в нижньому нерухомому супорті 13, котрий жорстко зв'язаний з вузлом станин 6 (див. рис. 2.13, б). Верхній 11 і нижній 12 ножі були виготовлені зі сталі 5ХВС з термообробкою до $HRC = 50...55$.

Застосування мотор-редуктора МЦ2С-63 дозволяє зменшити швидкість і мінімізувати динамічні явища та підвищити точність одержуваних результатів при швидкості переміщення верхнього супорта 2 мм/с. Величина максимально допустимої сили розрізання на ножицях Н-20 ДДМА становила 20 кН.

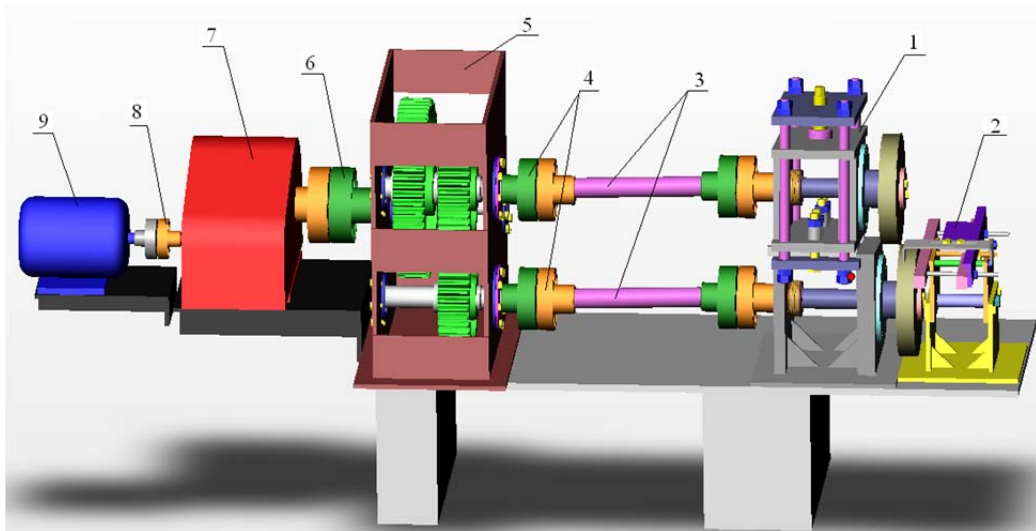
Робочі і компенсаційні тензометричні датчики опору, призначені для вимірювання сили розрізання, що діє на верхній ніж 11 і верхній супорт 9 (див. рис. 2.13, б), були наклеєні безпосередньо на тіло шатуна 8 і підключені по півмостовій схемі. Тарування вимірювальної системи сили розрізання виконували, за аналогією з установкою ножиць з паралельними ножами ДДМА (див. рис. 2.12, б), за допомогою важеля шляхом імітаційного навантаження верхнього ножа силою відомої величини.

До складу вимірювальної системи входив тензометричний підсилювач (Топаз-3) на який надходив сигнал з півмостової схеми, а далі на аналого-цифровий перетворювач (фірми L-card, модель Е-154) для подальшої обробки і введення в ЕОМ з використанням програмного забезпечення виробника АЦП.

Експерименти з дослідження процесу розрізання дисковими ножами і взаємозв'язку кінематичних і енергосилових параметрів виконували на лабораторній установці однопарних дискових ножиць кафедри «Машини металургійного комплексу» Донбаського державного технічного університету (м.Алчевськ, Україна). Загальний вигляд і конструктивні особливості цих ножиць представлені на рис. 2.14. Установа містить механізм різання 1, напрямний стіл 2, проміжні вали 3 з зубчастими муфтами 4, шестеренну кліть 5, сполучну втулочно-пальцеву муфту 6, редуктор 7 ($u = 24,9, M_g = 465 \text{ Н} \cdot \text{м}$), моторну муфту 8 и електродвигун 9 перемінного струму типу 4А1006УЗ ($N = 2,2 \text{ кВт}, n = 950 \text{ хв}^{-1}$).



а



б

Рисунок 2.14 – Загальний вигляд (а) лабораторних однопарних дискових ножиць і їх конструкція (б)

Шестеренна кліть має понижуючу ступінь $u = 3,8$. Окружна швидкість дискових ножів, при діаметрі $D = 250 \text{ мм}$ становить $V = 0,131 \text{ м/с}$ ($V = 7,89 \text{ м/хв}$).

З метою вивчення взаємозв'язку кінематичних і енергосилових параметрів процесу розрізання дисковими ножами в конструкцію ножиць було включено датчик переміщення. Його принципова схема і зовнішній вигляд представлені відповідно на рис. 2.15, а та 2.15, б.

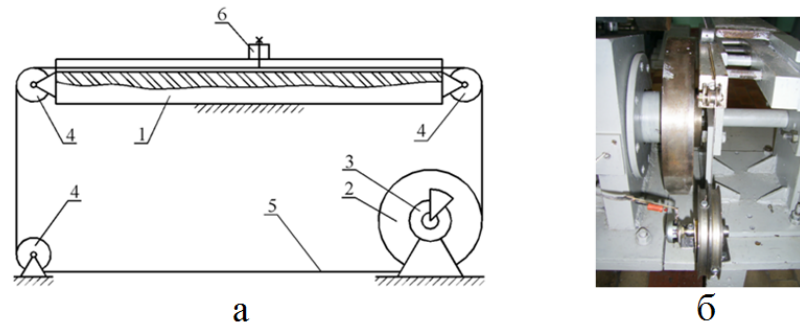


Рисунок 2.15 – Принципова схема (а) і зовнішній вигляд (б) датчика переміщення

Конструкція напрямного столу, призначеного для подавання розрізуваних заготовок товщиною до 12 мм в дискові ножі при ширині заготовки до 200 мм і шириною відрізуваної кромки до 40 мм, представлена на рис. 2.16.

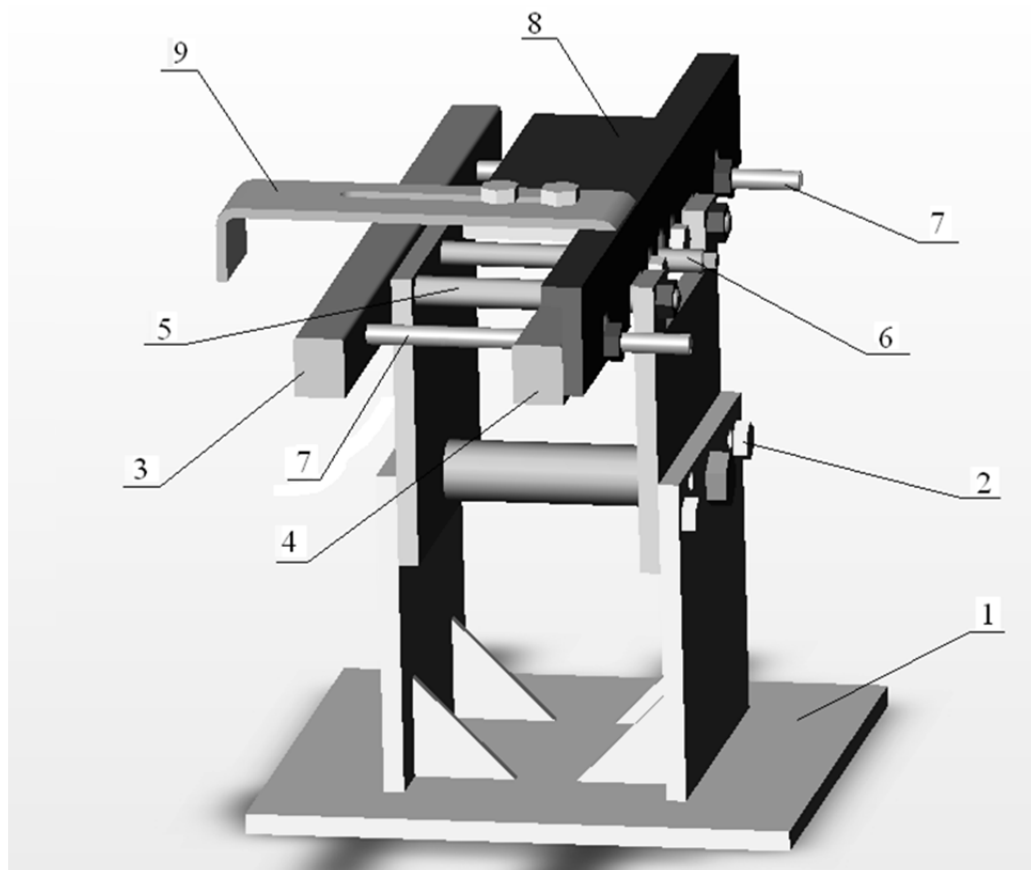


Рисунок 2.16 – Конструкція напрямного столу

Напрямний стіл містить корпус 1 з пристроєм дискретного ($\pm 3^\circ$ від горизонтального положення) налаштування кута нахилу столу 2, нерухомому лижу 3 і рух-

ливу лижу 4, котра переміщується по напрямних втулках 5, за допомогою механізму 6 регулювання її положення. Фіксація положення рухливої лижі здійснюється шпильками 7. До рухливої лижі болтами прикріплений напрямний упор 8, до якого болтами прикріплений упор 9 для зміни ширини розрізуваного листа.

Конструкція механізму різання (рис. 2.17) включає в себе нижній фіксований корпус 1, в проточках якого встановлено нижній ножовий вал 2 на радіальних шарикопідшипниках. Підшипник з боку ножа фіксується в корпусі 1 кришкою 3. Нижній дисковий ніж 4 насаджується на нижній ножовий вал за допомогою шпонок і фіксується болтами через фіксуючу кришку 5.

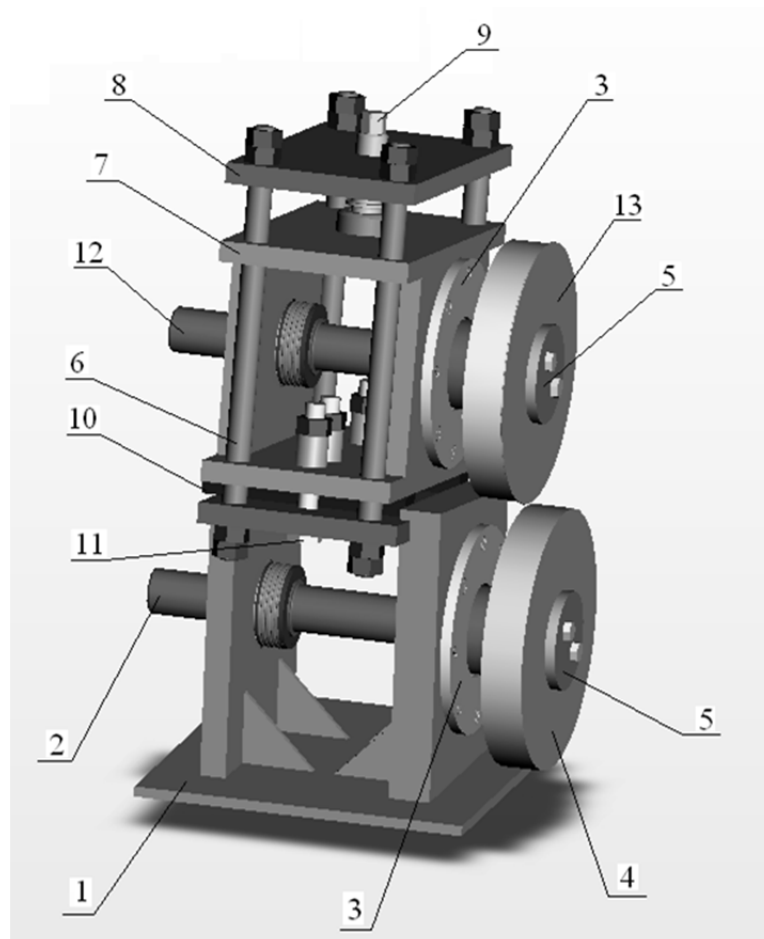


Рисунок 2.17 – Конструкція механізму різання

З приводного боку валу є місце під зубчасту півмуфту. Верхня поперечина нижнього корпусу виконана під кутом 9° до горизонту, для забезпечення необхідного кута звалу верхнього ножа. До поперечини кріпляться напрямні 6, по яких переміщується рухлива опора 7, замикання верхнього і нижнього корпусів механі-

зму різання здійснюється за допомогою поперечки 8 з механізмом 9 зміни радіального зазору. Для забезпечення жорсткості замикання передбачені стяжні болти 10 і сухарі 11.

У проточках рухливої опори встановлено верхній ножовий вал 12 на радіальних шарикопідшипниках. Підшипник з боку ножа фіксується в корпусі 7 кришкою 3. Верхній дисковий ніж 13 насаджується на верхній ножовий вал за допомогою шпонок і фіксується болтами через фіксуючу кришку 5. З приводний боку валу є місце під зубчасту півмуфту.

Регулювання бокового (осьового) зазору між ножами здійснюється за допомогою змінних прокладок, набори яких встановлювали між верхнім або ніжнім ножем, в залежності від використовуваної пари дискових ножів.

Для контролю основних силових параметрів, була використана вимірювальна система, структурна схема якої аналогічна наведеній на рис. 2.11, з тією тільки різницею, що тензорезисторні перетворювачі, підключені по мостовій схемі, наклеєні на верхньому і нижньому валах ножиць і призначені для вимірювання крутного моменту.

Для розшифрування одержуваних осцилограм виконували тарування датчиків та визначали тарувальні коефіцієнти. Тарування дискових валів з наклеєними на них датчиками здійснювали за допомогою важеля, закріпленого на ножовому валу, навантаження якого давало відоме значення крутного моменту.

Крім реалізації процесу розрізання дисковими ножами дану установку використовували при моделюванні процесу розрізання з перекочуванням ножа, оскільки виготовлення навіть лабораторних ножиць такого типу є трудомістким та фінансово затратним, що пов'язано насамперед зі складністю і громіздкістю конструкції. Для фізичного моделювання в установці дискових ножиць демонтували нижній ніж і напрямний стіл, а замість них встановлювали блок з плоским рухливим ножем.

Принципова схема блоку з рухливим плоским ножем представлена на рис. 2.18.

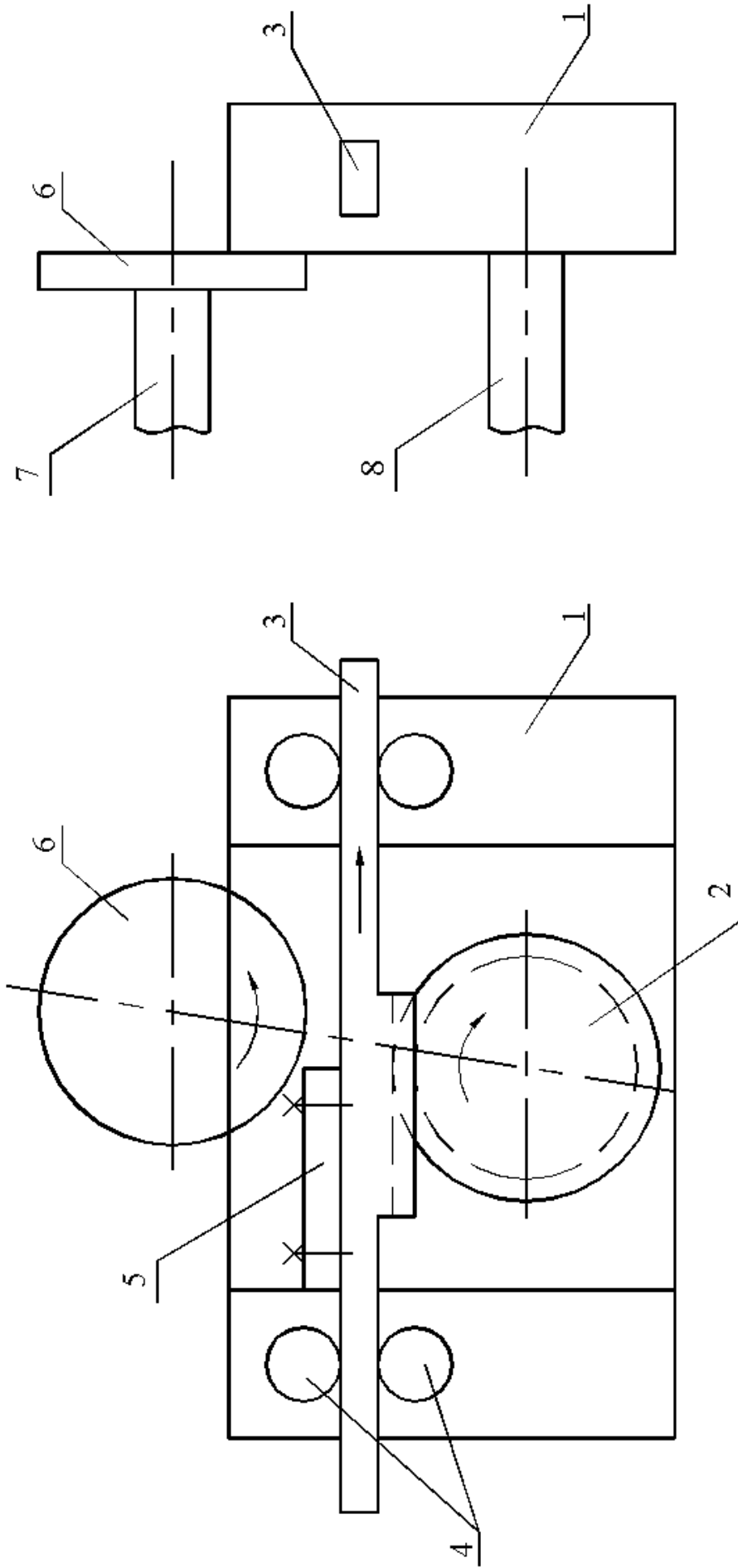


Рисунок 2.18 – Блок с плоским подвижным ножом для реализации процесса разрезания с переключением ножа (ножице с дуговым ножом)

Даний блок має корпус 1, в прорізаних пазах якого переміщується рейка-тримач ножа 3 з нарізаною зубчастою ділянкою довжиною 150 мм, який входить в зачеплення з тяговою шестернею 2. Для фіксації у вертикальному напрямку в корпусі передбачені напрямні ролики 4.

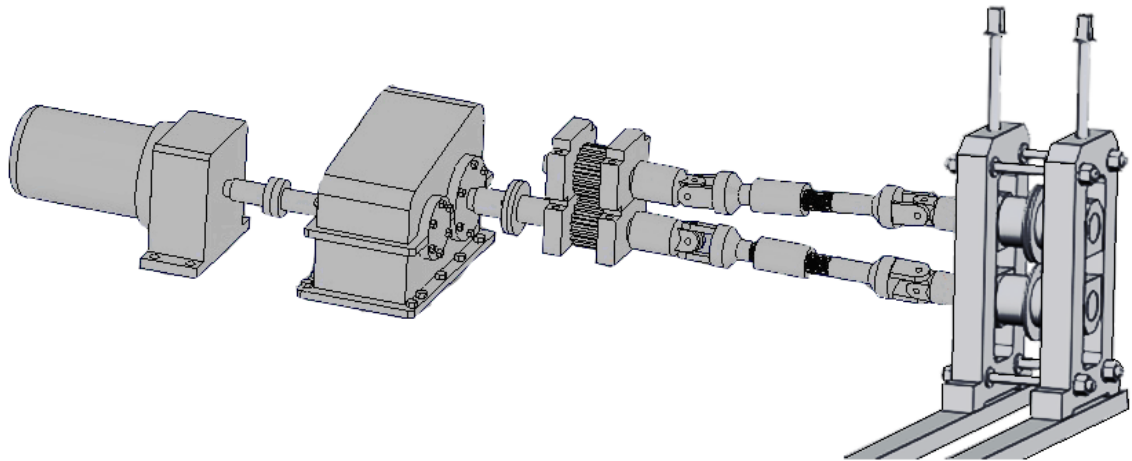
Привод нижнього плоского ножа здійснювався від нижнього приводного валу 8 установки ножиць за допомогою рейкової передачі, при цьому забезпечується лінійна швидкість, що дорівнює окружній швидкості верхнього дискового ножа 6, який закріплений на верхньому приводному валу 7 установки ножиць.

Поєднання обертання верхнього ножа з одночасним переміщенням нижнього плоского ножа дозволяє реалізувати режим перекату, який відповідає режиму роботи ножиць з дуговим ножем.

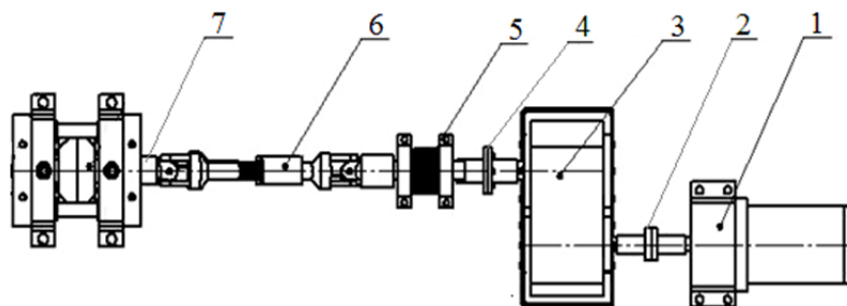
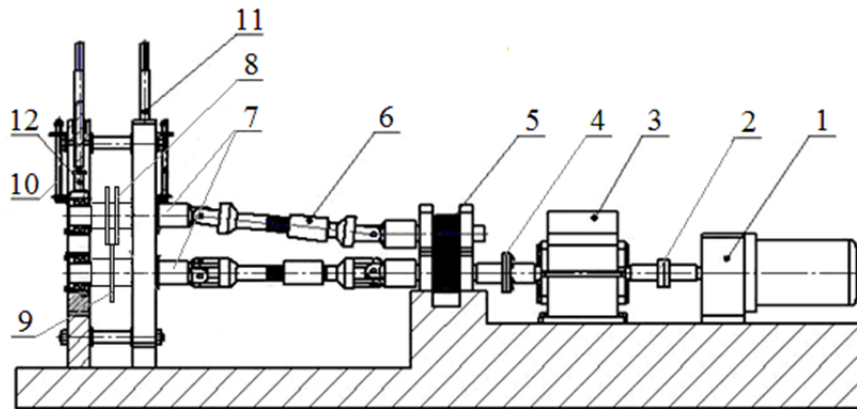
Вимірювальна система в даному випадку передбачає контроль крутного моменту на верхньому ножовому валу.

При дослідженні процесу розрізання дисковими ножами тонких смуг і по розширенню уявлення про взаємозв'язок кінематичних і енергосилових параметрів процесу, використовували дрібносортний стан 100 кафедри «Автоматизовані металургійні машини та обладнання» Донбаської державної машинобудівної академії, загальний вигляд і склад обладнання якого проілюстровані на рис. 2.19. Привод стану здійснюється від мотор-редуктора 1 типу МЦ 2С-63 ($n = 40$ об/хв) через моторну муфту 2 на одноступінчастий циліндричний редуктор 3 типу 1-ЦУ-160 ($u = 4,0$), далі через проміжну муфту 4 на шестеренну кліть 5, з якої за допомогою універсальних шпинделів 6 на підшипниках кочення на робочі валки 7.

На робочі валки дрібносортного стану 100 були встановлені, за допомогою плішкового з'єднання, дискові ножі 8 і 9 виконані у вигляді бандажів, виготовлених зі сталі 5ХВС, і зафіксовані від осьового зсуву. Причому на верхній валок встановлювали два ножі, а на нижній один, що дозволило здійснювати одночасно два різання, за аналогією розпуску смуги на багатодискових ножицях.



а



б

Рисунок 2.19 – Загальний вигляд (а) і склад обладнання (б) дрібносортового стану 100 ДДМА при дослідженні процесів розрізання дисковими ножами

Врівноваження верхнього робочого валка здійснювали за допомогою пружинного механізму 10, а встановлення радіального зазору на необхідну величину виконували за допомогою натискного механізму 11 з передачею гвинт-гайка, а вимір сил прокатки у вертикальній площині – за допомогою месдози 12.

З метою зміни кута подачі листа в ножі та можливості створення сили опору руху листа при розрізанні на станину робочої кліті монтували подавальний стіл, конструкція і установка якого представлена на рис. 2.20.

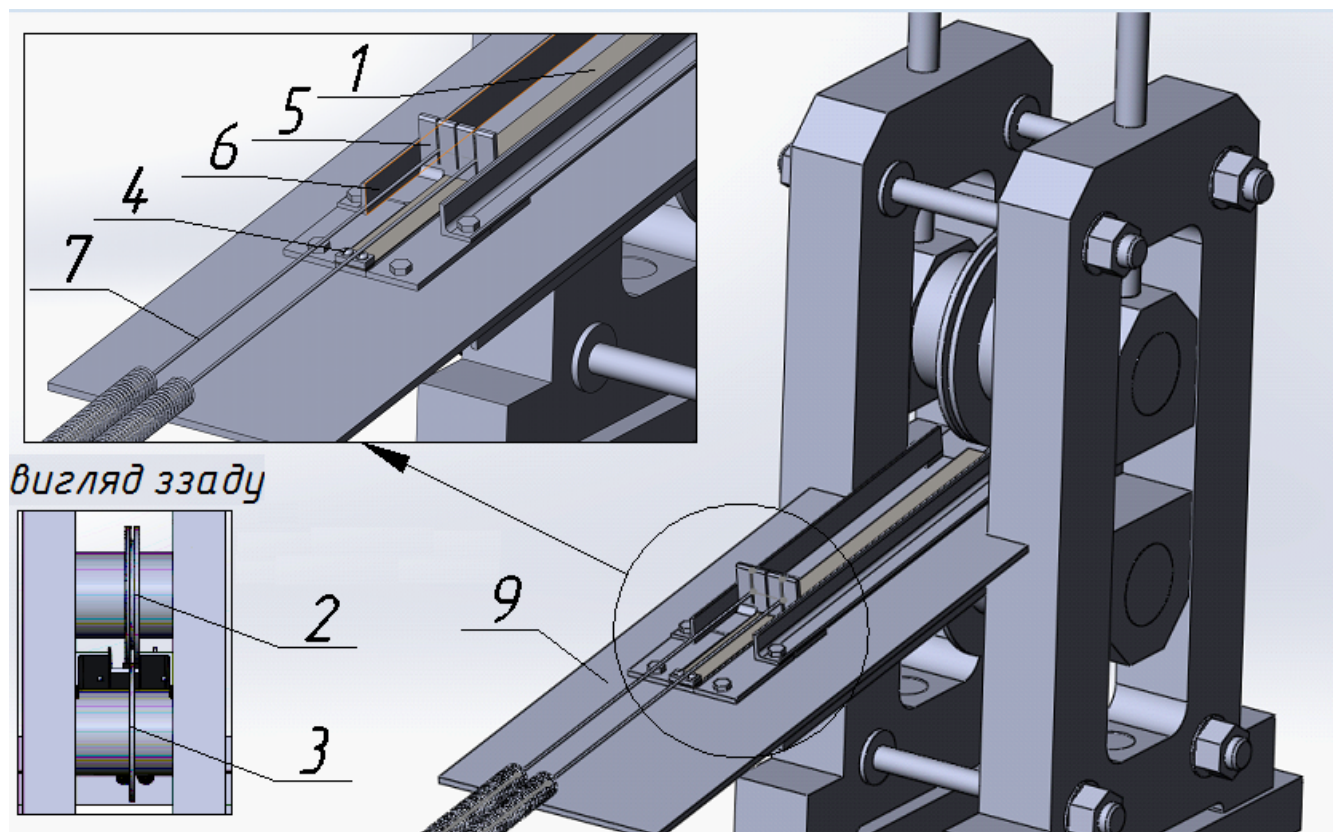


Рисунок 2.20 – Загальний вигляд і установка подавального столу на дрібносортному стані 100 ДДМА при дослідженні впливу сили натягу на енергосилові і кінематичні параметри процесу розрізання дисковими ножами

Подавальний стіл працює наступним чином: розрізувана смуга 1 подається в різальні диски 2 і 3, після захоплення смуги ножами деякий час відбувається її рух без зовнішнього опору, до моменту торкання фіксатором 4 повзунка 5, що рухається в напрямних 6, до якого, за допомогою стяжок 7, прикріплені пружини 8, за допомогою деформації яких, моделюється «натяг» смуги, при розрізанні.

При цьому стіл 9 встановлений під кутом до горизонтальної площини, що моделює конструкцію ножиць зі зваленим у напрямку руху верхнім дисковим ножом.

Для оцінки енергосилових параметрів процесу розрізання застосовували вимірювальну систему, узагальнена електрична схема якої представлена на рис. 2.21.

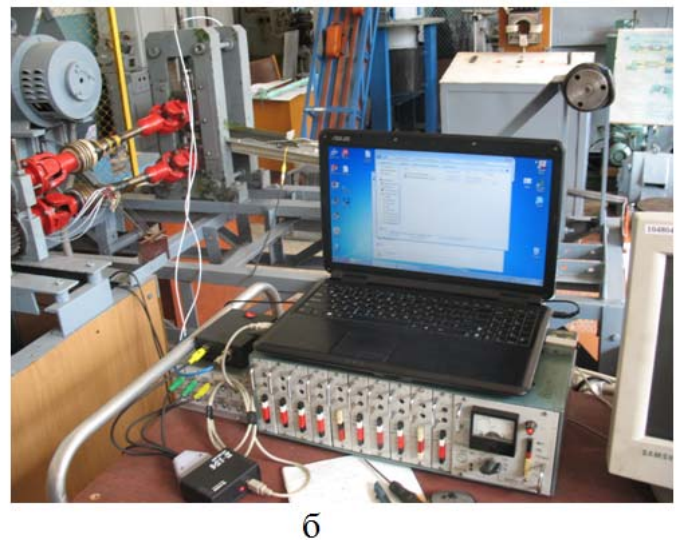
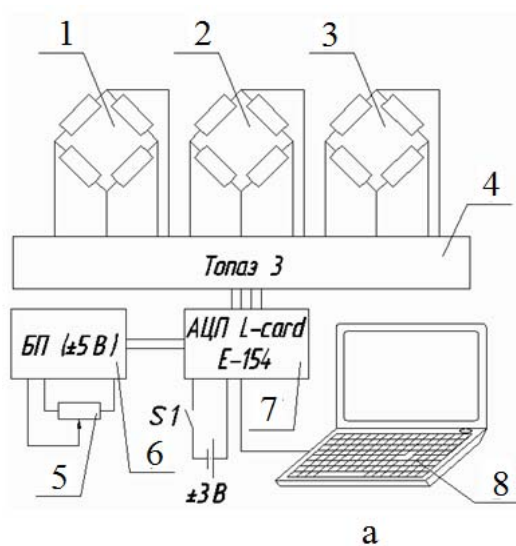


Рисунок 2.21 – Узагальнена електрична схема (а) вимірювальної системи (б) лабораторних дискових ножиць

У даній вимірювальній системі використані три вимірювальних моста, з яких два встановлені на верхньому 1 і нижньому 2 валах ножів і застосовуються для вимірювання моментів розрізання, а міст 3 складають тензодатчики наклеєні на дві симетрично розташовані месдозы, які застосовуються для вимірювання сили розрізання. Сигнал з вимірювальних мостів надходить на тензометричний підсилювач 4 (Топаз-3). Крім того, в вимірювальну систему включений датчик переміщення 5, побудований на базі змінного резистора, влаштованого за принципом подільника напруги з незалежним живленням від додаткового джерела 6.

Сигнал з трьох каналів підсилювача 4 і датчика переміщення 5 надходить на обробку аналого-цифровим перетворювачем 7 (фірми L-card, модель E-154) і потім в цифрованому вигляді безпосередньо в ЕОМ 8 де проводиться його запис з використанням програмного забезпечення виробника плати АЦП.

Крім того, дана схема дозволяє фіксувати момент початку деформації пружин, для чого в ній передбачена нормально-розімкнута кнопка S1, яка спрацьовує в момент контакту фіксатора з повзунком і, замикає ланцюг, що дозволяє чітко визначати момент початку прикладення сили натягування смуги.

Тарування датчиків на валах здійснювалося навантаження їх відомим крутним моментом, шляхом прикладання статичного навантаження на важіль з відомим плечем, закріплений на хвостовику валу. Месдозу тарували на зразковому гідравлічному пресі з максимальною силою 50 кН, шляхом послідовного включення в силовий ланцюг. Датчик переміщення тарували шляхом його дискретного переміщення на відому зразкову величину і зіставленням з відповідним електричним сигналом.

ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 2

1. Досягнення максимально ефективних рішень в області розділових операцій прокатного виробництва можливе за умови комплексного підходу, шляхом врахування специфіки конкретної розділової операції, особливостей реалізації процесу і застосовуваного обладнання з прив'язкою до окремих ланок технологічного ланцюга конкретного виробництва.

2. Встановлено, що основу теоретичних досліджень процесів розділових операцій прокатного виробництва має становити метод скінченних елементів, шляхом комплексного застосування теорії пружності і пластичності, а також механіки руйнування, в поєднанні з методами планування експерименту та статистичної обробки теоретичних експериментів шляхом кореляційного і регресійного аналізу, оскільки такий підхід істотно розширює кількість факторів впливу та значно підвищує достовірність отримуваних результатів.

3. Обрана мета проведення експериментальних досліджень полягає в підтвердженні адекватності та достовірності розроблених математичних моделей шляхом порівняння експериментальних даних з результатами симуляцій, а також в розширенні практичної інформації для обґрунтування кількісних показників, які

використовуються при їх розробці, оскільки такий підхід дозволяє істотно знизити матеріальні та організаційні витрати та отримувати достовірні результати моделювання, наближені до промислових умов.

4. Розроблені та виготовлені вузли лабораторних установок та вимірювальні схеми забезпечують проведення з необхідною точністю комплексу експериментальних досліджень енергосилових параметрів та показників якості процесів розрізання шевронними та дисковими ножами, а також розрізання з перекочуванням ножа.

РОЗДІЛ 3

ПРИКЛАДНІ АСПЕКТИ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ РОЗДІЛЕННЯ МЕТОДОМ СКІНЧЕННИХ ЕЛЕМЕНТІВ

3.1 Вибір скінченних елементів, принципів побудови та керування сіткою

Загальні вимоги до вибору скінченних елементів і апроксимуючих функцій встановлюють критерії збіжності МСЕ.

Основною характеристикою чисельних методів є точність, тобто близькість обчислених значень до дійсних. Об'єктивні оцінки точності дає порівняння чисельних і аналітичних рішень спеціально підібраних тестових завдань. Зазвичай приймається, що точність методу достатня, якщо забезпечується його збіжність, під якою розуміється як завгодно близьке наближення побудованого рішення до точного в міру дроблення елементів і збільшення їх числа. При зменшенні розмірів елементів помилки дискретизації (неточність наближення області та її границь) усуваються автоматично: усунення же помилок апроксимації (неточність наближення функцій в межах елементів) досягається при виконанні "критеріїв обмеженої збіжності" [294,297]:

а) представлення шуканої змінної стану всередині елементів у вигляді повних поліномів як мінімум ступеня n , де n – найвищий порядок похідних, що входять в функціонал;

б) забезпечення безперервності самої функції і її похідних аж до порядку $(n - 1)$ при переході через границі елементів.

Для будь-якої задачі існує певний оптимальний тип елемента, який забезпечує мінімальні витрати часу для досягнення необхідної точності. Однак наявні ре-

комендації, включаючи достатні критерії збіжності, залишають велику свободу вибору типу елемента, яка полягає у встановленні компромісу між складністю елементів і їх кількістю. На підставі цього розроблена широка номенклатура скінченних елементів, які можна класифікувати за рядом ознак [296,327]:

- вимірність елементів – лінійні, двовимірні (плоскі поверхневі), об'ємні, багатовимірні;
- геометрична форма – трикутні, чотирикутні, у формі тетраедрів, призматичні, кільцеві;
- форма границь – прямолінійні, плоскі, криволінійні, ізопараметричні;
- порядок апроксимуючої функції – симплекс, комплекс і мультиплекс елементи, елементи вищого порядку;
- математичний вигляд апроксимуючої функції – поліноми Лежандра, Ерміта, сплайни, сирендипові множники.

Детальний опис скінченних елементів різних типів і загальну теорію їх побудови можна знайти в основоположних роботах по методу скінченних елементів [294,297,298].

До переваг елементів високого порядку відносять зменшення кількості змінних, обсягу вихідних даних, ймовірності помилки і витрат машинного часу. Однак висока точність рішення при цьому забезпечується лише у випадках, коли характер поведінки стандартних функцій форми відповідає дійсному змінюванню досліджуваних величин. Елементи високого порядку (другого, третього) виявляються ефективними для наближення досить гладких функцій або якщо елемент розроблений з урахуванням специфіки даної задачі, як це, наприклад, має місце в теорії пластин і оболонок [294,297]. Якщо ж характер поведінки досліджуваних функцій заздалегідь невідомий і очікуються великі градієнти шуканих величин, то єдиною гарантією задовільного наближення є використання кусково-гладких апроксимацій на елементах малих розмірів. Існують і інші причини, за яких зменшення розмірів елементів відіграє більш суттєву роль, ніж підвищення їх порядку.

Вплив вузлових змінних виявляється найбільш сильним, коли вузлові точки збігаються з вершинами елементів, і найбільш слабким, коли вони розташовані

всередині елементів. При кінцевому числі елементів доцільно, щоб більшість вузлів збігалася з вершинами, що забезпечується для елементів низьких порядків.

Відповідно до критеріїв збіжності зменшення розміру елементів завжди призводить до збільшення точності рішення, тоді як аналогічні тенденції поліпшення апроксимації залишаються невідомими. Зокрема, граничний випадок глобальної апроксимації, коли вся область збігається з одним елементом, не приводить до задовільних результатів, незважаючи на використання складних координатних функцій [294,297,298].

Порядок елементів повинен забезпечити обчислення похідних, що входять в функціонал. При цьому частина рівнянь (нестискування, рівноваги) виконується в окремих внутрішніх точках елементів. Точність інтерполяції відповідних величин в проміжних точках зростає зі зменшенням розміру елемента.

Аналіз нестационарних процесів вимагає декількох послідовних етапів дискретизації з використанням дрібних елементів в областях з великими градієнтами і різких змін напрямку течії матеріалу. Так як положення таких областей заздалегідь невідомо, то необхідні алгоритми адаптивного перестроювання сітки або застосування дрібної розбивки у всій області.

При аналізі явищ, пов'язаних, з утворенням дефектів і руйнуванням, роздільна здатність математичної моделі повинна бути достатньою для оцінки стану в локальних обсягах, які на кілька порядків менше характерних розмірів тіла. У цих випадках необхідна дискретизація об'ємів тіла, що деформується елементами відповідних розмірів.

Отже, в більшості випадків виправдана стратегія використання дрібних стандартних елементів нижчого порядку, які забезпечують простоту програмування, необхідну точність і прийнятні об'єми обчислень.

Варіаційні функціонали задач пружності та пластичності містять похідні від переміщень (швидкостей) не вище першого порядку ($n - 1$), тобто критерії збіжності виконуються для лінійних поліномів. Відповідні найпростіші симплекс-елементи реалізуються, коли число вузлів перевищує мірність задачі на одиницю, тому для двовимірних напружено-деформованих станів і температурних полів

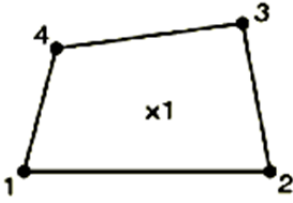
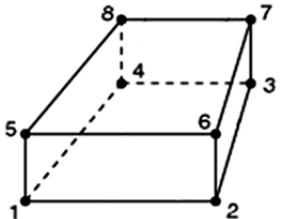
умов оптимальності задовольняють плоскі трикутні, чотирикутні і кільцеві елементи, а для об'ємних – елементи у вигляді багатогранників.

Ізопараметричні елементи мають велике практичне значення і знаходять застосування майже у всіх програмах скінченно-елементного аналізу [296,327,351]. Особливістю даного типу елементів є те, що на їх базі, шляхом виродження, можна отримувати інші форми скінченних елементів, необхідні при моделюванні різних процесів, а перетворення координат і апроксимація невідомих величин для ізопараметричних елементів здійснюється на базі одних і тих же функцій форми.

В алгоритмі, що реалізує метод незалежних змінних Лагранжа-Ейлера, передбачені процедури адаптації сітки, які даний тип елементів дозволяє здійснювати в процесі обчислень найбільш ефективно [24, 31, 64].

Тож виходячи з вище сказаного та проаналізувавши наявну базу скінченних елементів в Abaqus, для моделювання розрізуваних заготовок найбільше підходять 4 лінійні скінченні елементи, що є ізопараметричними із редукованою схемою інтегрування та мають властивості суцільного середовища і контроль зберігання відповідної форми чотирикутника (для двовимірних елементів) та шестигранника з гранями у вигляді чотирикутників (для тривимірних елементів). Назва та задачі для застосування яких наведені в таблиці 3.1.

Таблиця 3.1 – Скінченні елементи рекомендовані для застосування при моделюванні в Abaqus задач процесів розділення

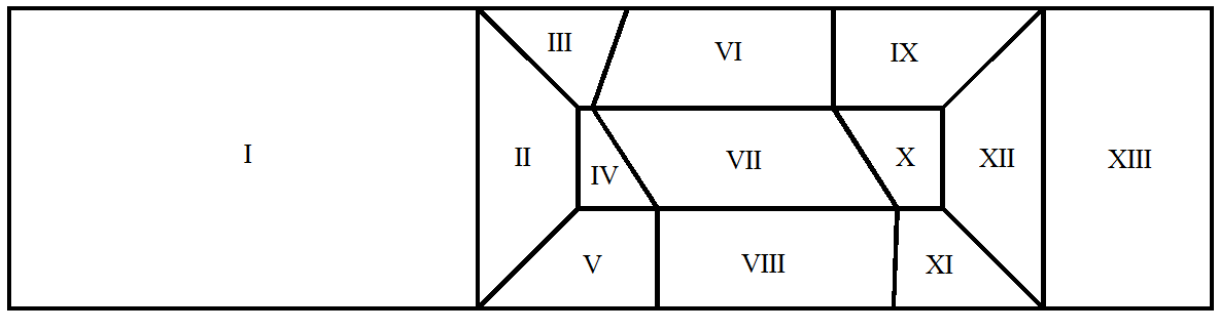
Назва елемента	Форма елемента і розташування вузлів	Тип задачі
CPE4R		пружно-пластична
CPE4RT		пружно-термопластична
C3D8R		пружно-пластична
C3D8RT		пружно-термопластична

При побудові вихідної сітки процесів розділення існують певні протиріччя, оскільки необхідно використовувати елементи відносно невеликого розміру та намагатися зменшити витрати машинної пам'яті та часу на розрахунок.

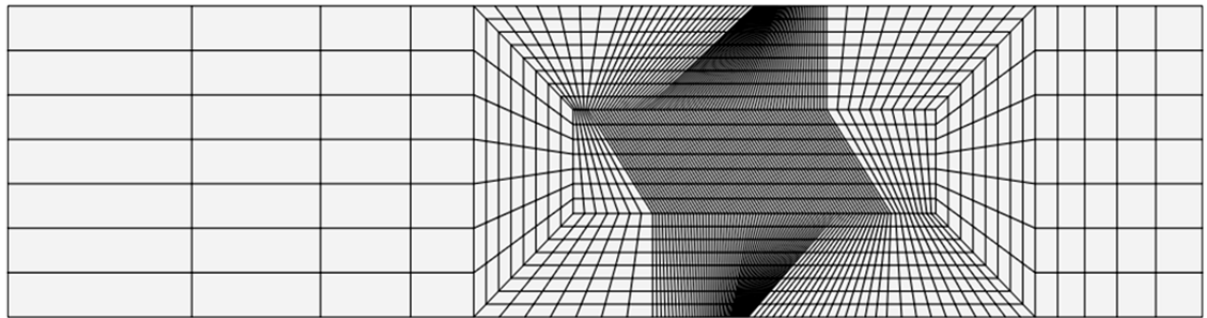
Отже створення сітки з елементів рівного розміру по всьому об'єму заготовки не дозволяє вирішити це протиріччя, оскільки або розмір елементів буде досить великим, що не дозволить здійснювати коректну перебудову в вершинах елементів (враховуючи, що профіль ножа має прямокутну форму) і може виникнути ситуація показана на рис. 2.2, б, коли сторона елемента буде перетинати інструмент, навіть за умови деякого округлення його вершини. А згущення сітки, за рахунок зменшення розмірів скінченних елементів буде сприяти усуненню даної ситуації, однак (враховуючи, що радіус округлення в вершині ножа повинен бути досить невеликим) це призведе до істотного збільшення числа елементів і, як наслідок, багаторазовому зростанню числа рівнянь і часу обчислень. Крім того, збільшення числа рівнянь, може потребувати застосування подвійної точності обчислень, щоб мінімізувати машинну (накопичувану при розрахунках) похибку, а, отже, ще додатково збільшить час розрахунку. При цьому немає ніяких гарантій, що процес не буде припинений, в силу невиконання додаткових умов накладених на перебудову сітки.

Отже при побудові сітки первісну область доцільно розбити на підобласті з різним розміром скінченних елементів. При цьому підобласть в зоні власне розділення, де матимуть місце великі пластичні деформації з наступним руйнуванням, буде містити більш дрібні за розміром скінченні елементи. В інших підобластях, котрі мають розташування віддалене від зони розділення розмір скінченних елементів може бути істотно (в кілька разів) більше, оскільки ступінь пластичної деформації там буде значно нижче, а може і взагалі мати виключно пружний характер.

На рис. 3.1,а представлена схема розділення модельованої області на підобласті, яка була використана при побудові початкової сітки (див. рис. 3.1,б) двовимірних моделей процесів розрізання паралельними ножами [352].



а



б

Рисунок 3.1 – Схема розділення модельованої області на підобласті (а) при побудові початкової сітки (б) двовимірних моделей процесів розрізання паралельними ножами

А на рис. 3.2 представлені приклади початкових сіток розроблюваних тривимірних моделей.

Однак простого розділення на підобласті буде недостатньо, оскільки конфігурація вихідної сітки (див. рис. 3.1, б), без додаткових обмежень, може істотно змінитися (рис. 3.3,а і 3.3,б), тому що попередньо обране формулювання Лагранжа-Ейлера має на увазі регулярну (в процесі обчислення) адаптацію сітки. Для більш коректного керування адаптацією сітки доцільно використовувати формулювання Лагранжа-Ейлера тільки для підобластей, в яких розташована зона власне розрізання (рис. 3.3,в) з накладанням додаткових обмежень на окремі вузли в формулюванні Лагранжа, а для всіх інших областей застосовувати формулювання Лагранжа.

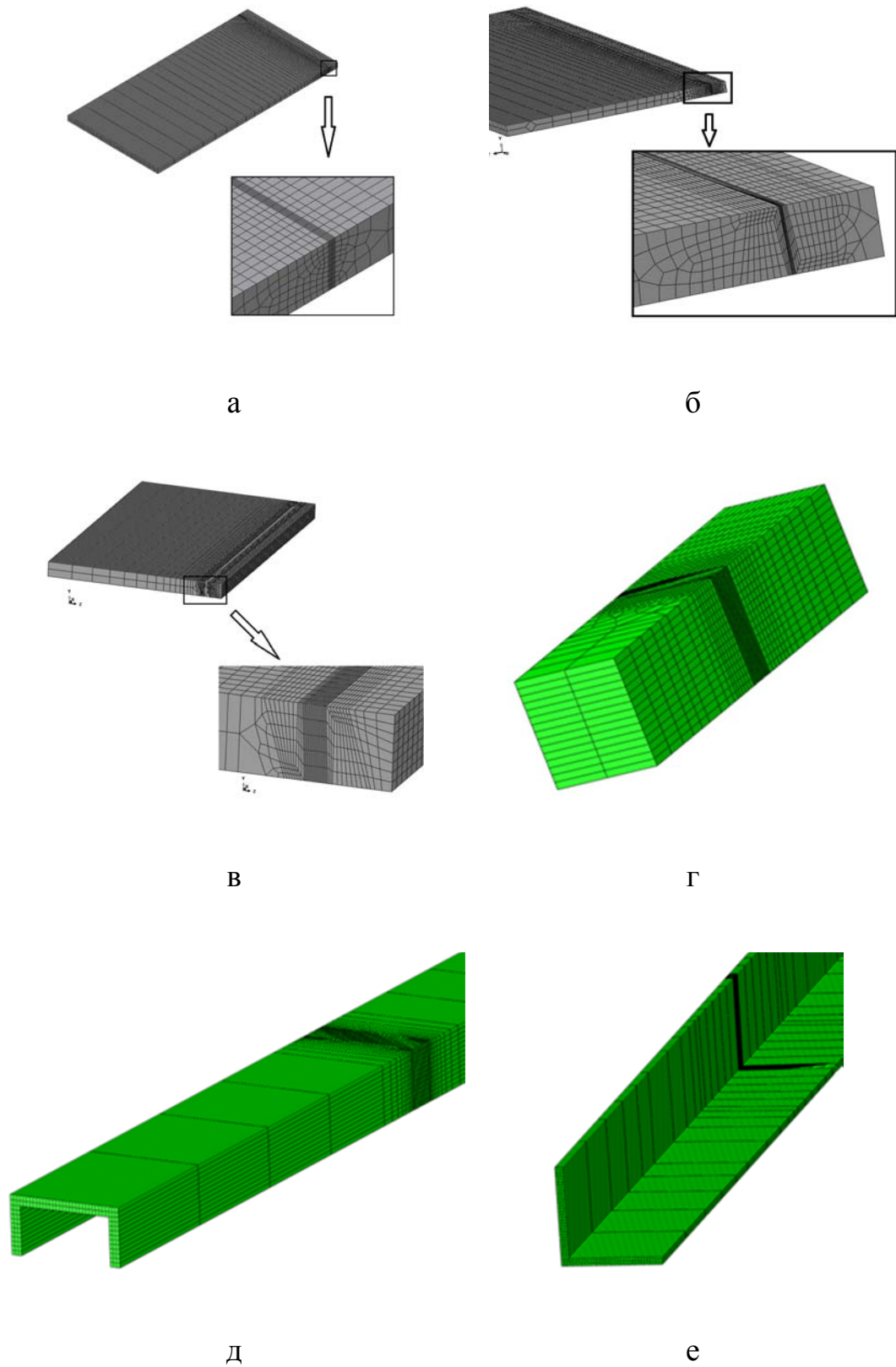
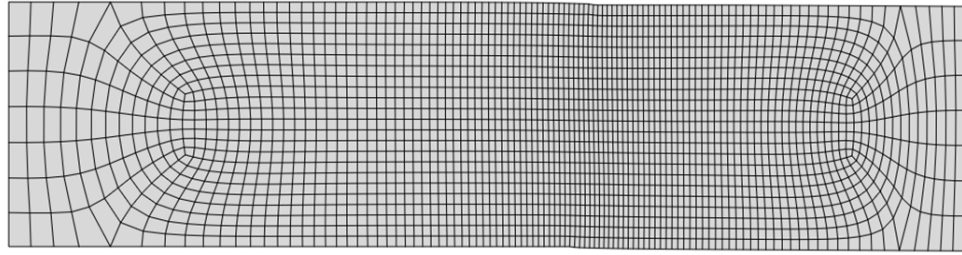
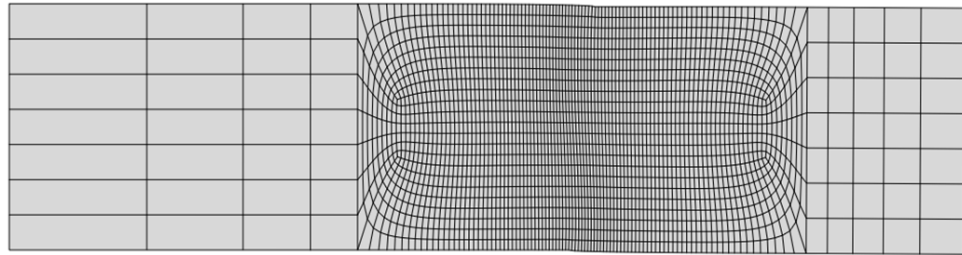


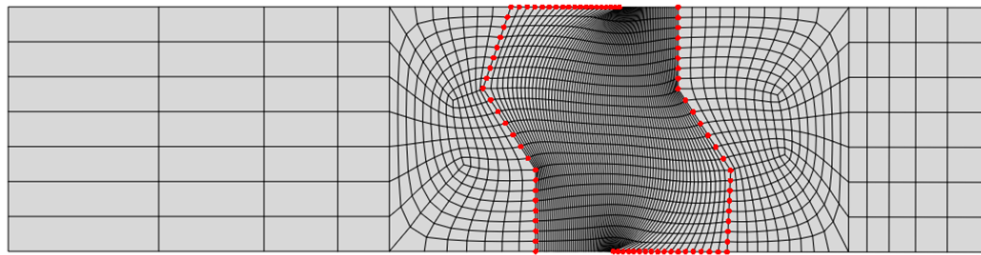
Рисунок 3.2 – Схеми початкової сітки тривимірних моделей процесів розрізання похилим (а), дуговим (б), дисковими (в) та фасонними (г, д, е) ножами



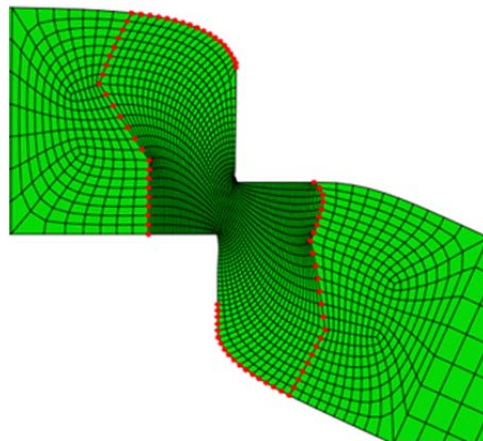
а



б



в



г

Рисунок 3.3 – Зміни початкової сітки (див. рис. 3.1,б) після адаптації при використанні формулювання Лагранжа-Ейлера для всіх підобластей (а), для підобластей II-XII без додаткових обмежень (б) і з обмеженнями (в) поведінки вузлів (•) в формулюванні Лагранжа і її структура (г) в ході моделювання

Такий підхід по-перше, дозволяє перебудувувати сітку в областях віддалених від зони розрізання, де немає в цьому необхідності, а по-друге, поведінка вузлів, розташованих на вільних зовнішніх поверхнях та на внутрішніх границях зони розрізання, доцільно представляти в формулюванні Лагранжа, що сприяє більш коректному опису поведінки вільних поверхонь (рис. 3.3, в) та підтримувати структуру сітки достатньо структурованою протягом всієї симуляції (рис. 3.3, г).

3.2 Моделювання інструментів та контактної взаємодії

Загалом можна утворювати інструменти, таким самим чином, як і розрізану заготовку, проте такий підхід перевантажує модель додатковим числом рівнянь і (якщо не досліджується НДС стан інструменту) потребує додаткового ресурсу машинної пам'яті та часу. Саме тому, при вивченні НДС розрізуваної заготовки, слід виходити з припущення, що інструмент є абсолютно жорстким. Таке припущення дозволяє описати інструмент, як лінію чи оболонку, що зменшує складність задачі і об'єми розрахунків.

В Abaqus існує два варіанти описання абсолютно жорсткого тіла – за допомогою аналітичних поверхонь та дискретно за допомогою скінченних елементів.

Аналітичні поверхні доцільно використовувати переважно в двовимірних задачах та при відносно простих конфігураціях інструментів (рис. 3.4,а). Дискретний опис контактних поверхонь інструментів з використанням скінченних елементів стає необхідним насамперед в тривимірних задачах, коли інструменти мають відносно складну форму (рис. 3.4,б і 3.4,в). Назва елементів, їх форма та типи задач для застосування приведені в таблиці 3.2.

При цьому слід зазначити, що в тривимірних задачах також доцільно застосовувати згущення сітки в певних локальних точках задля підвищення точності дискретного представлення дрібних елементів інструменту, зокрема в вершинах різальних кромок (див. рис. 3.4,б і 3.4,в).

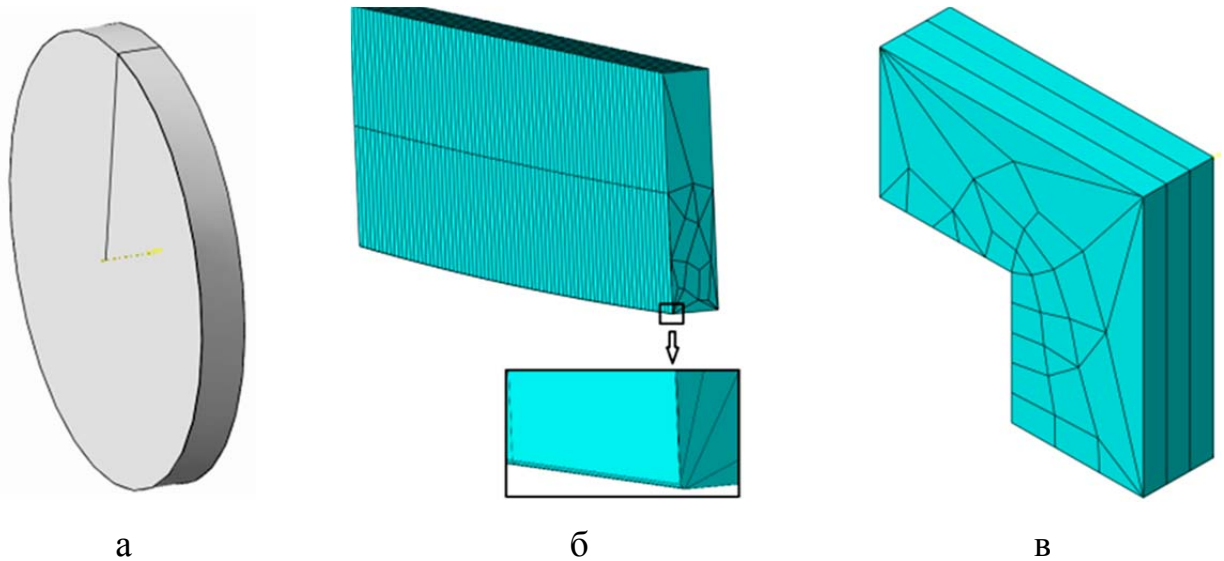


Рисунок 3.4 – Дисковий ніж (а) створений з використанням аналітичних поверхонь та дуговий (б) і фасонний (в) ножі створені з використанням скінченних елементів, що використовувалися в тривимірних задачах

Таблиця 3.2 – Скінченні елементи рекомендовані для описання інструментів при моделюванні в Abaqus задач процесів розділення [327]

Назва елемента	Форма елемента	Тип задачі
R2D2	лінія	плоский напружений стан та плоска деформація
R3D3	трикутник	тривимірні
R3D4	чотирикутник	тривимірні

Крім того, в тривимірних задачах, при описанні інструменту можна використовувати як лише елементи трикутної форми, так і комбінувати чотирикутні та трикутні елементи, що в незначній мірі, але дозволить зменшити час розрахунку. Використання лише чотирикутних елементів цілком можливе, проте в комбінації зі згущенням сітки в певних локальних точках не завжди може бути реалізоване.

Наступним важливим фактором моделювання процесів розділення є контактна взаємодія деформованого металу та інструменту. При цьому потрібно врахо-

увати зовнішнє тертя, особливістю якого є те, що одне з тіл, що труться знаходиться в стані пластичної течії.

На відміну від звичайного тертя твердих тіл, іноді званого машинним, тертя при обробці металів тиском називають пластичним.

Внаслідок пластичної деформації заготовки, різко зростає контурна площа торкання поверхонь контакту інструменту і заготовки. У більшості випадків при обробці тиском вводять допущення, що контурна площа торкання дорівнює номінальній площі. При цьому значно зростає фактична площа торкання, хоча вона, як правило, не досягає розмірів номінальної площі, тобто абсолютний контакт поверхонь відсутній. Також збільшується відношення площі поверхонь контакту до обсягу тіла.

Деформація поверхневих шарів оброблюваного тіла може бути значно інтенсивнішою, ніж загальна деформація тіла. Це пояснюється тим, що мікровиступи поверхні інструменту вдавлюються в поверхню металу, створюючи місцеву додаткову деформацію. При ковзанні відбувається пошкодження поверхні металу за рахунок проникнення мікровиступів. Оскільки поверхневі шари металу зазнають більш інтенсивної деформації, їх властивості міцності виявляються вищими, ніж у металу всередині заготовки.

Отже при моделюванні процесів розділення МСЕ доцільно використовувати закон тертя Кулона з обмеженням дотичного контактного напруження. Рекомендована контактна взаємодія інструменту і заготовки є поверхня до поверхні, де під поверхнею слід розуміти абсолютно жорсткі аналітичні або поверхні скінченних елементів інструментів та відповідні поверхні скінченних елементів деформованого тіла.

За таких умов в Abaqus можна застосовувати методи обмеження дотичного контактного напруження – кінематичного обмеження та метод штрафів [327]. Останній є більш простий та швидкий, проте метод кінематичного обмеження точніший і здатен забезпечити відсутність проникнення та осциляцій між тілами.

Що стосується властивостей контактного тертя, то при моделюванні дотичної взаємодії можна використовувати, як експериментальні, так і аналітичні дані

визначення коефіцієнту тертя, а при вивченні гарячого розділення доцільно представляти його в залежності від температури. Для нормальної складової контактної взаємодії тиск-перекриття слід представляти як «жорсткий» контакт з можливістю відокремлення після втрати контакту.

3.3 Опис процесу формування та зростання тріщини в пластичному матеріалі з ізотропним зміцненням

На відміну від більшості процесів обробки металів тиском процеси розділення обов'язково мають містити повне розділення деформованої заготовки, оскільки це є їх кінцевою метою. Саме тому, без коректного описання процесу формування та зростання тріщини в металі, вирішення задач моделювання розділових операцій не є можливим.

В рамках даної роботи пластичні властивості деформованого матеріалу, незалежно від температури, описувалися моделлю пластичності Мізеса [296,325-327], а відповідно модель руйнування базувалася на критерії пластичності (див. підрозділ 2.2). На рис. 3.5 та 3.6 показано поведінку матеріалу при зміні швидкості деформації.

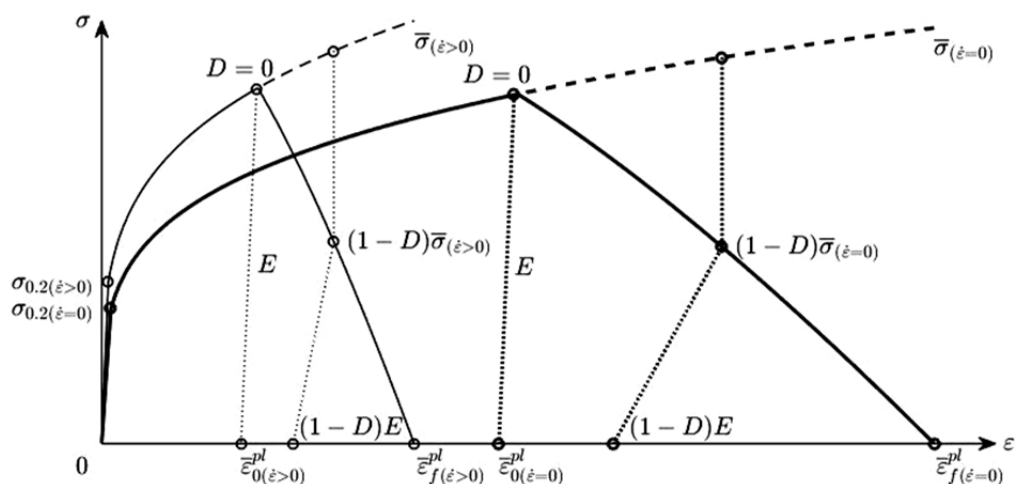


Рисунок 3.5 – Характерні криві деформації матеріалу з ізотропним зміцненням без пошкоджень (---) та при наявності пошкоджень (—) при статичній швидкості деформації ($\dot{\epsilon} = 0$) та швидкості більшій за статичну ($\dot{\epsilon} > 0$)

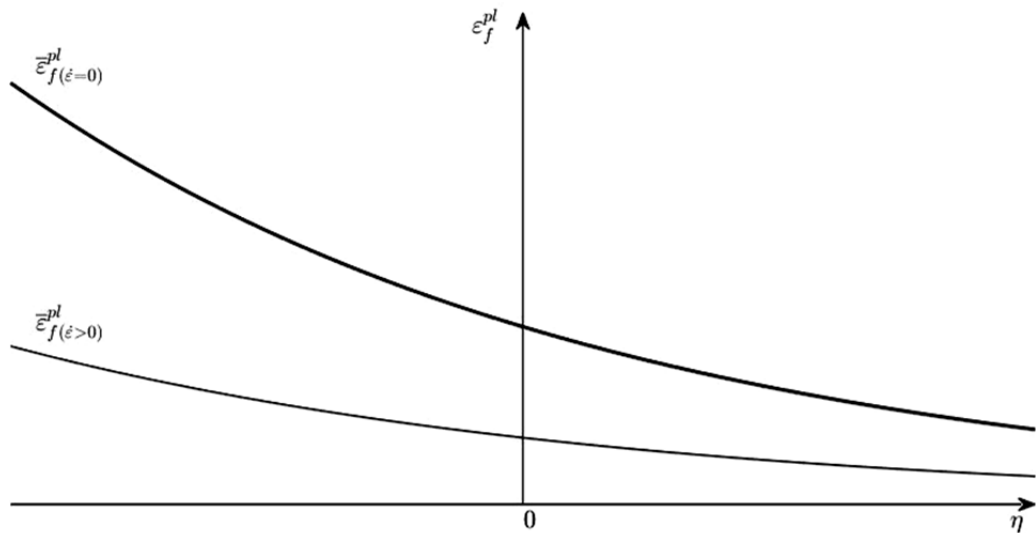


Рисунок 3.6 – Характерні криві діаграми пластичності пластичного матеріалу при статичній швидкості деформації ($\dot{\epsilon} = 0$) та швидкості більшій за статичну ($\dot{\epsilon} > 0$)

Як зазначалося раніше (див. підрозділ 2.2), підхід Хіллеборга дозволяє закон розвитку пошкоджень в матеріалі визначити у вигляді еквівалентного пластичного переміщення \bar{u}^{pl} , що потребує визначення характеристичної довжини L , пов'язаної з точкою інтегрування.

Складність визначення характеристичної довжини L при моделюванні процесів розділення міститься в тому, що в міру наближення до руйнування розмір елементів, за рахунок зменшення розмірів перерізу в зоні руйнування, поступово зменшується (див. рис. 3.3, г). Вочевидь найбільше зменшення розмірів елементів має місце у більш пластичних матеріалів, тобто в умовах гарячого розрізання.

На рис. 3.7 приведені гістограми розподілу площі елементів перед руйнуванням S_e , тобто перед тим, коли елемент виключається з розрахунку. Розподіли площі елементів перед руйнуванням при розрізанні у гарячому стані представлені для відповідних марок сталі і температур. Кожна вибірка складала N скінченних елементів із середнім значенням їх площі перед руйнуванням \bar{S}_e та стандартним відхиленням $\bar{\sigma}$ із зазначенням рівня значущості p при якому неможна відхилити нульову гіпотезу.

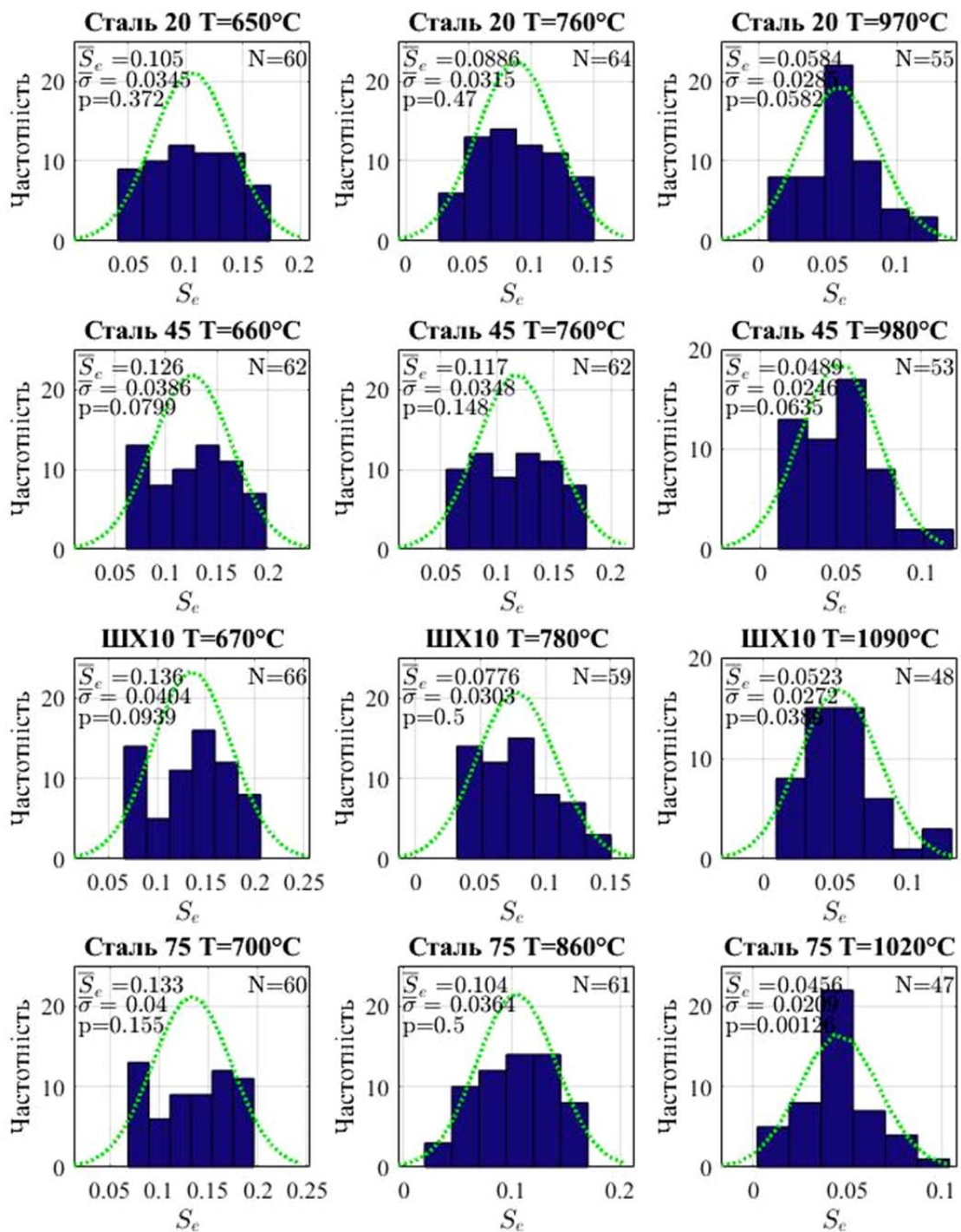


Рисунок 3.7 – Гістограми розподілу площі елементів S_e перед руйнуванням при розрізанні у гарячому стані відповідних марок сталі вибірка яких складала N скінченних елементів із середнім значенням \bar{S}_e та стандартним відхиленням $\bar{\sigma}$ із зазначенням рівня значущості p при якому неможна відхилити нульову гіпотезу

Отримані результати можуть свідчити, що переважно площа елементів перед руйнуванням відповідає нормальному розподіленню. Серед можливих факторів впливу на площу елементів перед руйнуванням \bar{S}_e можна відзначити температуру розрізання T та відносне проникнення ε_H (рис. 3.8). Виходячи зі значення коефіцієнта кореляції R більш тісним є зв'язок площі елементів перед руйнуванням \bar{S}_e із відносним проникненням ε_H , для якого $R = -0,9246$.

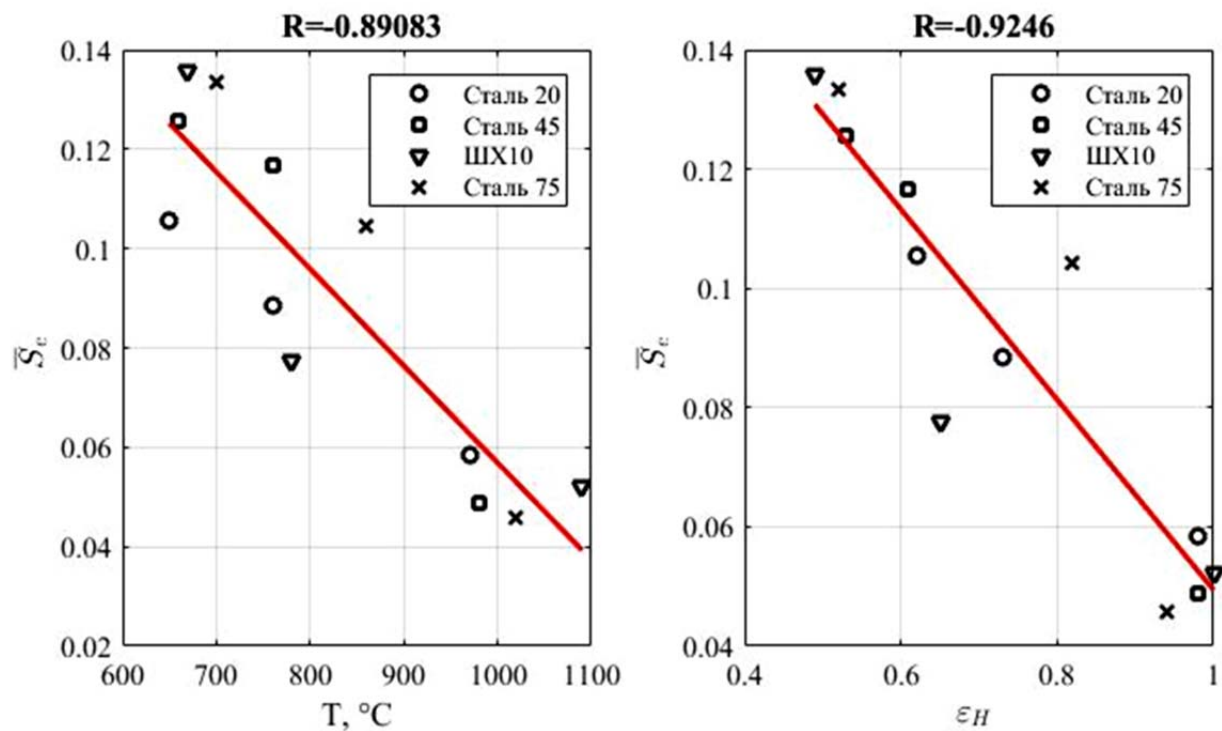


Рисунок 3.8 – Залежності середнього значення площі елементів перед руйнуванням \bar{S}_e від температури розрізання T та відносного проникнення ε_H із зазначенням коефіцієнта кореляції R

Крім того, можна зазначити, що відносне проникнення ε_H має більш тісний зв'язок із ефективним пластичним переміщенням \bar{u}_f^{pl} (рис. 3.9).

Так, коефіцієнт кореляції між величиною ефективного пластичного переміщення, при якому відбувається повне руйнування \bar{u}_f^{pl} , і температурою розрізання T становить 0,90546, тоді як, щодо відносного проникнення ε_H коефіцієнт кореляції 0,99033. Таким чином, при моделюванні процесів розділення, по аналогії із

підходом Хіллеборга значення ефективного пластичного переміщення, при якому відбувається повне руйнування \bar{u}_f^{pl} , має визначатися виходячи із відносного проникнення ε_H ножів в метал.

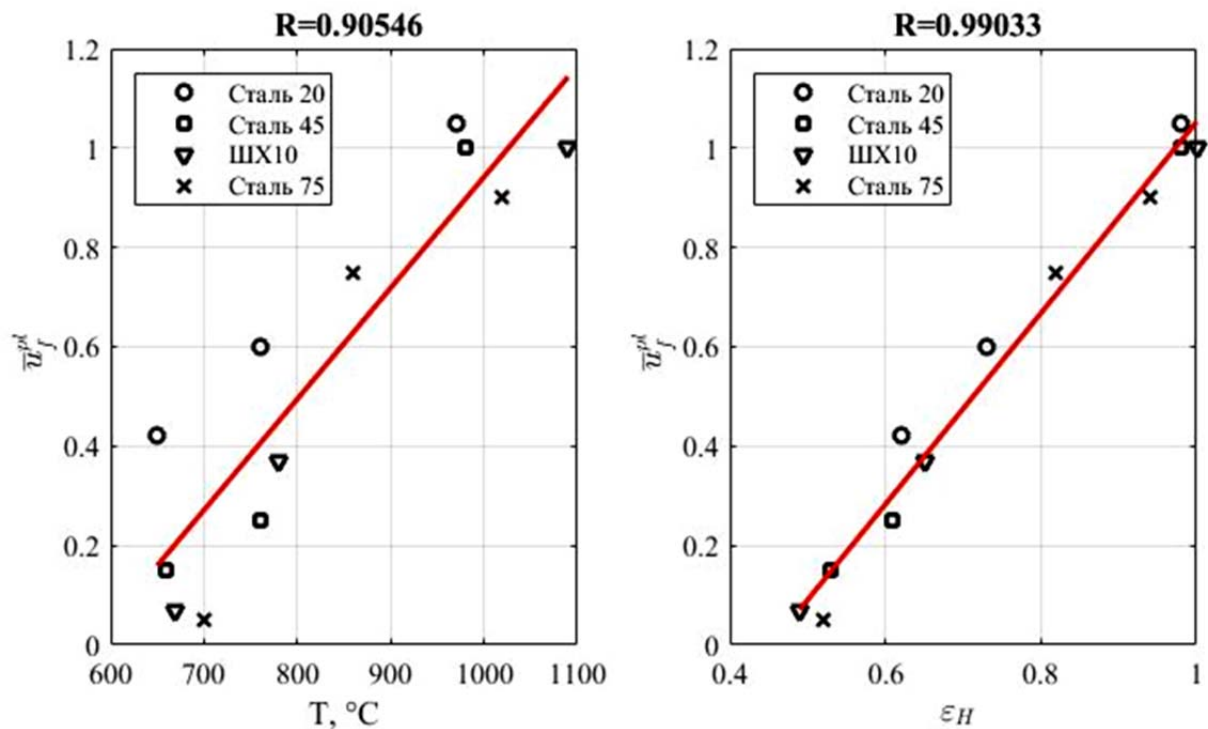


Рисунок 3.9 – Залежності ефективного пластичного переміщення, при якому відбувається повне руйнування \bar{u}_f^{pl} , від температури розрізання T та відносного проникнення ε_H із зазначенням коефіцієнта кореляції R

Спираючись на відомі дані про моделі пошкодження [348] було вирішено в ході обчислень використовувати функції, які мають лінійний або близький до лінійного характер. В процесі моделювання змінювали два параметри, що характеризують накопичення пошкоджень в металі (табл. 3.3) – ефективне пластичне переміщення при якому відбувається повне руйнування \bar{u}_f^{pl} і показник закону накопичення пошкоджуваності α , оскільки вони суттєво залежать від температури матеріалу і впливають на його поведінку і характер змінювання сили розрізання в ході процесу. При цьому знак показника α впливає на інтенсивність накопичення пошкоджень в металі, а саме при від'ємному значенні показника, інтенсивність

при наростанні ефективного пластичного переміщення \bar{u}_f^{pl} зростає, а при позитивному – знижується.

Таблиця 3.3 – Значення параметрів, що характеризують накопичення пошкоджень в металі при моделюванні процесу розрізання

Номінальна температура процесу, °C	\bar{u}_f^{pl}	α
600	0,34	-3...3
700	0,4	-3...3
800	0,46	-1...1

В якості досліджуваного матеріалу була обрана сталь 09Г2. Механічні властивості для обраної марки сталі визначали за хімічним складом [342].

За результатами моделювання були отримані залежності зміни сили розрізання P_1 , що припадає на 1 мм ширини (рис. 3.10) від відносного проникнення ε ножів в метал при різних температурах і значеннях параметрів накопичення пошкоджень в металі. Зокрема, зміна показника α закону накопичення пошкоджуваності істотно впливає на результати моделювання завершальної стадії процесу розрізання на ножицях. При цьому можна відзначити наступні тенденції:

- застосування моделі зі зростаючою інтенсивністю накопичення пошкоджень в металі ($\alpha < 0$) сприяє більш пізньому розділенню металу по відношенню до лінійної моделі ($\alpha = 0$) використання пластичності, тоді як застосування моделі зі зменшенням інтенсивності накопичення пошкоджень в металі ($\alpha > 0$) призводить до скорочення тривалості процесу;

- сила розрізання в залежності $P_1 = f(\varepsilon)$ приймає своє максимальне значення в діапазоні $\varepsilon = 0,2 \dots 0,5$, причому менші значення відповідають зменшуваній інтенсивності накопичення пошкоджень, а великі – зростаючій;

- в ширшому діапазоні зміни показника α (див. рис. 3.10, а, б) можна спостерігати зміну залежності сили розрізання при певних значеннях α (при темпе-

ратурі 600°C для $\alpha=3$, а при 700°C – для $\alpha=1$), коли отримані результати в більшій мірі узгоджуються з відомими експериментальними даними.

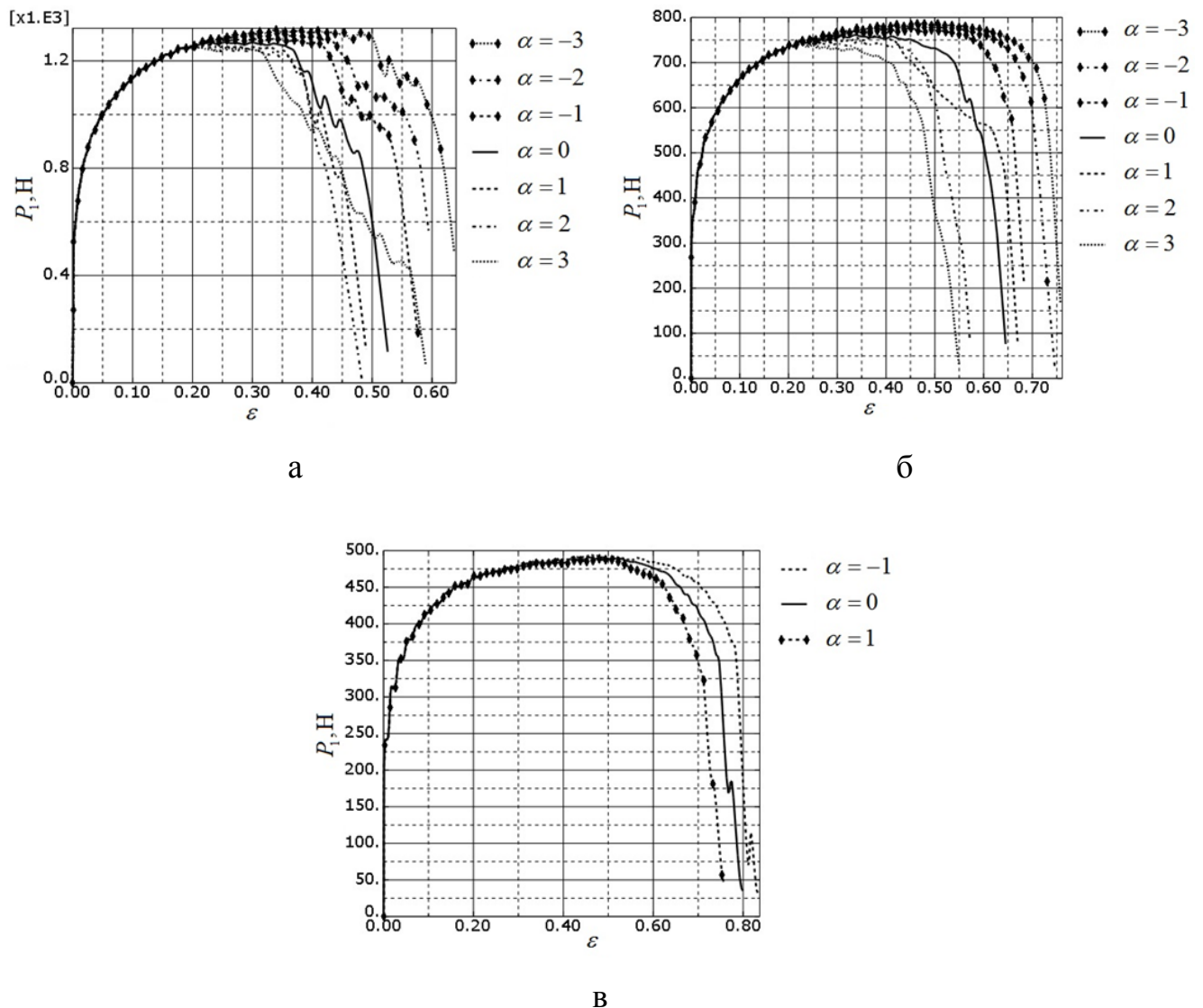


Рисунок 3.10 – Графіки зміни сили розрізання P_1 , що припадає на 1 мм ширини від відносної глибини проникнення ε при різних температурах і показниках накопичення пошкоджуваності α

3.4 Жорсткість станини

Порівняльний аналіз результатів математичного моделювання [344, 345] і експериментальних даних [276] процесу гарячого розрізання на ножицях з паралельними ножами, вказав на відмінності між теоретичною залежністю сили розрі-

зання (отриманої за результатами математичного моделювання) і експериментальними кривими на початковому і заключному етапах реалізації процесу розрізання, хоча величина максимальної сили розрізання при цьому збігається.

У класичному уявленні (див. підрозділ 1.3) процес розрізання на ножицях поділяють на три стадії: вмінання ножів в метал, власне розрізання і сколювання. При цьому, саме на етапі вмінання спостерігається плавне збільшення сили розрізання. Даний факт, може свідчити, що процес вмінання супроводжується пружною деформацією станини ножиць, а її врахування в ході математичного моделювання дозволить наблизити результати теоретичних рішень до експериментальних даних.

З цією метою була розроблена скінченно-елементна математична модель (рис. 3.11), яка описувала плоску задачу розрізання паралельними ножами і враховувала жорсткість станини [346, 353-355].

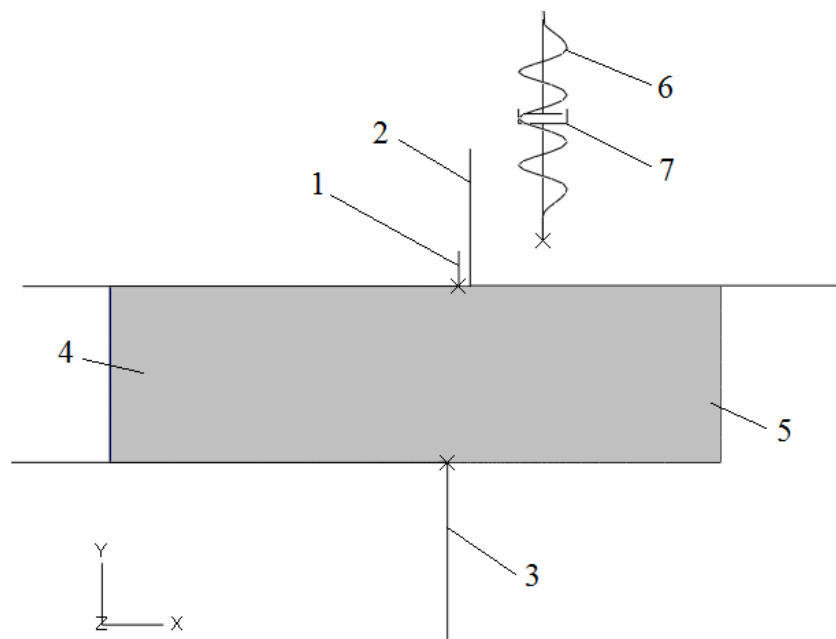


Рисунок 3.11 – Загальний вигляд моделі розрізання паралельними ножами з урахуванням пружної деформації станини

Модель (див. рис. 3.11) включає три абсолютно жорсткі (такі що не деформуються) компоненти – притиск 1, ножі верхній 2 і нижній 3, а також деформований брус, що моделює лист 4 і відрізувану кромку 5. З метою врахування пружної

деформації станини до складу моделі входить пружний елемент 6, а для виключення значних динамічних коливань – в'язкий демпфер 7.

При цьому за аналогією з реальною конструкцією лабораторних ножиць з нижнім розрізанням рухаються одночасно нижній ніж і притиск, тоді як верхній ніж може зміщуватися, тільки долаючи жорсткість (пружну деформацію) станини.

Сітка бруса складалася з ізопараметричних чотирикутних лінійних елементів з редукованою схемою інтегрування, що мають властивості суцільного деформованого середовища в умовах плоскої деформації.

НДС металу під час розрізання представлено на рис. 3.12.

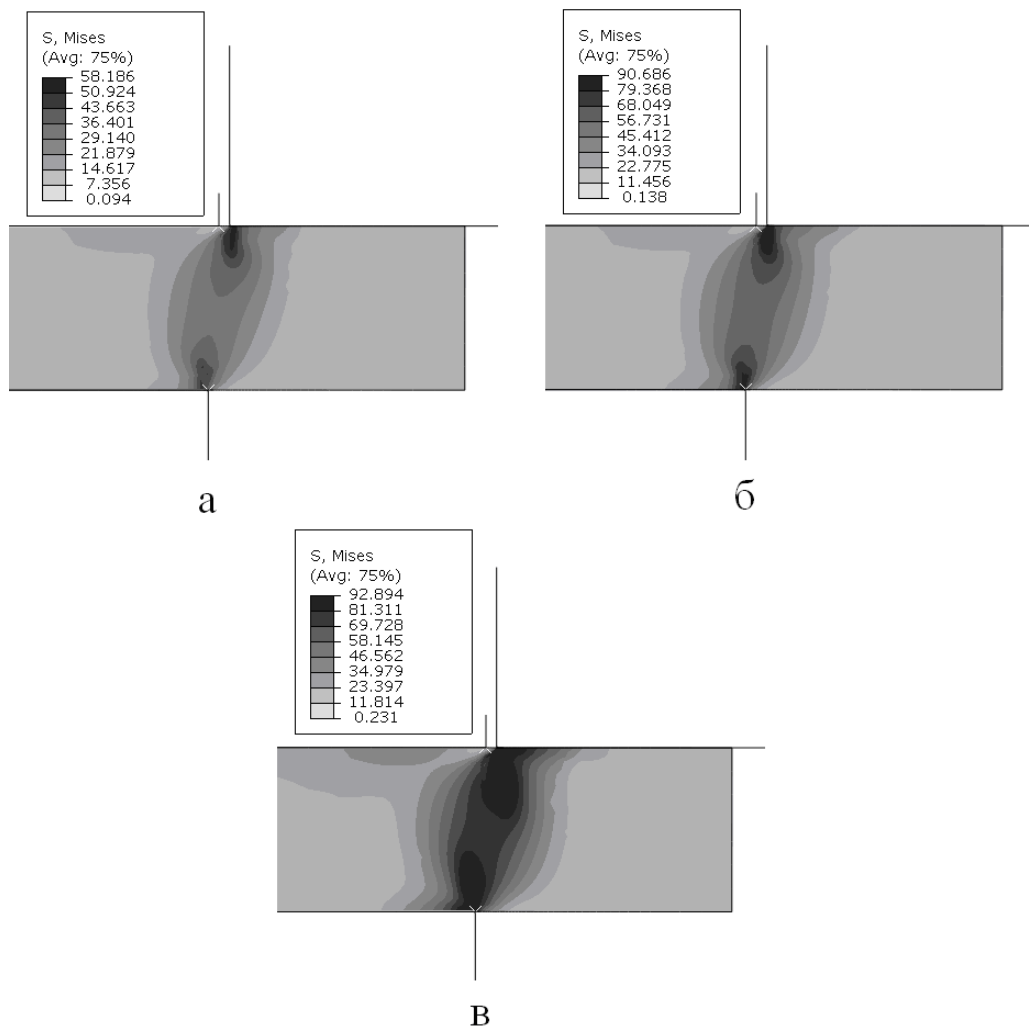


Рисунок 3.12 – Епюри розподілу напружень по Мізесу на різних етапах вминання: а – 0,02 с; б – 0,04 с; в – 0,06 с

Інструменти моделювали як аналітичні поверхні, що не деформуються.

На ліву вільну поверхню бруса накладено обмеження по його переміщенню уздовж осі X .

Для опису механічних властивостей матеріалу заготовки використовували дані роботи [345]. Руйнування матеріалу моделювали методом виключення елементів з розрахунку, після вичерпання ресурсу пластичності.

Вихідними даними для розрахунку були прийняті умови, при яких були отримані експериментальні залежності. Товщина розрізуваного листа – 10 мм, ширина відрізуваної кромки – 15 мм, номінальна температура процесу – 650°C, швидкість розрізання – 28 мм/с. З огляду на те, що на основі цієї моделі вирішується плоска задача, то жорсткість станини ножиць приймали як величину наведену до одиниці ширини розрізуваної заготовки.

За результатами моделювання були отримані залежності зміни в часі сили розрізання, що припадає на 1 мм ширини (рис. 3.13) і величини проникнення ножів в метал (рис. 3.14).

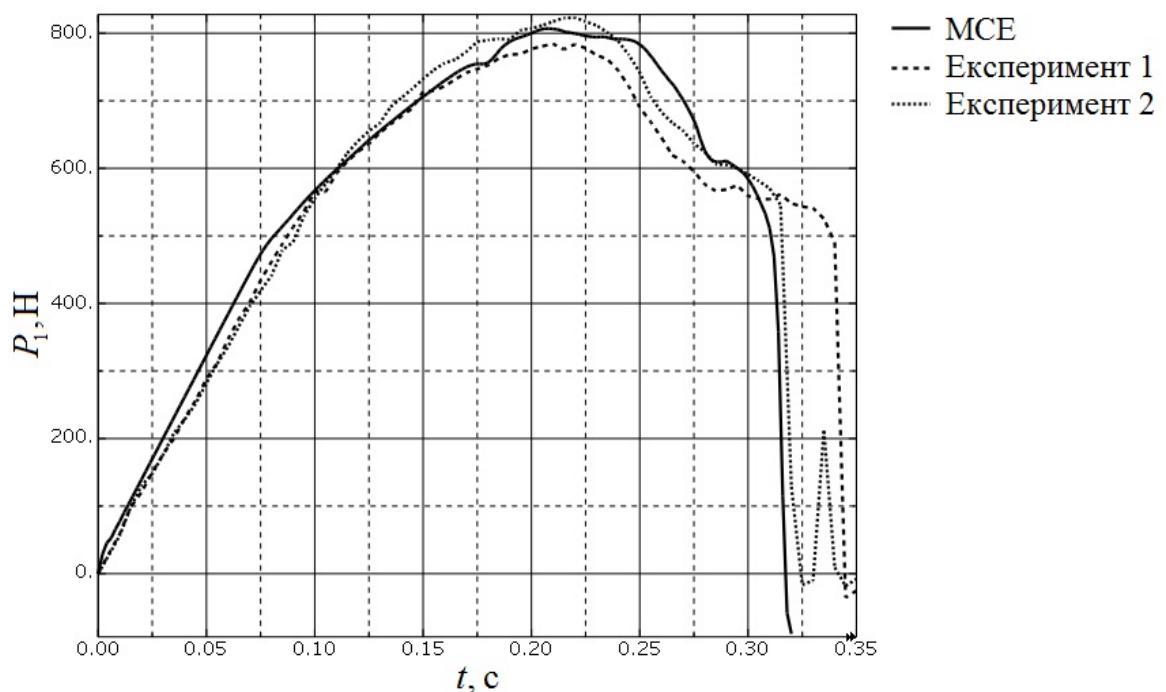


Рисунок 3.13 – Залежності зміни в часі t сили розрізання P_1 , що припадає на 1 мм ширини за результатами експериментів і моделювання МСЕ

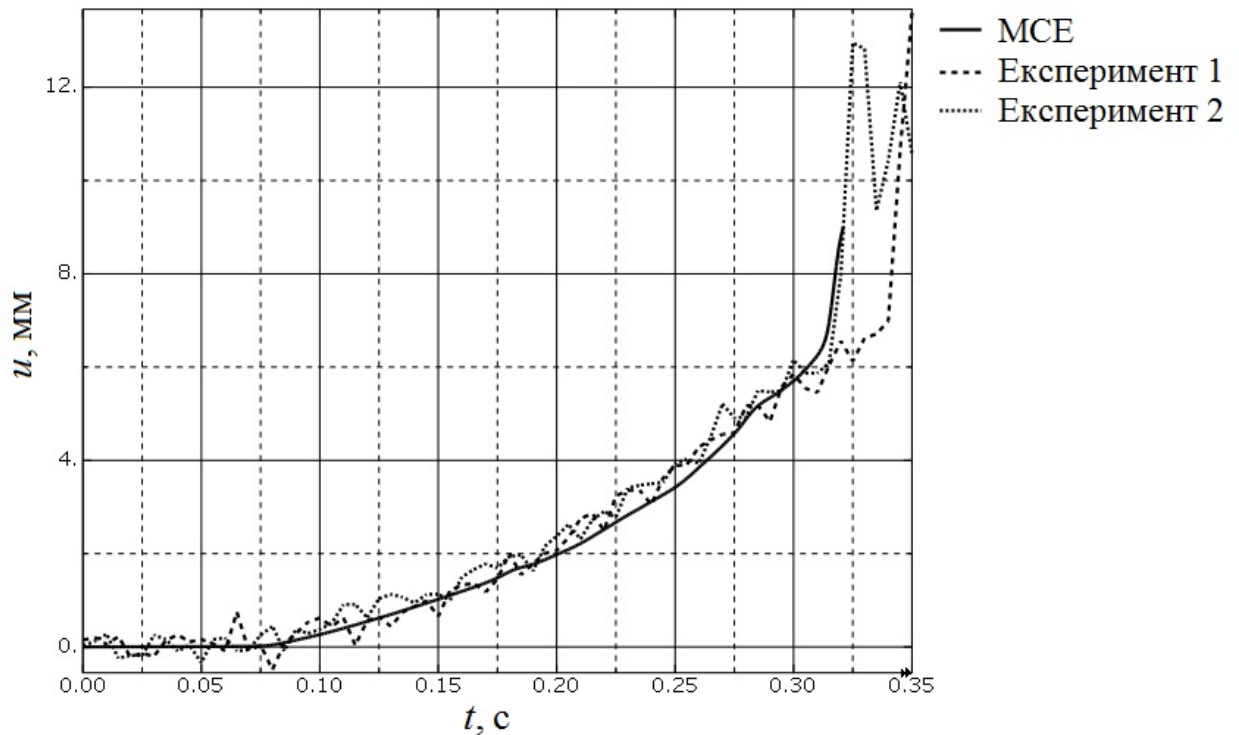


Рисунок 3.14 – Залежності зміни в часі зближення ножів за результатами експериментів і моделювання MSE

Як можна бачити представлені залежності результатів моделювання MSE в цілому добре узгоджуються з експериментальними даними.

3.5 Врахування термодинамічних явищ в моделюванні процесів розділення

Ще одним з важливих аспектів процесів розділення металопрокату є термодинамічні процеси, що відбуваються в ході деформування. Вочевидь, що процес розрізання супроводжується зміною температури в зоні розрізання і, як наслідок, зміною механічних властивостей розрізаного металу.

Для оцінки впливу тепла, що виділяється при деформації і руйнуванні матеріалу, на енергосилові параметри процесу розрізання скінченно-елементні математичні моделі процесів розрізання доцільно доповнювати можливістю врахування термодинамічних ефектів при деформації матеріалу [356].

Зокрема на рис. 3.15 представлені поля розподілу температури в осередку розрізання при моделюванні процесу за умови врахуванням деформаційного нагріву при певній температурі початку процесу.

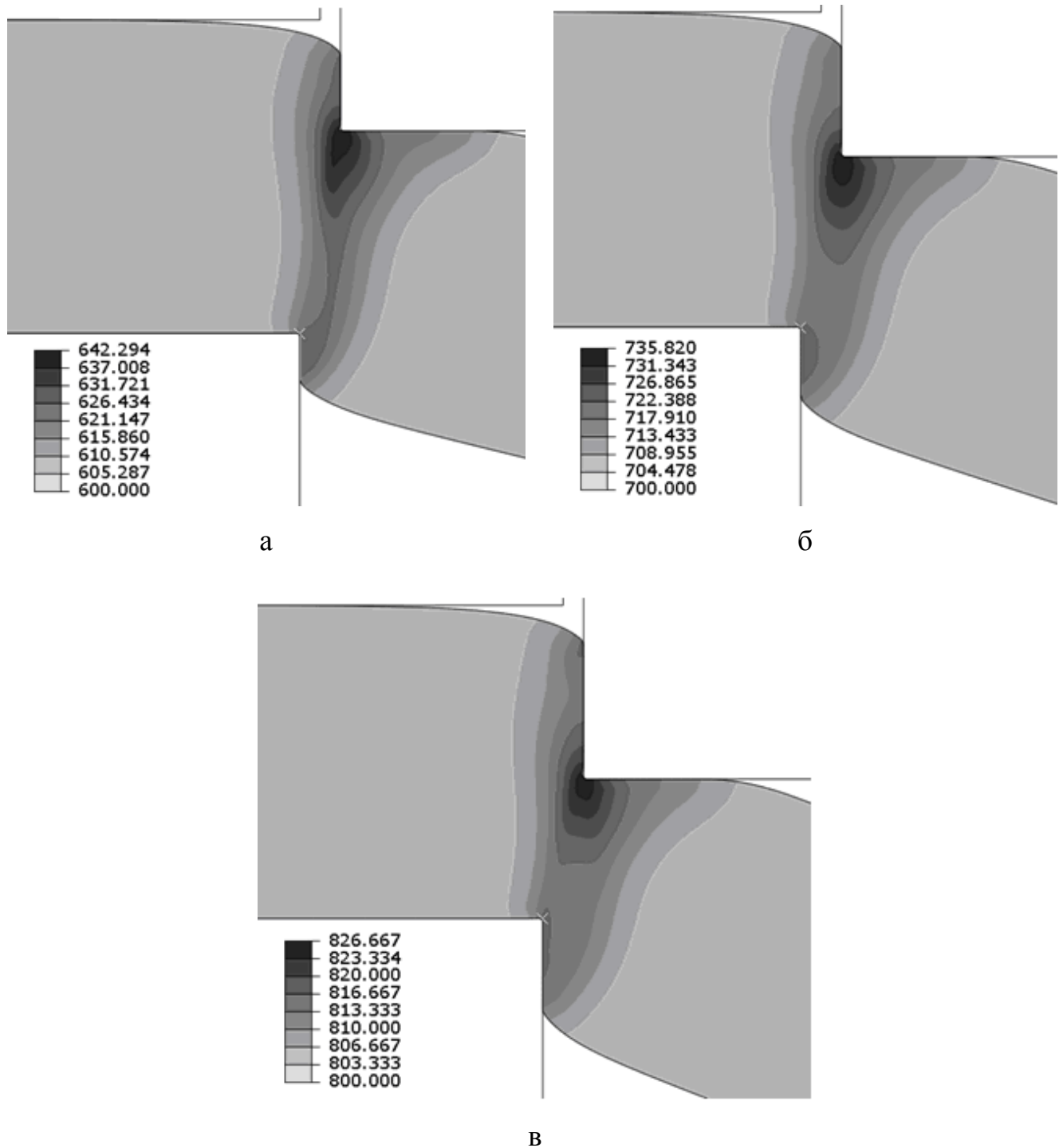


Рисунок 3.15 – Розподіл температури в осередку розрізання при моделюванні процесу з урахуванням деформаційного нагріву при температурі початку процесу: а – 600°C; б – 700°C; в – 800°C

Як можна бачити з представлених полів розподілу, незалежно від вихідної температури, при реалізації процесу в осередку розрізання спостерігається зростання температури. При цьому максимальне зростання спостерігається в області прилеглий до вершини верхнього ножа, оскільки саме в цьому місці спостерігаються найбільша інтенсивність пластичних деформацій.

Крім того, можна відзначити, що зі зменшенням температури початку процесу інтенсивність її зростання підвищується, при чому досягається цей ефект за більш короткий проміжок часу.

Оцінюючи величину зростання температури в осередку розрізання, яка для даних умов склала $27...43^{\circ}\text{C}$ і з огляду на залежність механічних властивостей матеріалу від температури, можна стверджувати, що деформаційний нагрів впливає на енергосилові параметри процесу.

Для оцінки термодинамічного впливу на енергосилові параметри процесу були отримані залежності сили розрізання P_1 , що припадає на 1 мм ширини розрізуваної заготовки в функції відносного проникнення ε ножів в метал (рис. 3.16). Для порівняння також були отримані залежності сили розрізання без урахування деформаційного нагріву.

Аналіз показує, що не зважаючи на температуру залежність сили розрізання від відносної глибини проникнення при врахуванні деформаційного нагріву дещо змінюється, при цьому, для даних умов, спостерігається зниження максимального значення сили розрізання до 7%.

Таким чином, можна стверджувати, що при моделюванні процесу розрізання необхідно враховувати термодинамічні ефекти, оскільки їх вплив на енергосилові параметри процесу є досить істотним. Крім того, це дозволить розширити уявлення про протікання процесу і вдосконалити методи розрахунку енергосилових та геометричних характеристик процесів розрізання на ножицях.

Вочевидь, що для розширення уявлення про процес розрізання необхідно провести аналіз НДС металу в осередку деформації і встановити причинно-наслідкові зв'язки процесу.

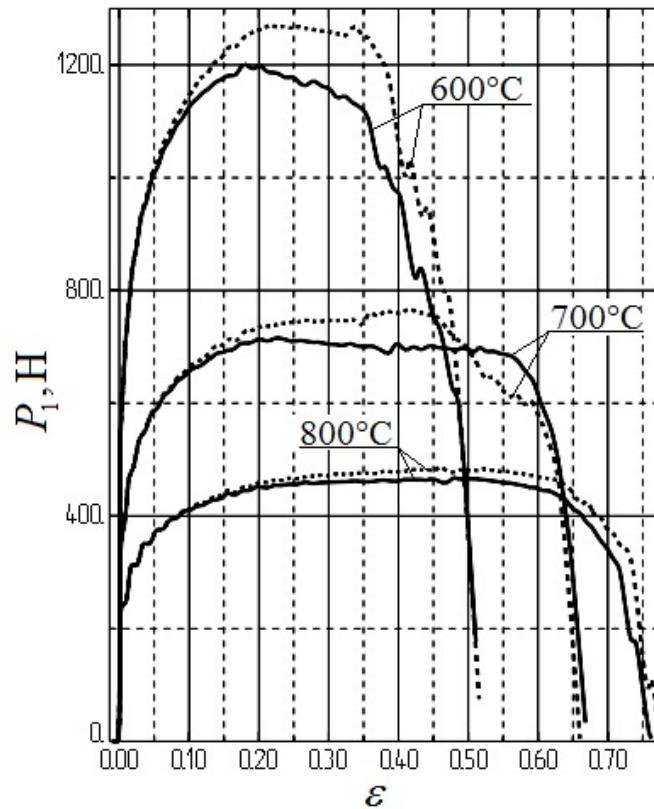


Рисунок 3.16 – Залежності зміни сили розрізання P_1 , що припадає на 1 мм ширини розрізуваної заготовки в функції відносного проникнення ϵ ножів в метал з урахуванням деформаційного нагріву (—) і без (---), при різних температурах розрізуваної заготовки

В роботі [344] показано, що використання результатів даного дослідження для інших температурних умов не призводить до задовільного результату, що вказує, насамперед, на рішення обмеженої задачі і дещо спрощене уявлення про протікання процесу розрізання.

Тому, на наступному кроці вивчення процесу розрізання була використана скінченно-елементна (СЕ) модель, описана вище. Значення параметрів, що характеризують накопичення пошкоджень в металі, при моделюванні процесу розрізання брали виходячи з лінійної функції ($\alpha = 0$), а ефективне пластичне переміщення, до руйнування \bar{u}_c^{pl} , брали відповідно до табл. 3.3.

Показник жорсткості станини ножиць склав $C = 2000 \frac{H/мм}{мм}$.

За результатами моделювання були отримані залежності зміни в часі сили розрізання P_1 , що припадає на 1 мм ширини (рис. 3.17, а) та абсолютної величини проникнення u ножів в метал (рис. 3.17, б) при різних температурах.

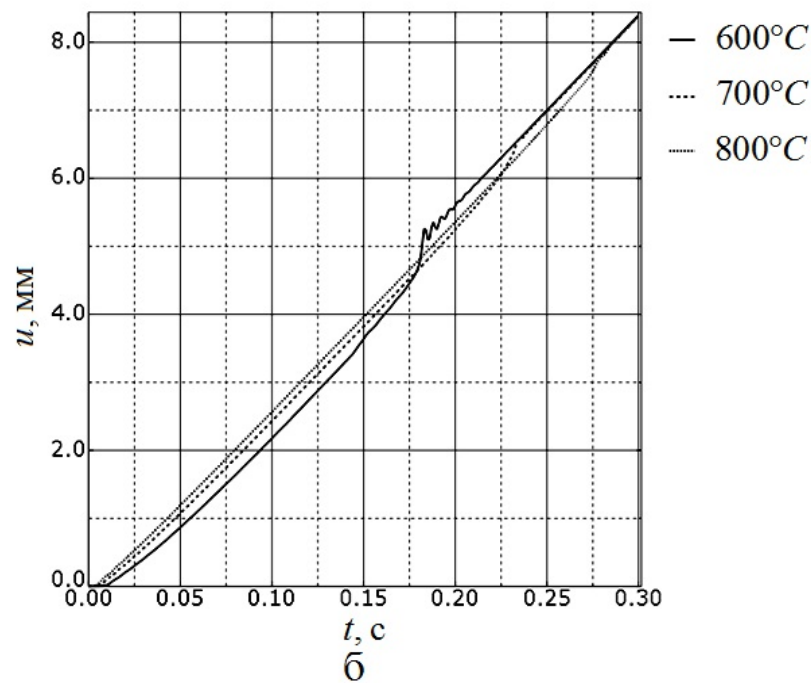
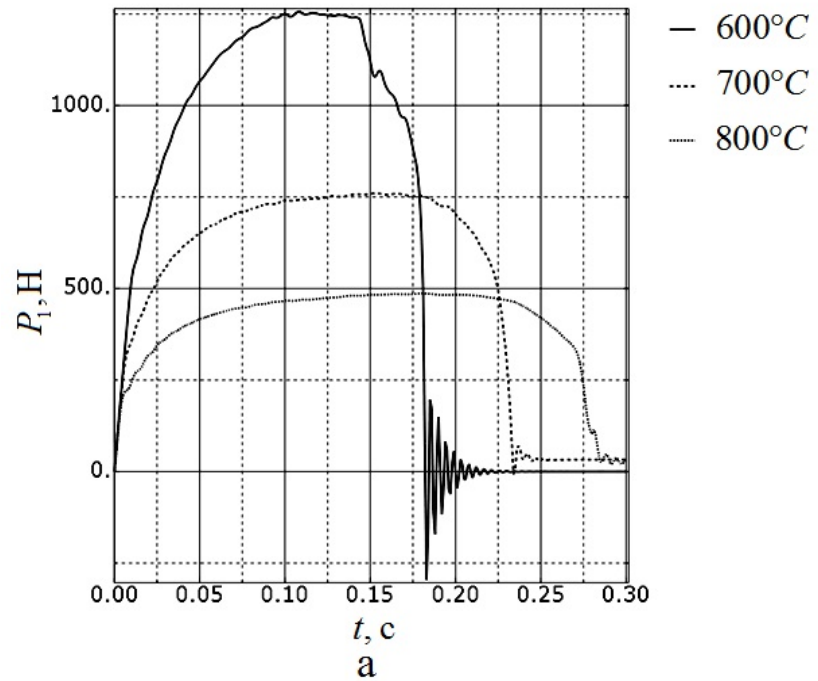


Рисунок 3.17 – Залежності зміни в часі сили розрізання, що припадає на 1 мм ширини (а) і абсолютної величини проникнення ножів в метал (б) за результатами моделювання при різних температурах

Аналіз кривих сили розрізання показує, що на початковому етапі проникнення спостерігається однаковий характер наростання сили. У той же час, на графіках залежностей проникнення ножів у метал спостерігається проникнення дуже близьке до нуля. Таку поведінку можна пояснити пружною деформацією станини до моменту початку зростання пластичних деформацій в металі. Тож врахування пружної деформації станини при моделюванні процесів поперечного розрізання паралельними ножами є обов'язковою умовою для отримання адекватних результатів та усвідомлення процесів, що відбуваються в металі.

3.6 Розробка алгоритму отримання та обробки даних моделювання

Головною перевагою застосування МСЕ при дослідженні процесів, що відбуваються в металі, є можливість отримати інформацію про НДС металу в зоні безпосереднього руйнування, що практично неможливо отримати при експериментальних дослідженнях.

Достовірність цієї інформації можна вважати максимально наближеною до реальності, за умови відповідності енергосилових показників процесів, зокрема сили розрізання при відповідних значеннях відносного проникнення ножів метал, оскільки ці показники можливо отримати експериментальним шляхом.

Подальше вивчення НДС металу при реалізації процесів розділення доцільно здійснювати через інтегральні показники результатів симуляцій, до яких, зокрема, належать еквівалентні напруження та пластичні деформації, що визначаються в точках інтегрування для кожного скінченного елемента в ході симуляції.

Крім того, можна отримувати параметри, що визначаються для вузлів скінченних, зокрема їх координати. При цьому частоту отримання цієї інформації, можна визначати на стадії розробки відповідної моделі.

В подальшому можливо передати відповідні дані до будь-якого пакету прикладних програм для вирішення задач технічних розрахунків. Зокрема в рамках даної роботи використовували пакет MatLab. Слід зазначити, що можливості обробки даних існують безпосередньо в Abaqus, проте їхня функціональність є до-

силь обмеженою та потребує значних затрат часу, котрі суттєво збільшуються при збільшенні числа симуляцій.

Загальний алгоритм отримання та обробки даних може бути представлений з наступної послідовності дій:

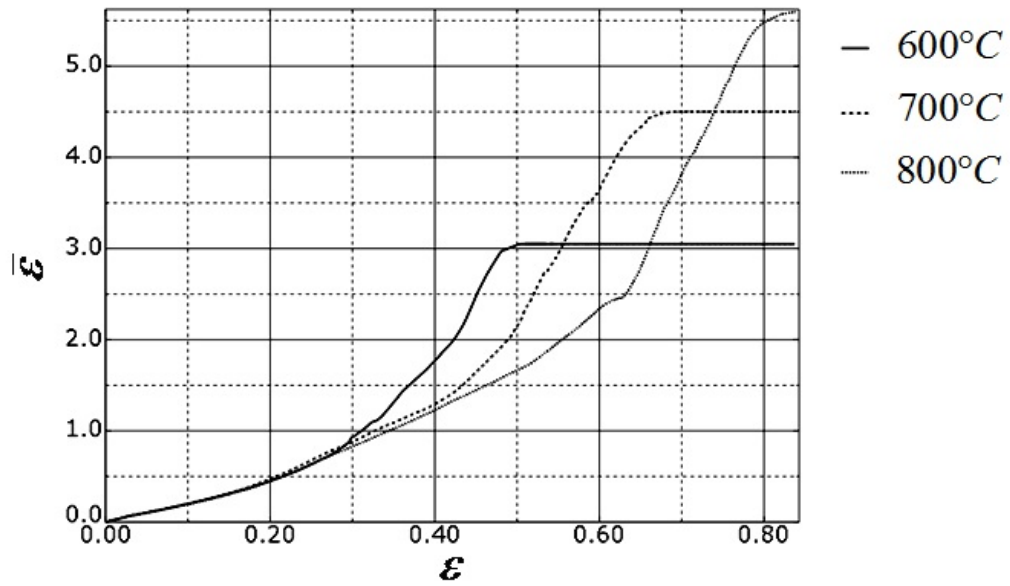
- 1) постановка задачі;
- 2) розробка математичної моделі безпосередньо в Abaqus шляхом створення моделі в Abaqus Caе або шляхом створення скрипт-файлу (файл вхідних даних до моделювання) з використання програмних засобів розроблених в пакеті MatLab або іншому мові програмування;
- 3) симуляція задачі в Abaqus;
- 4) формування файлу даних результатів симуляції з подальшим перетворенням їх до формату придатного для обробки в пакеті технічних розрахунків, зокрема MatLab;
- 5) розробка програмних засобів в MatLab для обробки результатів симуляції.

Далі приведено практичне застосування даного алгоритму. Зокрема для встановлення зв'язку між відносною глибиною проникнення ножів в метал ε і величиною пластичної деформації (рис. 3.18) в процесі розрізання.

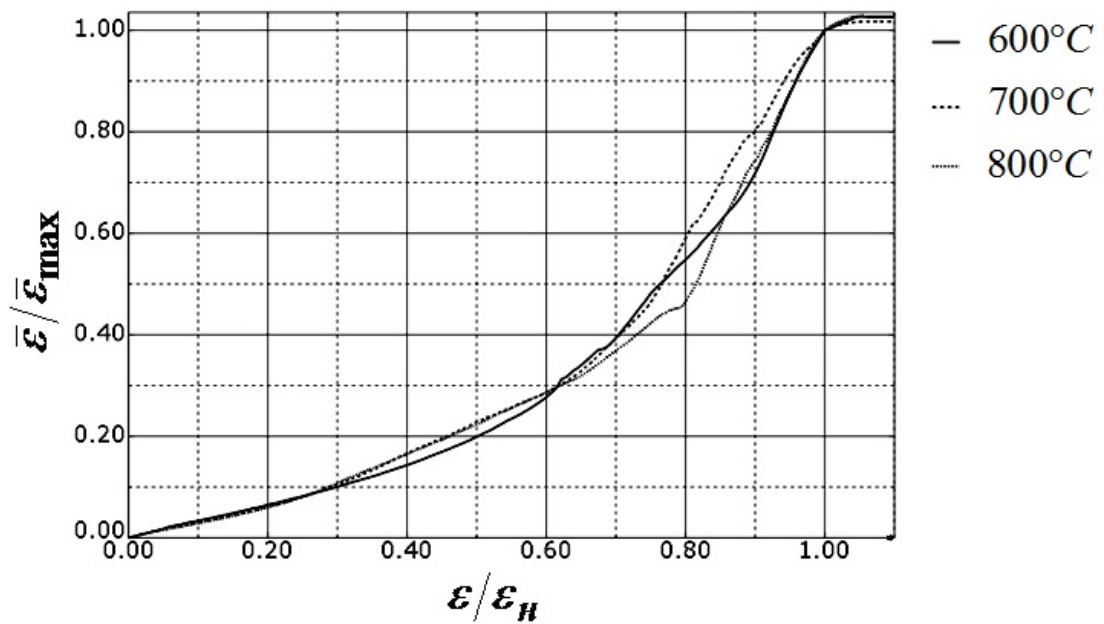
Оскільки величина пластичної деформації в ході процесу розрізання являє собою інтегральний показник, спочатку були визначені елементи, які зазнають руйнування і величини пластичної деформації для відповідних їм елементарних об'ємів [357].

Так на рисунку 3.18, а представлені залежності накопичення пластичної деформації $\bar{\varepsilon}$ (усереднені значення для всіх елементів, що руйнуються) в розрізуваному перерізі від відносної глибини проникнення ε .

При обробці отриманих даних були визначені значення відносного проникнення ножів до сколювання і відповідні їм значення пластичної деформації (при повному руйнуванні розрізуваного перерізу) при різних температурах (табл. 3.4).



а



б

Рисунок 3.18 – Залежності накопичення пластичної деформації від відносної глибини проникнення: а – усереднені для всіх елементів, що руйнуються; б – перетворені до відносних (одиничних) координат

Таблиця 3.4 – Показники, відповідні руйнуванню розрізуваного перерізу (за результатами моделювання)

Температура, °C	Відносне проникнення до сколювання ε_H	Ступінь пластичної деформації при руйнуванні $\bar{\varepsilon}_{\max}$
600	0,481	2,97
700	0,658	4,42
800	0,793	5,43

В ході аналізу залежності пластичної деформації в розрізуваному перерізі від відносної глибини проникнення (див. рис. 3.18, а) було відзначено схожість між даними залежностями за умови перетворення їх до відносних (одиничних) координат (див. рис. 3.18, б). Як впливає з рисунку 3.18, б в відносних координатах, незалежно від температури всі три залежності мають практично ідентичний вигляд (відмінності можна пояснити похибками при визначенні усереднених значень пластичної деформації). Даний факт вказує на функціональний зв'язок між пластичною деформацією і відотною глибиною проникнення.

За аналогією з роботою [344], на підставі результатів моделювання були отримані залежності зміни істинного опору зрізу $\tau_{\bar{\varepsilon}}$, що характеризують відношення сили розрізання до залишкової площі розрізуваного перерізу, в залежності від глибини відносного проникнення ножів ε .

Потім, істинний опір зрізу було представлено в функції пластичної деформації $\tau_{\bar{\varepsilon}} = f(\bar{\varepsilon})$ і отримані співвідношення $\tau_{\bar{\varepsilon}}/\bar{\sigma}$, які для різних температур представлені на рис. 3.19.

Математична обробка залежностей представлених на рис. 3.19, дозволила виявити наступний функціональний зв'язок:

$$\frac{\tau_{\bar{\varepsilon}}}{\bar{\sigma}} = \left[\frac{1}{\sqrt{3}} + \bar{\varepsilon} \frac{\bar{\varepsilon}_{\max} \sqrt{\varepsilon_H}}{32} \right] \cdot \left[1 - \frac{e^{-8\bar{\varepsilon}}}{2 + \sqrt{2}} \right]. \quad (3.1)$$



Рисунок 3.19 – Співвідношення $\tau_{\bar{\epsilon}}/\bar{\sigma}$ між кривими опору зрізу і кривими текучості за результатами моделювання для різних температур

Потім були отримані криві текучості матеріалу, які порівнювали з залежностями напруження-деформація $\bar{\sigma} = f(\bar{\epsilon})$, застосовувані при моделюванні процесу розрізання (рис. 3.20). Як можна бачити представлені залежності напруження-деформація мають досить високий ступінь збіжності з теоретичними кривими, що вказує на можливість отримання кривих напруження-деформація на базі експериментальних кривих сили розрізання на ножицях. Дані залежності добре узгоджуються з характерними кривими деформації матеріалу з ізотропним зміцненням без пошкоджень та при наявності пошкоджень (див. рис. 3.5).

Таким чином, наявність розбіжності між кривими при зростанні інтенсивності деформацій можна пояснити тим, що в міру зростання деформації в матеріалі заготовки поступово накопичуються пошкодження, які певною мірою впливають на поведінку матеріалу. Вочевидь, що експериментальні залежності сили розрізання можна використовувати для побудови кривої текучості матеріалу.

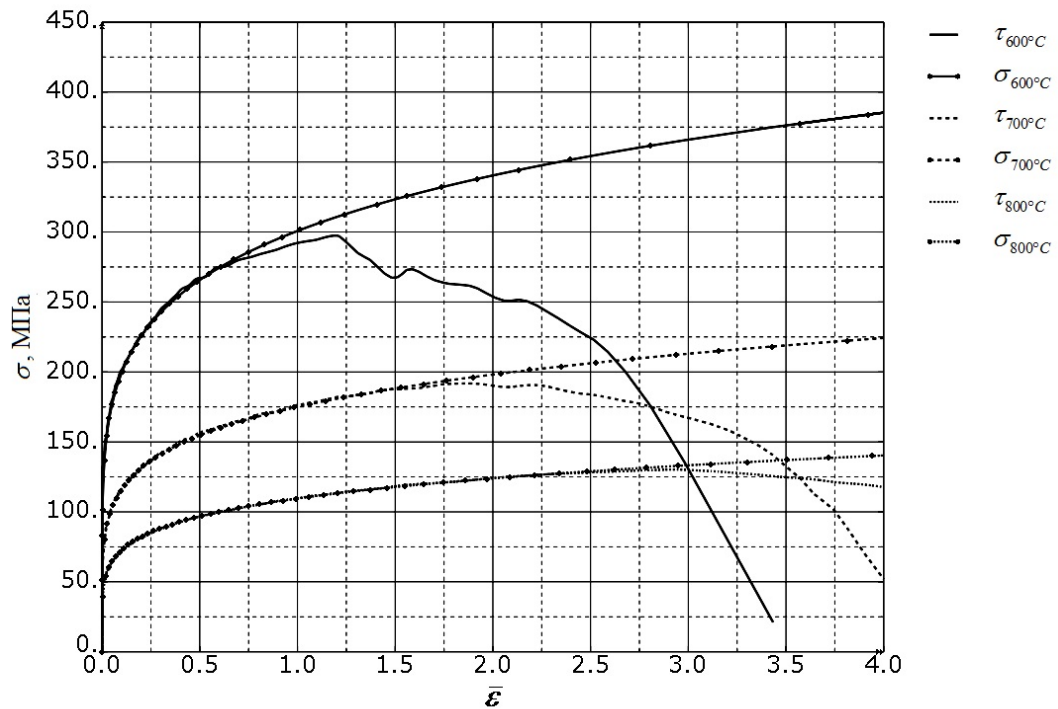


Рисунок 3.20 – Залежності напруження-деформація $\sigma(\epsilon)$ використовувани при моделюванні (\bullet) в порівнянні з кривими опору розрізанню $\tau(\epsilon)$ отриманими за його результатами на базі кривих сили розрізання на ножицях за допомогою виразу (3.1) при різних температурах

3.7 Вибір моделей механічних властивостей матеріалу

Дотримання необхідних умов (див. підрозділ 2.2) при моделюванні процесів розрізання на ножицях, зокрема в гарячому стані, представляється непростю задачею, оскільки діапазон робочих температур [13, 40, 276] недостатньо досліджений на предмет пластичних властивостей розрізуваних сталей [342].

Для отримання відомостей про поведінку металу, в процесі деформування, як правило, використовують випробування на розтягнення, що значно обмежує діапазон експериментальних результатів. Відомо, що граничні деформації, що досягаються при випробуванні на розтягування металу в холодному стані, складають 0,2...0,4, а при гарячому деформуванні можуть досягати 1,0 в залежності від

температури випробувань. Зазначені значення в кілька разів нижче справжніх деформацій в локальних об'ємах заготовок при обробці металів тиском. Встановлено, що перед руйнуванням інтенсивності деформацій можуть досягати в кілька разів більших значень [296, 325]. Для отримання експериментальних даних в більш широкому діапазоні необхідно використовувати спеціальне обладнання, яке є досить дорогим. Саме тому результати випробувань на розтягування за стандартними методиками необхідно екстраполювати в сторону великих деформацій, що мають місце при обробці металів тиском.

Таким чином коректний вибір моделі механічних властивостей матеріалу просто необхідний для підвищення достовірності результатів моделювання і отримання, на їх базі, узагальнених залежностей.

У зв'язку з цим вельми привабливим представляється використовувати відомі методики розрахунку опору деформації під час гарячої прокатки [343, 358-361].

В даний час розроблено досить велику кількість методик розрахунку опору деформації при реалізації різних процесів, однак при цьому, як правило, вказується, що крім існуючого діапазону факторів, також необхідно враховувати і особливості реалізованого процесу.

Так, в практиці моделювання МСЕ процесів з високими швидкостями деформації, вельми широко використовують модель Джонсона-Кука, коли опір деформації визначається в досить широкому діапазоні температур, починаючи від холодного стану і до температури плавлення металу [358, 361]. А в практиці ОМТ при гарячій деформації в існуючих методиках розрахунку діапазони температур значно звужені [360].

На підставі апріорної інформації було звернено увагу на такі методики розрахунку механічних властивостей:

– модель Джонсона-Кука [358, 361], яка використовується при моделюванні МСЕ процесів в широкому діапазоні температур, ступенів и швидкостей деформації;

– методика Андреюка-Тюленєва [343], оскільки при розрахунку враховується вплив хімічного складу оброблюваної сталі, що дозволяє охоплювати досить широкий діапазон марок сталей від вуглецевих, до високолегованих, в тому числі жароміцних;

– методика НВО «Донікс» [360], тому що дозволяє враховувати ефект зниження опору деформації при зростанні ступенів деформації.

На рис. 3.21 наведені залежності опору деформації від її ступеню, при різних значеннях швидкості деформації и температури.

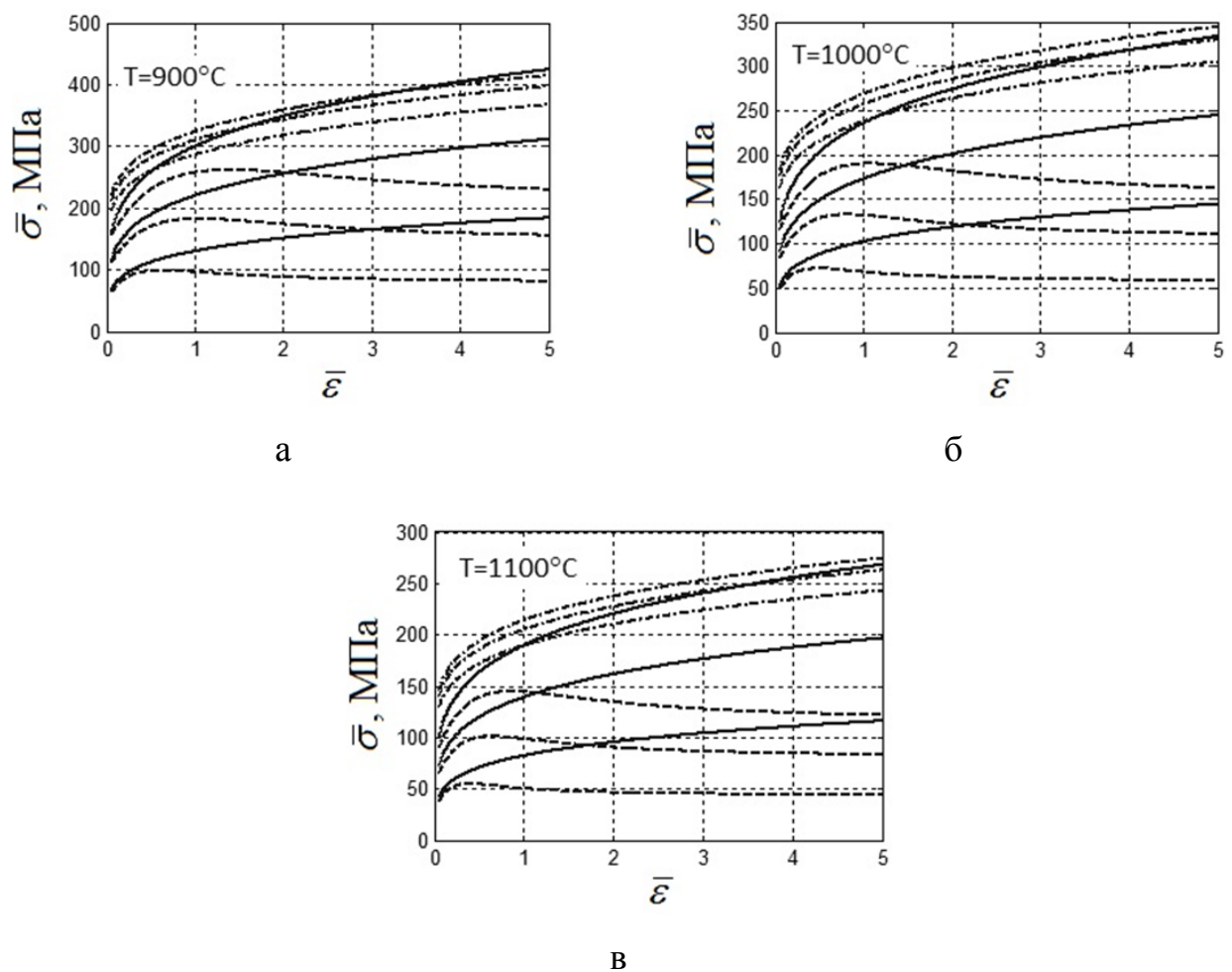


Рисунок 3.21 – Залежності опору деформації від ступеню деформації при швидкості 0,1; 10; 150 с⁻¹ (розташовані знизу вгору) відповідно до моделі Джонсона-Кука (---) [358, 361], методики Андреюка-Тюленєва (–) [343] і НВО «Донікс» (- · -) [360] для низьковуглецевої сталі з вмістом 0,25% С; 0,4% Si; 1,2% Mn; 0,02% P; 0,025% S

Як можна бачити з представлених залежностей, модель Джонсона-Кука і методика Андреюка-Тюленєва відносно добре узгоджуються при швидкості деформації 150 с^{-1} та величині ступеня деформації більше 0,5, а суттєво різняться при менших швидкостях.

В той же час, методика НВО «Донікс» і методика Андреюка-Тюленєва відносно добре узгоджуються при всіх швидкостях деформації та величині ступеня деформації менше 0,5.

Аналіз результатів SE моделей з використанням методики Андреюка-Тюленєва (див. підрозділ 3.6), дозволив встановити, що швидкість деформації в осередку різання не перевищує 100 с^{-1} і наближається до неї в завершальній стадії розрізання. При цьому були отримані завищені значення опору розрізанню, а отже модель Джонсона-Кука була виключена з подальшого розгляду, оскільки вона, при швидкості $0,1 \text{ с}^{-1}$, надає в 2,5...3 рази більші значення опору деформації.

Дані отримані за методиками Андреюка-Тюленєва і НВО «Донікс», досить добре узгоджуються між собою при відносно невеликих значеннях ступеню деформації і практично однаково залежать від швидкості деформації (див. рис. 3.21), а екстрапольовані в сторону зростання пластичної деформації, значно різняться.

На другому етапі дослідження моделювали процес гарячого розрізання паралельними ножами з урахуванням жорсткості станини. З метою розширення уявлення про протікання процесу і уточнення розрахункових даних, математична модель враховувала термодинамічні ефекти при деформації матеріалу, що дозволило оцінити вплив деформаційного нагріву металу в процесі розрізання.

Для попередньої оцінки та обґрунтування вибору методики розрахунку механічних властивостей, спирались на результати експериментальних досліджень процесу гарячого розрізання паралельними ножами наведені в роботі [13]. В якості вихідних даних для моделювання були взяті зразки перерізом $25 \times 25 \text{ мм}$ при швидкості розрізання близько 300 мм/с . Хімічний склад розрізуваних зразків і температура реалізації процесу наведені в таблиці 3.5.

Таблиця 3.5 – Хімічний склад сталей і температура розрізання [13]

Номер зразка	Марка сталі	Хімічний склад, %							Температура розрізання, °C
		C	Mn	Si	Cr	Ni	P	S	
I	сталь 20	0,20	0,52	0,24	0,04	–	0,026	0,030	650; 760; 970
II	сталь 45	0,47	0,58	0,23	0,05	–	0,027	0,030	660; 760; 980
III	ШХ10	0,40	0,55	0,33	1,10	0,13	0,024	0,027	670; 780; 1090
IV	сталь 75	0,75	0,63	0,31	0,15	–	0,028	0,020	700; 860; 1020

Для моделювання руйнування використовувалася діаграма пластичності сталі Ст 3, аналітична залежність для якої, в досліджуваному діапазоні температур і швидкостей деформацій, яка представлена в роботі [359].

Крім того, на другому етапі моделювався процес розрізання тільки для трьох зразків (I, II, IV), оскільки у третього зразка вміст хрому 1,1%, тоді як в методиці НВО «Донікс» його вміст обмежений $\leq 0,3\%$ [360].

За результатами моделювання будували залежності питомого опору гарячому розрізанню від відносного проникнення ножів в метал і порівнювали їх максимальні значення з експериментальними. Обробка отриманих результатів показала, що при використанні методик Андреюка-Тюленєва і НВО «Донікс» мають місце завищені значення максимального значення питомого опору розрізанню (табл. 3.6). При цьому також слід зазначити, що за інших рівних умов моделювання, руйнування при використанні методики НВО «Донікс» настає при значеннях відносного проникнення ножів в метал на 10...15% менше, ніж при використанні методики Андреюка-Тюленєва. Даний факт можна пояснити тим, що спостерігається (див. рис. 3.21) стабілізація опору деформації при екстраполюванні значень в зону великих пластичних деформацій, а, отже, в локальних об'ємах спостерігається більш інтенсивне зростання пластичних деформацій.

На третьому етапі дослідження проводилася обробка результатів моделювання. В ході обробки були отримані співвідношення експериментальних значень питомого опору розрізанню до значень, отриманих в результаті моделювання з

використанням відповідної методики розрахунку опору пластичної деформації (див. табл. 3.6).

Таблиця 3.6 – Порівняльні результати моделювання МСЕ з використанням відповідної методики розрахунку опору пластичної деформації

Номер зразка	Температура, °C	Максимальне значення питомого опору розрізанню і відношення до експериментальних значень за методикою			
		Андреюка-Тюленєва		НВО «Донікс»	
		τ_{\max} , Н/мм ²	$\frac{\tau_e}{\tau_{\max}}$	τ_{\max} , Н/мм ²	$\frac{\tau_e}{\tau_{\max}}$
I	650	235,5	0,571	184,7	0,738
	760	156,5	0,551	131,4	0,657
	970	81,2	0,580	77,0	0,612
II	660	254,0	0,560	206,7	0,688
	760	168,2	0,531	133,5	0,669
	980	84,8	0,520	74,4	0,593
IV	700	223,9	0,583	210,9	0,619
	860	131,9	0,550	108,0	0,672
	1020	81,2	0,580	67,7	0,696

Аналіз результатів, наведених у табл. 3.6, показує, що діапазон співвідношення між максимальним опором розрізанню τ_e експериментальних даних до τ_{\max} за результатами моделювання при використанні методики Андреюка-Тюленєва варіюється в межах $0,5515 \pm 5,71\%$, Тоді як при використанні методики НВО «Донікс» – $0,6655 \pm 10,89\%$. Вочевидь, що використання методики Андреюка-Тюленєва дає більш стабільні (по відношенню до експериментальних даних) результати. Таким чином, було зроблено припущення, що при моделюванні процесу гарячого розрізання можна використовувати методику Андреюка-Тюленєва,

однак розрахункові значення опору деформації перераховувати, помножуючи на коефіцієнт адаптації k_n .

На заключному етапі дослідження ставилося завдання визначення величини коефіцієнта k_n . Для вирішення даного завдання використовувався простий підбір з подальшим прорахунком і оцінкою отриманих результатів. В результаті досить високий ступінь збіжності результатів моделювання з експериментальними даними був досягнутий при значенні коефіцієнту адаптації $k_n = 0,53$.

На рисунку 3.22 представлені криві питомого опору розрізанню за результатами моделювання та експериментальними даними.

На додаток до залежностей, представлених на рис. 3.22 в таблиці 3.7 наведені числові значення максимальних величин питомого опору розрізанню, отримані за результатами моделювання, і експериментальними даними [13].

Як можна бачити з отриманих результатів розбіжність між експериментальними і розрахунковими даними не перевищує 10%.

Таким чином, можна стверджувати, що при моделюванні процесу гарячого розрізання для побудови кривих текучості для різних марок сталей можна використовувати методика Андреюка-Тюленєва з розрахунку опору деформації при прокатці із значенням коефіцієнту адаптації $k_n = 0,53$. При цьому слід зазначити, що досить високий ступінь збіжності спостерігається навіть при екстраполюванні розрахункових даних за межі області варіювання параметрів. А саме, діапазон варіювання температур становить $800 \dots 1300^\circ\text{C}$, а ступінь деформації $0,05 \dots 0,3$, тоді як при моделюванні процесу розрізання результати порівнювались з експериментальними даними досліджень при температурі $650 \dots 1090^\circ\text{C}$, а ступінь деформації в локальних об'ємах сягав значень більше 5.

Крім того, методика Андреюка-Тюленєва дозволяє не прив'язуватися до марки сталі і її механічних властивостей, а визначати їх по конкретному хімічному складу розрізуваної сталі. Даний підхід дозволить дати розвиток процедурі розрахунку навантажень на обладнання для розрізання прокату в гарячому стані і вдосконалювати технологічні режими розрізання і обладнання для їх реалізації.

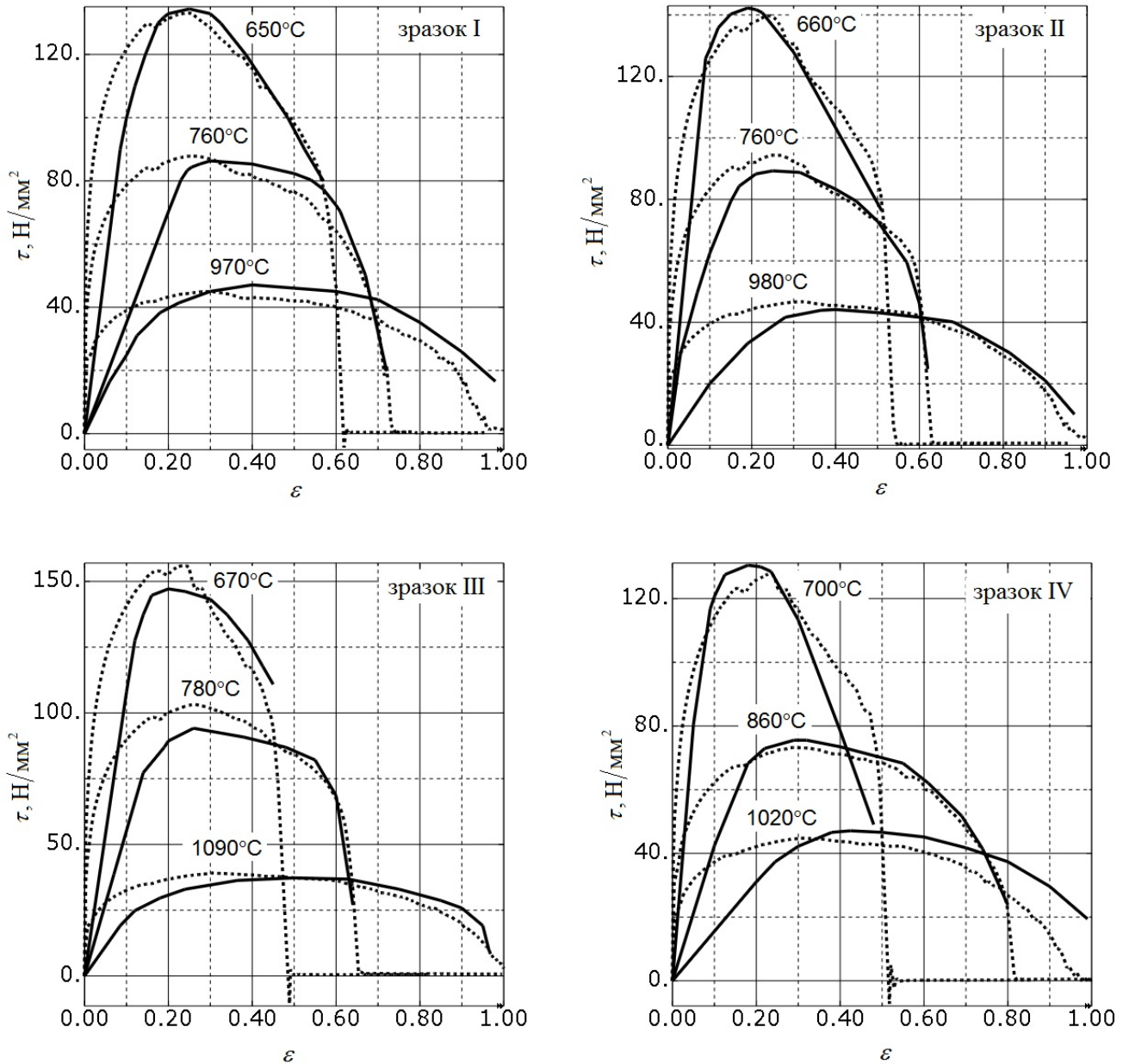


Рисунок 3.22 – Криві питомого опору розрізанню за результатами моделювання (---) і експериментальний (—) даними, згідно умов [13] (див. табл. 3.5) при використанні методики Андреюка-Тюленєва і значенні коефіцієнту адаптації $k_n = 0,53$

При холодному розділенні металопрокату [362-364], на відміну від процесу розділення в гарячому стані, механічні властивості розрізуваних сталей в значній мірі залежать від способу виробництва і термічної обробки.

Таблиця 3.7 – Порівняльні результати моделювання і експериментальних [13] даних при використанні методики Андреюка-Тюленєва і значенні коефіцієнту адаптації $k_n = 0,53$

Номер зразка	Температура, °C	Максимальне значення питомого опору розрізанню		
		експеримент [13], $H/мм^2$	моделювання, $H/мм^2$	відхилення, %
I	650	134,4	133,2	-0,891
	760	86,3	88,0	+1,937
	970	47,1	45,0	-4,434
II	660	142,2	139,8	-1,719
	760	89,3	94,4	+5,745
	980	44,1	46,7	+5,788
III	670	147,2	156,4	+6,286
	780	94,2	103,3	+9,688
	1090	37,3	39,1	+4,888
IV	700	130,5	128,3	-1,665
	860	72,6	73,3	+0,973
	1020	47,1	44,8	-4,859

У довідковій літературі [365], практично для будь-якої марки сталі, можна знайти результати випробувань на розтягування, що характеризуються границею текучості $\sigma_{0,2}$ і границею міцності σ_b матеріалу при розтягуванні, а також відносним подовженням δ , які враховують спосіб виробництва і термічну обробку металу.

В умовах холодної деформації, процеси обробки тиском також супроводжуються термодинамічними ефектами і вплив зростання температури на опір деформації доцільно враховувати, але за умови нагрівання до температури 200...250°C [343]. Проте, оскільки при холодному розрізанні температура нагрі-

вання в осередку розділення нижча, а методика розрахунку за даними роботи [343] громіздка, то впливом термодинамічних ефектів було вирішено знехтувати.

За основу був обраний відносно простий алгоритм розрахунку констант та показників зміцнення для конструкційних матеріалів при статичних випробуваннях ($\sigma_s = \bar{\sigma}_{(\dot{\varepsilon}=0)}$), пропонований в роботі [341]:

$$\sigma_s = \sigma_{0,2} \left(\bar{\varepsilon}^{pl} / 0,002 \right)^{m_0}, \quad (3.2)$$

де m_0 – показник зміцнення.

На думку авторів роботи значення показника m_0 залежить від співвідношення границі міцності до границі текучості $\sigma_b / \sigma_{0,2}$ при розтягуванні, для визначення якого пропонуються апроксимації для двох ділянок при $\sigma_b / \sigma_{0,2} \leq 1,32$ і $\sigma_b / \sigma_{0,2} > 1,32$ відповідно [341].

Але, як відомо, істинна (логарифмічна) пластична деформація руйнування при розтягуванні визначається виразом [341]:

$$\bar{\varepsilon}_{\text{lim}}^{pl} = \ln(1 + \delta). \quad (3.3)$$

Також очевидно, що границя міцності матеріалу при розтягуванні і відносне подовження при розриві є взаємопов'язаними параметрами, а саме:

$$\sigma_b = \sigma_s \left(\bar{\varepsilon}_{\text{lim}}^{pl} \right). \quad (3.4)$$

Проте, визначивши за алгоритмом (3.2)-(3.4) значення границі міцності матеріалу при розтягуванні, з розрахунком показника m_0 як в роботі [341] і порівнявши з фактичними значеннями, було відзначено, що у всіх випадках мають місце завищені значення границі міцності в діапазоні 7,7...42%.

Таким чином, для обчислення показника зміцнення m_0 в рівняння (3.2) підставляли (3.3) і дотримавши умову (3.4), після нескладних перетворень, отримали рівняння:

$$m_0 = \frac{\ln\left(\frac{\sigma_b}{\sigma_{0,2}}\right)}{\ln[500 \cdot \ln(1 + \delta)]} \quad (3.5)$$

Для побудови кривих пластичності при розрахунку інтенсивності напружень використовували відому залежність [366], котра дозволяє врахувати швидкість деформації:

$$\bar{\sigma} = \sigma_s K_v = \sigma_s \left(\frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_s} \right)^m, \quad (3.6)$$

де K_v – швидкісний коефіцієнт;

$\dot{\varepsilon}$ – поточна швидкість деформації;

$\dot{\varepsilon}_s$ – швидкість деформації, при статичних випробуваннях, котра зазвичай становить $\dot{\varepsilon}_s = 10^{-5} \dots 10^{-3} \text{ с}^{-1}$;

m – показник швидкісного зміцнення. За даними досліджень Губкіна С. І., для сталей при температурі деформації, що відноситься до зони повного зміцнення, були отримані значення в діапазоні $m = 0,02125 \dots 0,0425$ [367]. При цьому, слід зазначити, що більші значення відповідають більшим температурам цього інтервалу.

Крім того, з урахуванням виразу (3.3) і умови (3.4), необхідно перетворити апроксимацію діаграм пластичності О. А. Лабутіна і Г. О. Смирнова-Аляєва [368], які представляють собою залежність пластичної деформації руйнування $\bar{\varepsilon}_f$ (граничної пластичної деформації) від відповідного показника напруженого стану k ,

до показника трьохосного напруженого стану, який застосовують в Abaqus (див. рівняння (2.7)). Відповідно, в результаті співставлення маємо:

$$\eta = \frac{k}{3} \Rightarrow k = 3\eta. \quad (3.7)$$

З урахування співвідношення (3.7) отримаємо:

$$\bar{\varepsilon}_f^{pl} = 2 \ln(1 + \delta) e^{-2,16\eta}. \quad (3.8)$$

Однак, головним недоліком рівняння (3.8) є те, що воно не враховує швидкість пластичної деформації $\dot{\bar{\varepsilon}}^{pl}$. За для її врахування, використовували твердження, що при досягненні в зразку критичної довжини тріщини для досліджуваного матеріалу значення питомої енергії руйнування прагнуть до постійної величини, котра є результатом дослідницьких робіт в області досліджень механіки руйнування та міцності матеріалів під керівництвом академіка Панасюка В. В. [369]. Тобто отримаємо:

$$\int_0^{\bar{\varepsilon}_{f(\dot{\varepsilon}=0)}^{pl}} \bar{\sigma}_{(\dot{\varepsilon}=0)} d\bar{\varepsilon}^{pl} = \int_0^{\bar{\varepsilon}_{f(\dot{\varepsilon}>0)}^{pl}} \bar{\sigma}_{(\dot{\varepsilon}>0)} d\bar{\varepsilon}^{pl}, \quad (3.9)$$

У урахуванням рівнянь (3.2) та (3.6) перетворимо (3.9) до вигляду:

$$\int_0^{\bar{\varepsilon}_{f(\dot{\varepsilon}=0)}^{pl}} \sigma_{0,2} (\bar{\varepsilon}^{pl}/0,002)^{m_0} d\bar{\varepsilon}^{pl} = \int_0^{\bar{\varepsilon}_{f(\dot{\varepsilon}>0)}^{pl}} K_v \sigma_{0,2} (\bar{\varepsilon}^{pl}/0,002)^{m_0} d\bar{\varepsilon}^{pl}. \quad (3.10)$$

Після інтегрування та нескладних перетворень отримаємо:

$$\bar{\varepsilon}_{f(\dot{\varepsilon}>0)}^{pl} = \bar{\varepsilon}_{f(\dot{\varepsilon}=0)}^{pl} / K_v^{\frac{1}{m_0+1}}. \quad (3.11)$$

Попереднє оцінювання ефективності запропонованого алгоритму (3.2)-(3.11), використовуючи МСЕ, здійснювали моделювання процесу холодного розрізання паралельними ножами на базі програмного комплексу Abaqus та порівнювали з результатами експериментальних досліджень процесу холодного розрізання паралельними ножами наведені в роботі [13].

Математична модель описувала плоску задачу розрізання паралельними ножами з урахуванням жорсткості станини.

В таблиці 3.8 наведені назви матеріалів та їх механічні властивості, розмір заготовок становив 25×25 мм, а швидкість розрізання паралельними ножами 300 мм/с.

Таблиця 3.8 – Характеристика експериментальних зразків

№ п/п	Марка матеріалу*	$\sigma_{0,2}$, МПа	σ_b , МПа	δ
1	Сталь 20	418	527	0,217
2	Сталь 45 (канатна сталь)	347	660	0,197
3	ШХ10	439	822	0,166
4	Сталь 75 (пружинна сталь)	574	989	0,108
5	Сталь 15 (1015)	177	373	0,32
6	Сталь 18Х2Н4ВА (Э16)	910	1128	0,09
7	Сталь 12Х18Н9 (ЭЯ1)	230	589	0,45

* – в дужках вказані назви у відповідності з даними О.І. Целікова

За результатами моделювання МСЕ були отримані відповідні залежності сили розрізання, котрі досить добре корелюють з експериментальними кривими, проте максимальні значення питомого опору розрізанню мали похибку $\pm 15\%$.

Подальший аналіз показав (рис. 3.23), що величина відносної похибки дуже добре корелює ($R = -0,92658$) з відносним подовженням δ при розриванні, а це може свідчити про її системність, через втрату одного з факторів.

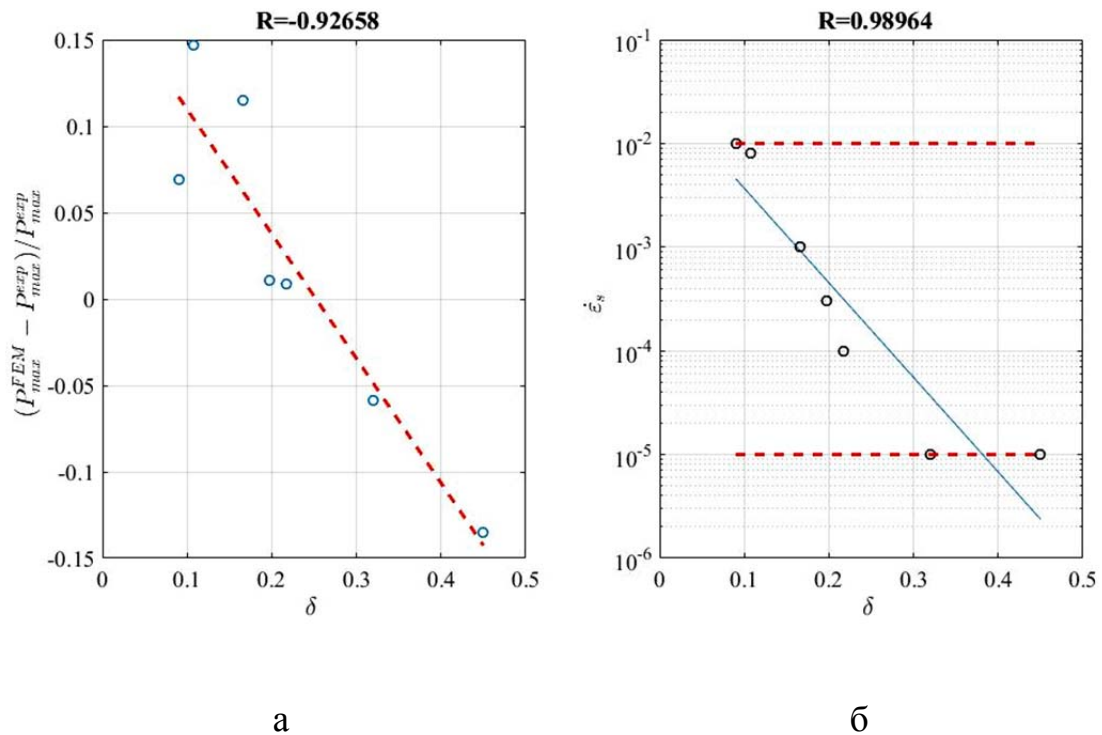


Рисунок 3.23 – Залежності величини відносної похибки ΔP_{max}^P з відносним подовженням δ при розриванні (а) та розрахункові значення швидкості деформації $\dot{\epsilon}_s$ (б), при статичних випробуваннях, визначені при моделюванні МСЕ (о) та розраховані (—) з рівняння (3.13)

Зокрема в рівнянні (3.6) швидкість деформації $\dot{\epsilon}_s$, при статичних випробуваннях, може коливатися в широкому діапазоні, а в попередніх моделях її приймали рівною $\dot{\epsilon}_s = 10^{-4} \text{ c}^{-1}$. Тому на наступному етапі, методом перебору визначали швидкість деформації, при статичних випробуваннях з метою отримання мінімальної відносної похибки моделювання МСЕ:

$$\Delta P(\dot{\epsilon}_s) \rightarrow \min. \quad (3.12)$$

В результаті були отримані дані, котрі при обробці методом найменших квадратів, дозволили отримати рівняння регресії, щодо визначення швидкості деформації $\dot{\epsilon}_s$, при статичних випробуваннях:

$$\dot{\varepsilon}_s = e^{-3,5-21\delta}. \quad (3.13)$$

На рис. 3.23, б представлені розрахункові значення швидкості деформації $\dot{\varepsilon}_s$, при статичних випробуваннях та визначені з рівняння (3.13), коефіцієнт кореляції між якими становить $R = 0,98964$.

Застосування рівняння (3.13) при повторному моделюванні МСЕ дозволило зменшити відносну похибку до $\pm 7\%$.

В якості порівняння отриманих результатів, на рисунку 3.24 показані криві питомого опору розрізанню для досліджуваних марок сталі.

При цьому на осі абсцис показано відносне зміщення ножа, замість традиційного відносного проникнення ножів в метал. Це обумовлено тим, що при проведенні експериментальних досліджень в роботі [13] не враховувалася пружна деформація станини ножиць, яка, як було показано вище, кілька видозмінює залежність питомого опору зрізу від відносного проникнення ножів в метал.

ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 3

1. Встановлено, що стосовно процесів розділення застосування методу скінченних елементів є можливим і доцільним, при застосуванні ізопараметричних лінійних скінченних елементів із редукованою схемою інтегрування, котрі мають властивості суцільного середовища і контроль збереження відповідної форми та можуть бути застосовані при вирішенні пружно-пластичних або пружно-термопластичних задач.

2. Обґрунтовано, що з метою підвищення адекватності та зменшення об'ємів розрахунку при моделюванні методом скінченних елементів, щодо процесів розділення доцільно застосовувати адаптацію сітки в формулюванні Лагранжа-Ейлера та необхідно формувати нерівномірну початкову структуру сітки, шляхом її згущення в зоні безпосередньо розділення та накладати на цю зону додаткові обмеження для збереження її структури.

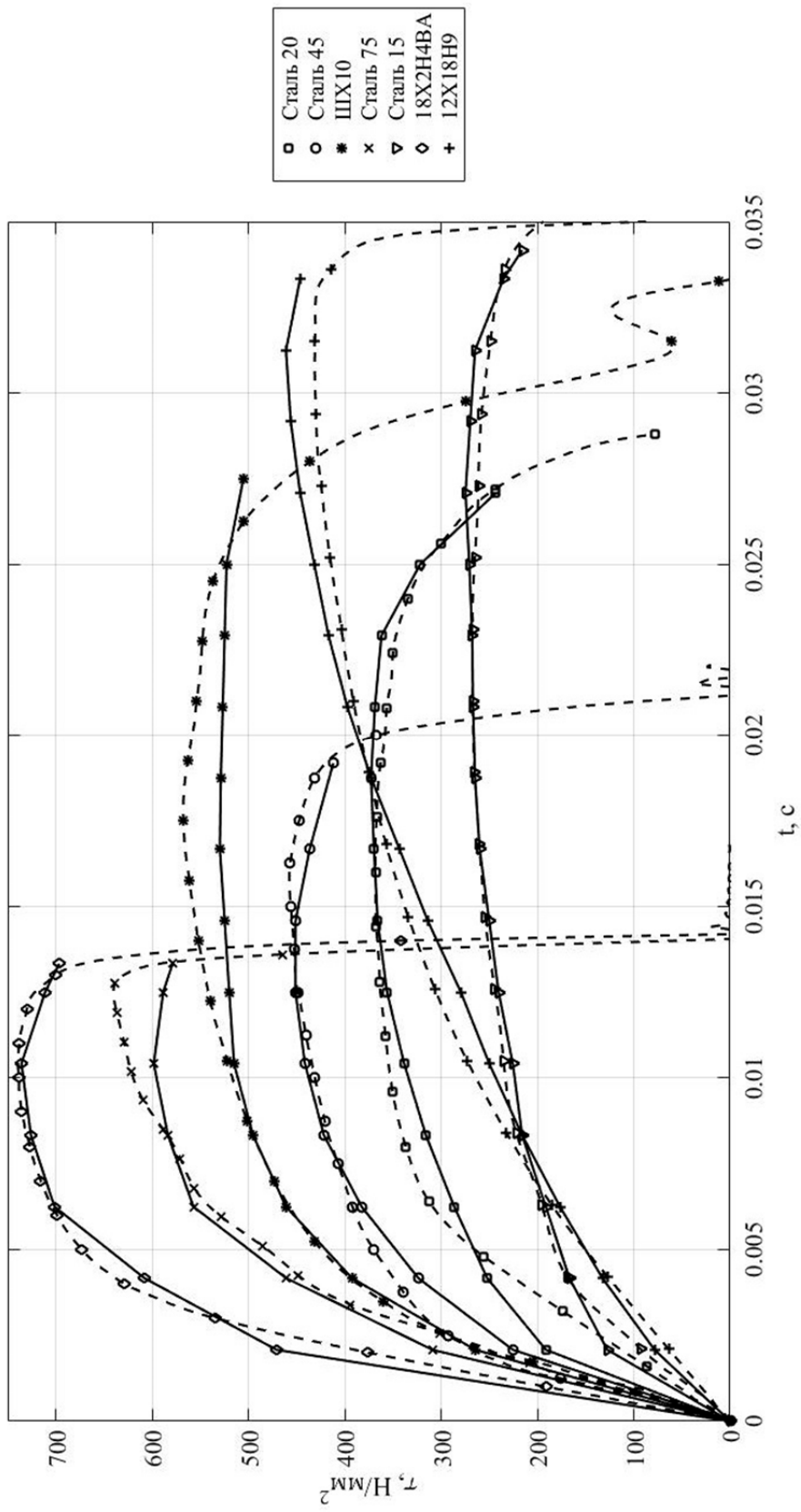


Рисунок 3.24 – Криві питомого опору розрізанню за результатами моделювання MSE (.....) і експериментальними даними (—) за даними роботи [13] (див. табл. 3.8)

3. Встановлено, що при моделюванні процесів розділення доцільно застосувати підхід Хіллеборга, а значення ефективного пластичного переміщення, при якому відбувається повне руйнування визначати виходячи із відносного проникнення ножів в метал, що підтверджує значення отриманого коефіцієнта кореляції 0,99033, а закон накопичення пошкоджуваності приймати лінійний.

4. Врахування жорсткості станини ножиць при моделюванні процесів розрізання, шляхом введення до складу моделі пружного та демпфуючого елементів, що дозволяє утримувати коефіцієнт кореляції енергосилових та кінематичних параметрів реалізації процесу на рівні 0,9 і вище, за рахунок уточненого врахування змінних умов безпосередньо в осередку розрізання.

5. При моделюванні процесів розрізання на ножицях в гарячому стані необхідно враховувати термодинамічні процеси в осередку розрізання, оскільки це дозволяє підвищити до 7% точність отримуваних енергосилових параметрів моделювання в порівнянні з експериментальними даними.

6. Розроблений алгоритм обробки результатів моделювання методом скінченних елементів щодо визначення та обробки локальних і узагальнених числових даних, дозволяє встановити функціональний зв'язок між опором розрізанню та кривими текучості, а також між відносним проникненням ножів в метал і ступенем пластичної деформації в осередку розрізання та розширити уявлення щодо поведінки металу в процесі розрізання на ножицях.

7. Обґрунтовано вибір методики Андреюка-Тюленєва для моделювання механічних властивостей розрізуваних матеріалів в гарячому стані та виконано її уточнення, що дозволило враховувати вміст хімічних елементів сталі, температури і швидкості деформації та досягти точності розрахунку енергосилових параметрів в межах $\pm 10\%$ від фактичного.

8. Розроблено методику визначення механічних властивостей розрізуваних матеріалів у холодному стані, в якій уточнено швидкість деформації при статичних випробуваннях на розривання, що дозволило підвищити точність розрахунку опору розрізанню до $\pm 7\%$ від експериментального.

РОЗДІЛ 4

РОЗВИТОК МЕТОДІВ МАТЕМАТИЧНОГО МОДЕЛЮВАННЯ І ОСНОВНИХ ПОКАЗНИКІВ ЯКОСТІ ЛИСТОВОГО І СОРТОВОГО МЕТАЛОПРОКАТУ ПРИ РЕАЛІЗАЦІЇ ПРОЦЕСІВ ЙОГО ПОПЕРЕЧНОГО РОЗРІЗАННЯ

4.1 Математичне моделювання напружено-деформованого стану металу і основних показників якості при поперечному розрізанні металопрокату на ножицях з паралельними ножами

4.1.1 Двовимірне математичне моделювання поперечного розрізання металопрокату на ножицях з паралельними ножами

Математичне моделювання процесу поперечного розрізання металопрокату прямокутного перерізу (смуга, сляб, блюм) на ножицях з паралельними ножами на базі МСЕ є найбільш простим завданням, оскільки дозволяє проводити аналіз на двовимірних моделях, що істотно скорочує обсяги обчислень при досить високому ступені достовірності отриманих результатів.

У той же час, за результатами моделювання представляється можливим істотно розширити уявлення про напружено-деформований стан (НДС) металу в осередку розрізання і виявити основні закономірності в його поведінці, а також оцінити вплив цілого ряду чинників, врахувати які методами фізичного моделювання далеко не завжди представляється можливим.

Такого роду інформація може бути покладена в основу одновимірних математичних моделей по визначенню енергосилових параметрів процесу і основних

показників якості, які будуть відрізнятися відносною простотою при достатньому рівні їх достовірності та сприяти розвитку автоматизованого проектування.

Вочевидь даний підхід сприятиме розвитку методик розрахунку розділових операцій в цілому, особливо, з огляду на той факт, що вирішення більшості задач з розділення металопрокату вимагає тривимірних моделей.

Як було показано в підрозділі 1.3, класичні методики розрахунку процесів розрізання не враховують вплив швидкості розділення прокату і хімічного складу металу на опір розрізанню, що знижує точність вироблених розрахунків.

Розглянемо вплив швидкості руху ножів на енергосилові параметри процесу гарячого розрізання металу на ножицях з паралельними ножами, шляхом математичного моделювання на базі плоскої СЕ математичної моделі, яка враховує жорсткість станини та термодинамічні ефекти при деформації матеріалу.

За базові були взяті зразки зі сталі з хімічним складом, наведеним у таблиці 3.5 (див. підрозділ 3.5).

За інших ідентичних умов, розрахунок провадили для різної швидкості розрізання (руху ножа) 25, 100, 200, 300, 400 і 500 $мм/с$, що дозволило виконати оцінювання її впливу на енергосилові параметри процесу.

Абсолютні значення швидкості розрізання не є показовими, оскільки при зміні товщини заготовки буде змінюватися інтенсивність швидкості деформації і напружено-деформований стан металу. Таким чином, доцільно використовувати відношення швидкості розрізання V до товщини h розрізуваної заготовки, тобто відносну швидкість $V_h = 1; 4; 8; 12; 16$ і 20 с^{-1} .

За результатами моделювання були отримані криві питомого опору розрізанню від відносного проникнення ножів при різній фактичній швидкості руху ножів та залежності максимальних значень питомого опору розрізанню в залежності від швидкості розрізання (рис. 4.1) за умов наведених в таблиці 3.5.

З рис. 4.1, а видно, що питомий опір розрізанню істотно залежить від швидкості процесу, а саме з її збільшенням питомий опір розрізанню зростає та зменшується відносно проникнення ножів в метал, при якому настає повне розділення.

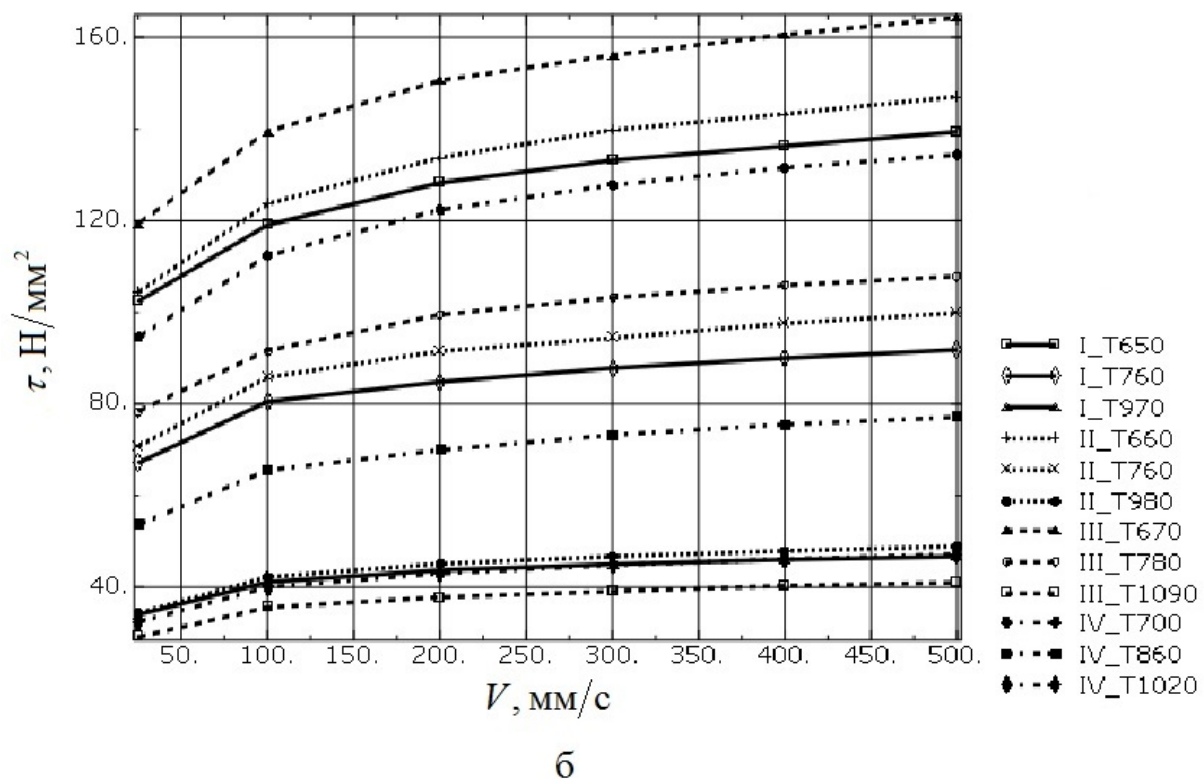
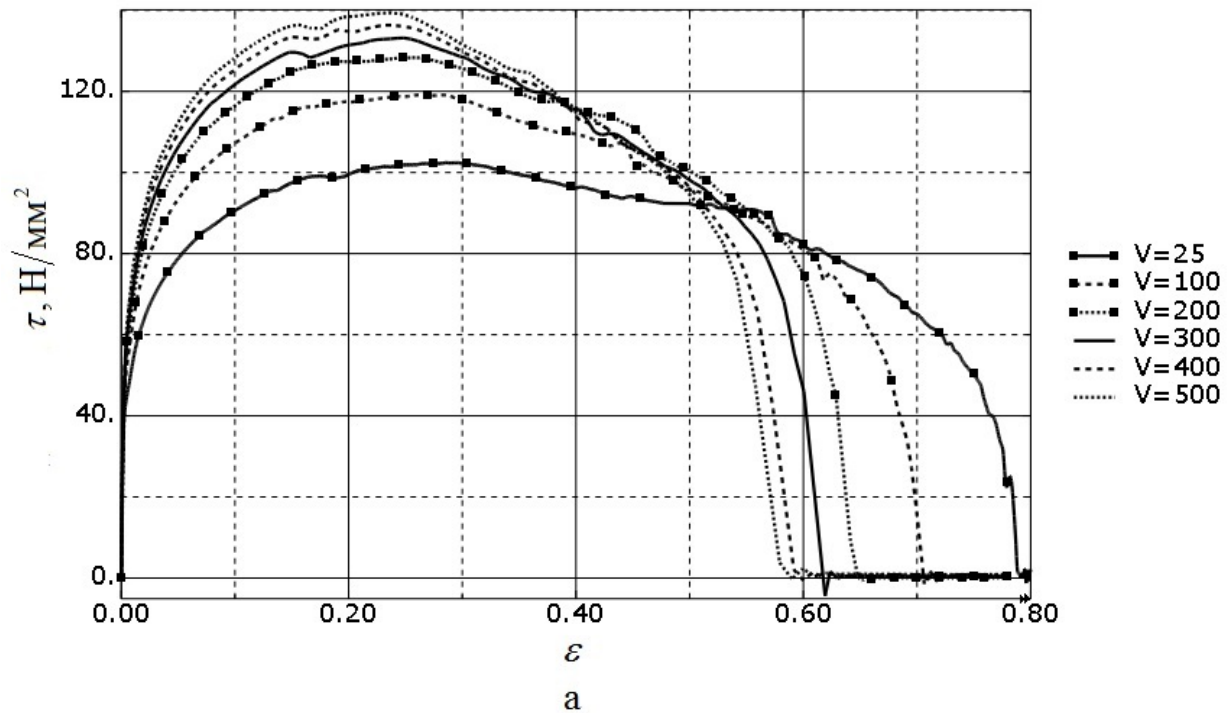


Рисунок 4.1 – Криві питомого опору розрізанню при різній фактичній швидкості руху ножів V (мм/с) для зразка I (див. табл. 3.5) при температурі 650°C в залежності від віносного проникнення ножів (а) та залежності максимальних значень питомого опору розрізанню для зразків I-IV (див. табл. 3.5) в залежності від швидкості розрізання (б)

Слід зазначити, що залежності максимальних значень питомого опору розрізанню τ_{\max} в залежності від швидкості розрізання носять логарифмічний характер (рис. 4.1, б). При всіх модельованих умовах значення τ_{\max} змінюється в широкому діапазоні і залежить від марки сталі, але майже не залежить від температури розрізання (табл. 4.1).

Таблиця 4.1 – Відношення максимального значення питомого опору розрізанню в досліджуваному діапазоні відносної швидкості розрізання

Зразок	I			II			III			IV		
T, °C	650	760	970	660	760	980	670	780	1090	700	860	1020
$\frac{\tau_{\max}(V_h=20c^{-1})}{\tau_{\max}(V_h=1c^{-1})}$	1,361	1,368	1,374	1,409	1,413	1,426	1,178	1,177	1,152	1,196	1,177	1,18

На рис. 4.2 представлені залежності питомої роботи розрізання в залежності від відносної швидкості розрізання. Аналіз яких показує, що їх поведінка має відносно суперечливий характер в залежності від температури реалізації процесу і марки сталі. Відповідно використання питомої роботи розрізання в дослідженні процесів розділення в гарячому стані не є доцільним.

Крім того, на рис. 4.3 представлені співвідношення середнього опору розрізання до його максимального значення за результатами моделювання.

Як можна бачити з представлених даних середні значення (суцільна лінія) даного співвідношення цілком відповідають рекомендаціям роботи [13], згідно яких $\tau_{cp} = (0,75 \dots 0,85) \cdot \tau_{\max}$. Однак, при зниженні відносної швидкості розрізання розкид величини даного співвідношення зростає.

Таким чином, можна стверджувати, що швидкість розрізання впливає на енергосилові параметри процесу. Однак, вочевидь, ступінь впливу визначається не тільки швидкістю розрізання.

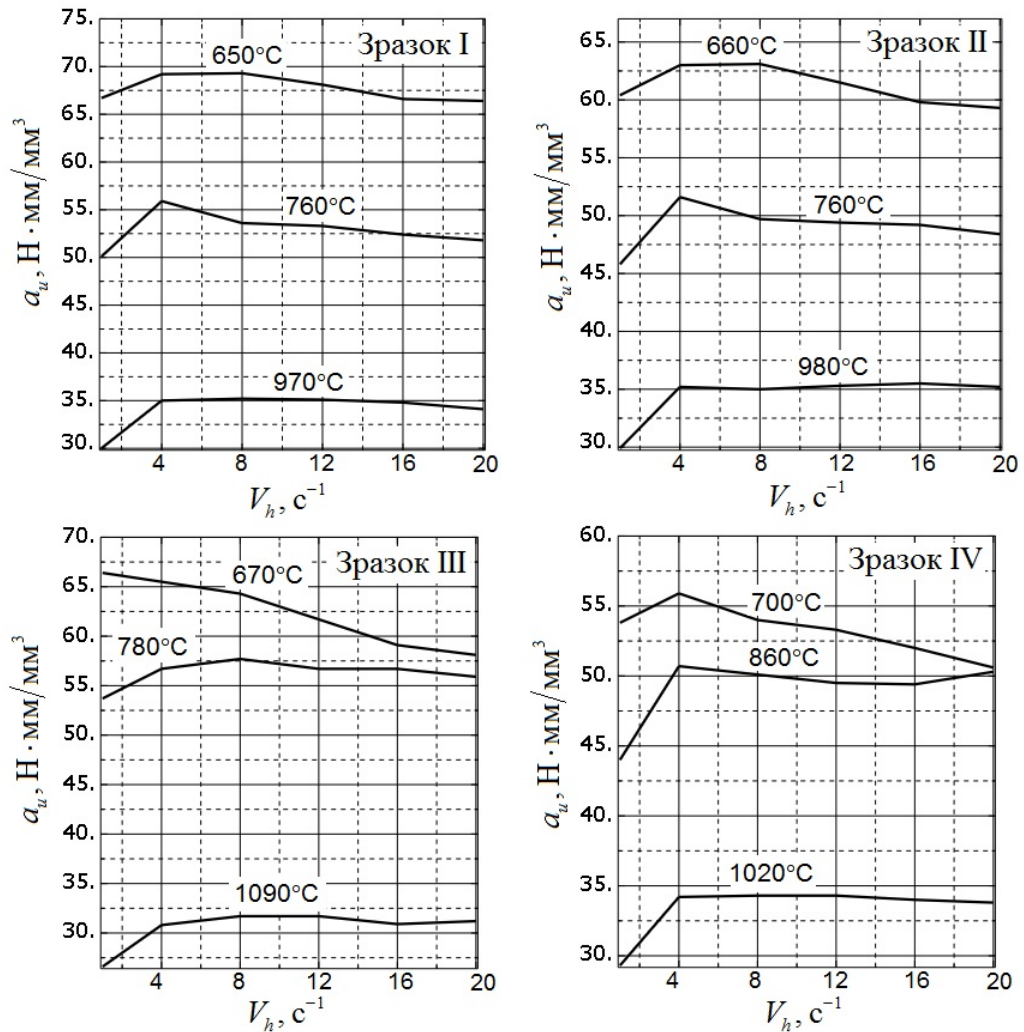


Рисунок 4.2 – Залежність питомої роботи розрізання a_u від відносної швидкості розрізання V_h за результатами моделювання

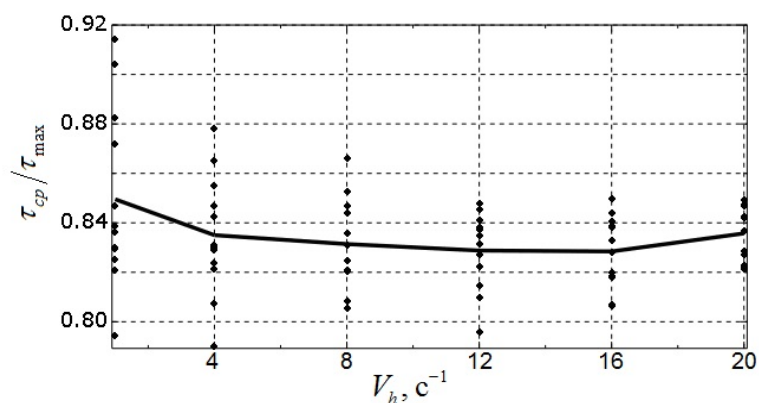


Рисунок 4.3 – Залежність співвідношення середнього питомого опору розрізання до максимального за результатами моделювання від відносної швидкості розрізання V_h

Для оцінки впливу можливого варіювання хімічного складу [370], що регламентується ГОСТом (табл. 4.2), при мінімально і максимально допустимому вмісті хімічних елементів, було виконано СЕ моделювання плоскої задачі розрізання паралельними ножами з урахуванням жорсткості станини і термодинамічних ефектів при деформації матеріалу.

Таблиця 4.2 – Хімічний склад сталей відповідно до ГОСТу

Марка сталі	Хімічний склад, %							
	C	Mn	Si	Cr	Ni	Cu	P	S
20	0,17-0,24	0,35-0,65	0,17-37	≤0,25	≤0,25	≤0,25	≤0,04	≤0,04
45	0,42-0,50	0,50-0,80	0,17-37	≤0,25	≤0,30	≤0,30	≤0,035	≤0,04
ШХ10	0,32-0,42	0,40-0,70	0,17-37	0,8-1,2	≤0,20	≤0,25	≤0,03	≤0,03
75	0,72-0,80	0,50-0,80	0,17-37	≤0,25	≤0,25	≤0,20	≤0,035	≤0,035

В якості базових даних для моделювання були взяті зразки зі сталі з хімічним складом, наведеним у таблиці 3.5, перерізом 25×25 мм при швидкості розрізання близько 300 мм/с.

За результатами моделювання були отримані криві питомого опору розрізанню представлені на рис. 4.4. При цьому слід відзначити, що максимальні значення опору мають розкид 5...30%, в залежності від температури.

Як можна бачити з залежностей, представлених на рис. 4.5, для всіх розглянутих марок сталей спостерігається загальна тенденція до розширення діапазону варіювання значень питомого опору при зниженні температури, в той же час інтенсивність зміни залежить від марки сталі. Крім того, можна відзначити, що представлені залежності носять практично лінійний характер.

Таким чином, можна стверджувати, що для однієї марки сталі енергосилові параметри процесу гарячого розрізання залежать від фактичного вмісту хімічних елементів, а ступінь впливу визначається не тільки процентним вмістом хімічних елементів, але і температурою розрізання, при цьому характер впливу залежить від набору хімічних елементів, що входять до складу розрізуваної сталі.

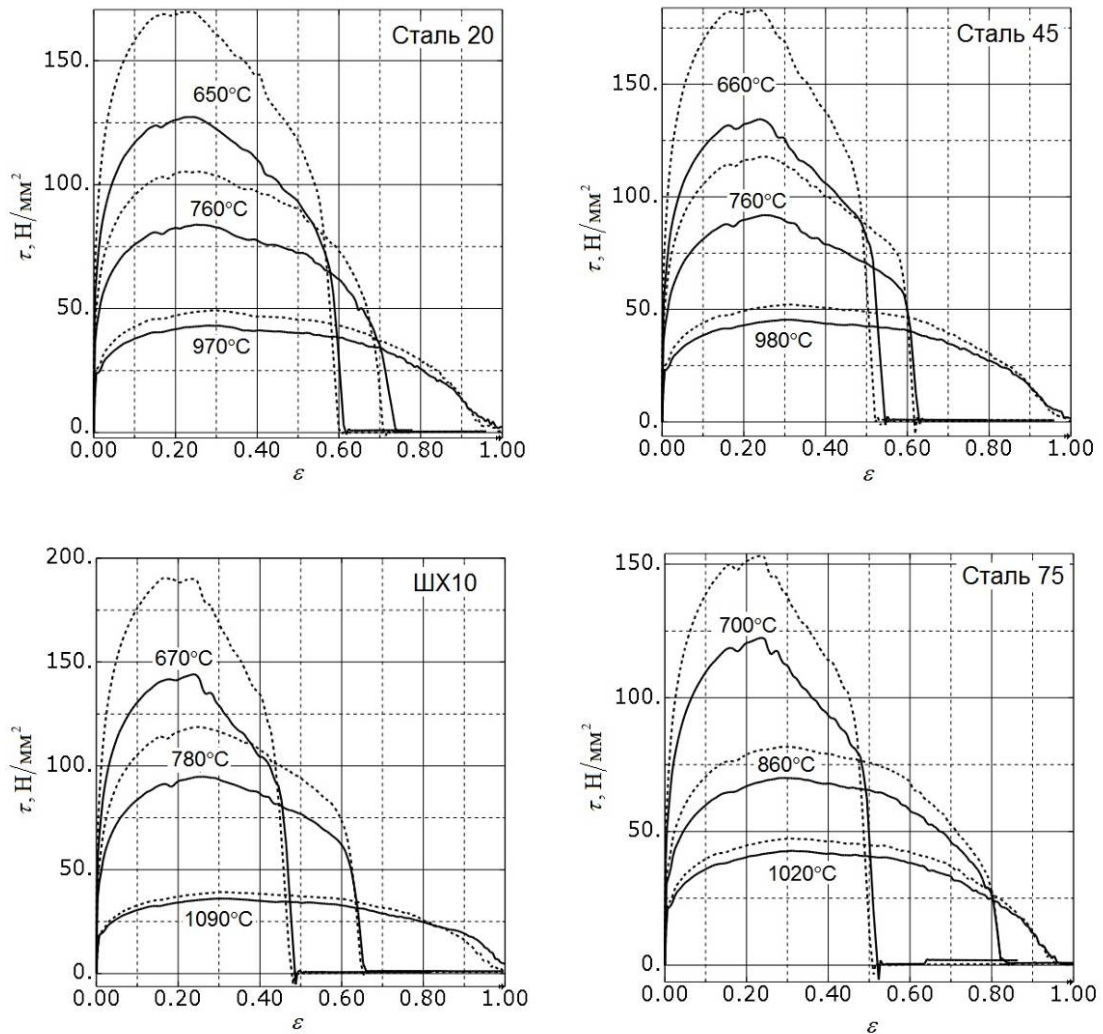


Рисунок 4.4 – Криві питомого опору розрізанню при мінімально (—) і максимально (---) допустимому вмісті хімічних елементів

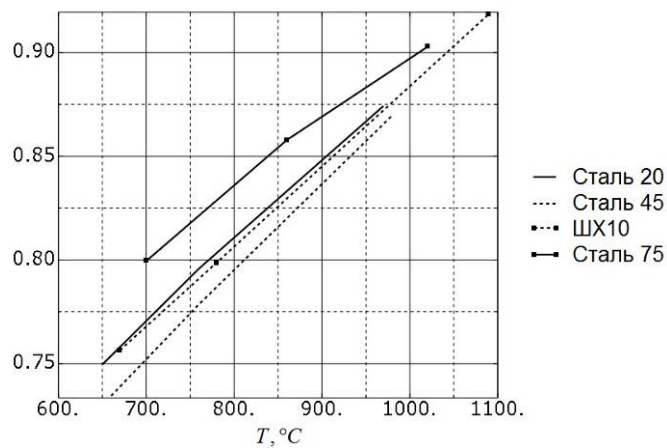


Рисунок 4.5 – Співвідношення питомого опору розрізанню, отримані за результатами моделювання МСЕ, при мінімально допустимому вмісті

Як вже зазначалося (див. підрозділ 3.7) при холодному розрізанні механічні властивості для однакових сталей суттєво різняться в наслідок способу виробництва та термічної обробки. Розглянемо вплив ряду факторів на енергосилові та кінематичні параметри процесу, використовуючи СЕ модель плоскої задачі розрізання паралельними ножами, яка враховує жорсткість станини.

При описанні механічних властивостей матеріалу використовували відповідну модель та характеристики зразків наведені в підрозділі 3.7 (див. табл. 3.8).

В ході дослідження ставилася задача шляхом СЕ моделювання оцінити вплив кінематичних параметрів реалізації процесу та механічних властивостей матеріалів на значення максимального питомого опору розрізанню τ_{\max} та відносного проникнення ножів в метал до сколювання ε_H .

Вплив швидкості розрізання (руху ножа) на вказані параметри спостерігали на прикладі розділення заготовок перерізом 25×25 мм при швидкості руху ножа 25, 100, 200, 300, 400 і 500 мм/с. Зокрема на рис. 4.6 представлені залежності питомого опору розрізанню τ в залежності від відносного проникнення ε , отримані за результатами моделювання МСЕ, для різних марок сталей та при відповідних швидкостях розрізання, а на рис. 4.7 представлені залежності відношення максимального опору розрізання при кожній відносній швидкості розрізання $\tau_{\max}(V_{h_i})$ до відповідного значення $\tau_{\max}(V_h = 12)$ отриманого при відносній швидкості $V_h = 12 \text{ c}^{-1}$ ($V = 300 \text{ мм} / \text{с}$), а також відповідних значень відносного проникнення ножів при сколюванні ε_H для різних відносних швидкостей V_h .

Як можна бачити, для представлених марок сталей, в досліджуваному діапазоні спостерігається зменшення в межах 4...6% максимального значення опору розрізанню зі зменшенням швидкості розрізання. Також, спостерігається вплив швидкості розрізання на величину відносного проникнення ножів при сколюванні, при цьому в діапазоні швидкостей $V_h \geq 8 \text{ c}^{-1}$ наявні відмінності в значеннях не перевищують 5%, а подальше зменшення швидкості для певних марок може призводити до більш суттєвого (10...50%) зростання.

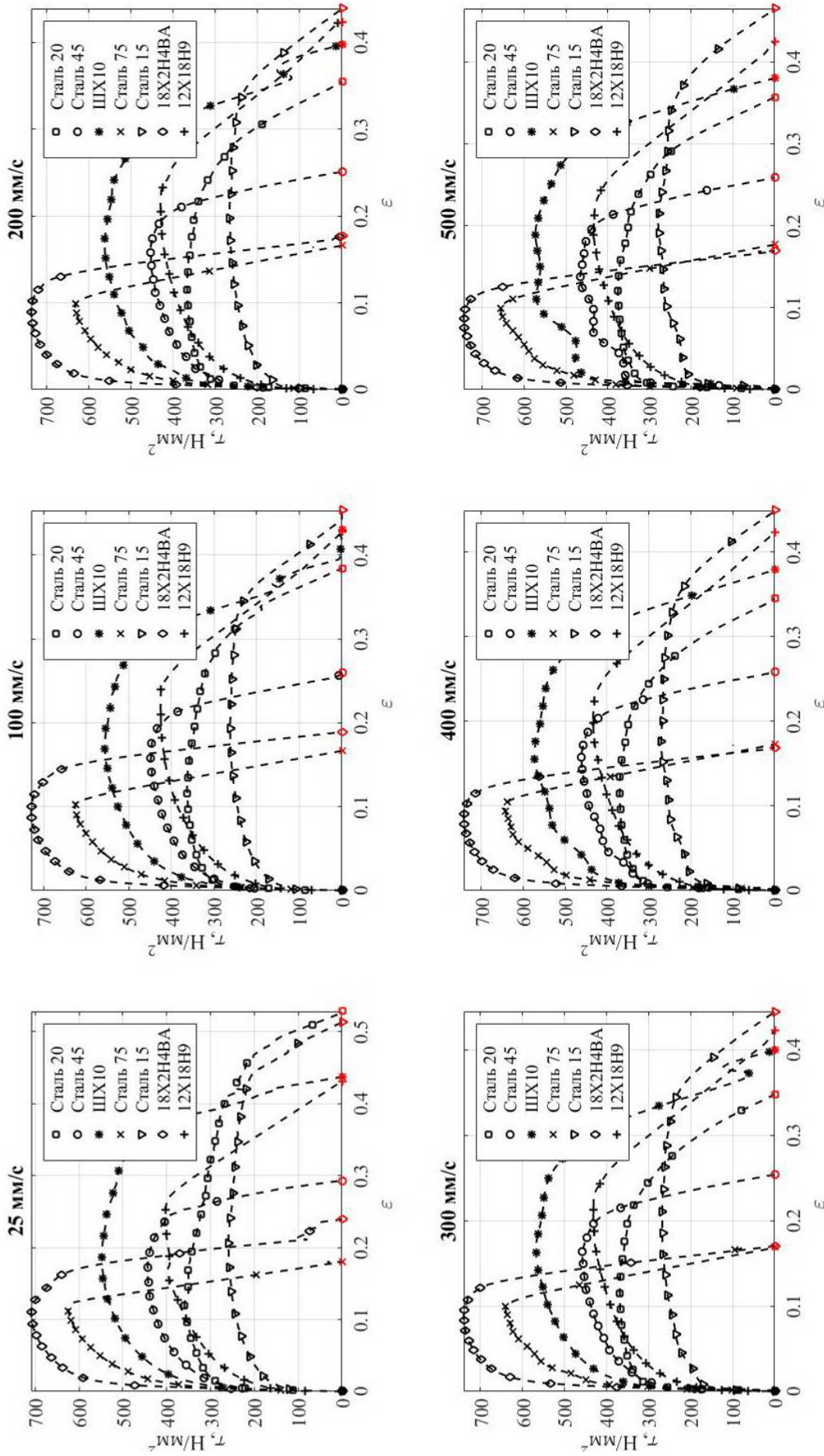


Рисунок 4.6 – Криві питомого опору розрізанню за результатами моделювання МСЕ, для різних марок сталей та при відповідних швидкостях розрізання (руху ножа)

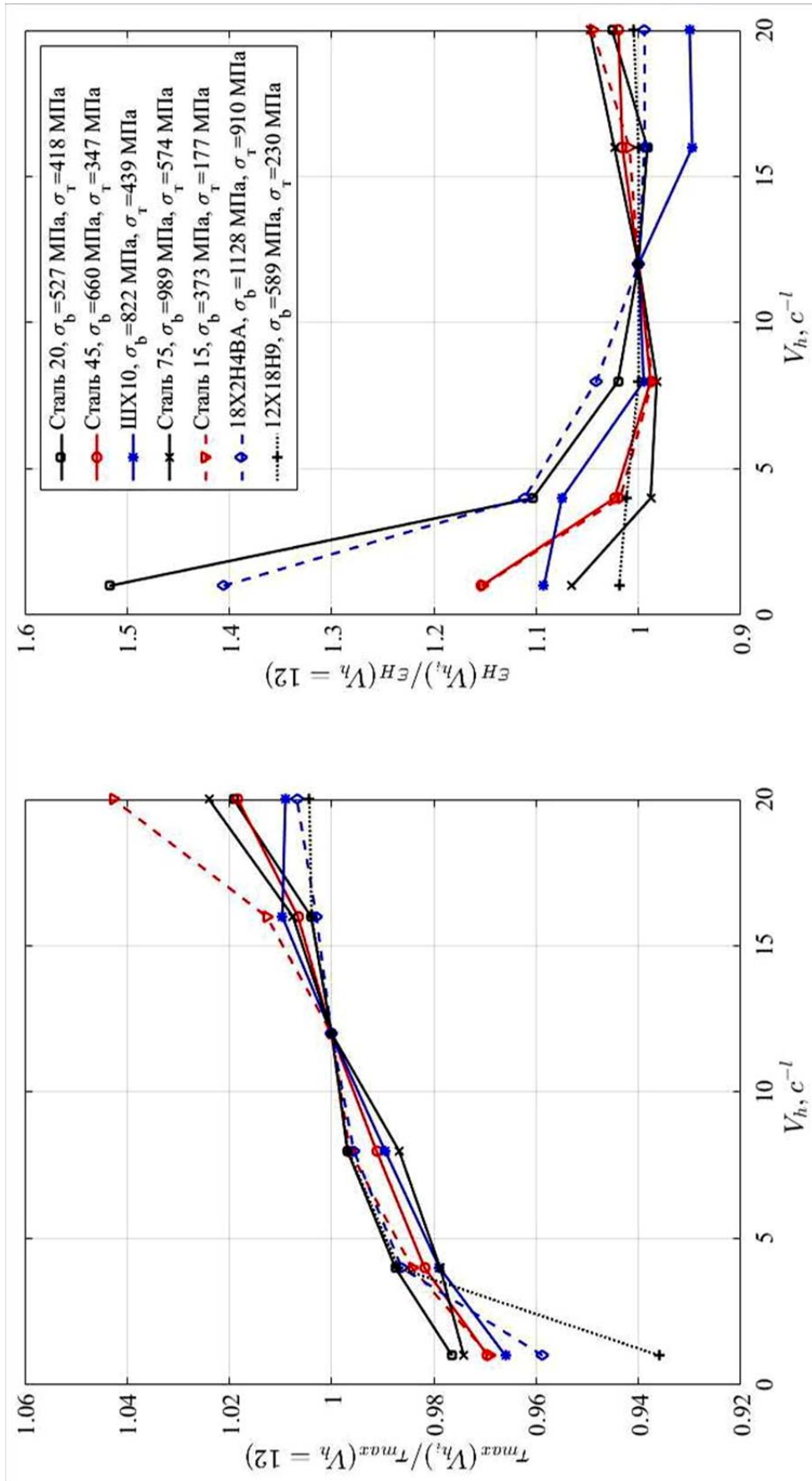


Рисунок 4.7 – Залежності відношення максимального опору розрізанню τ_{max} та відносного проникнення ножів при сколюванні ε_H при кожній відносній швидкості розрізання V_{hi} до відповідного значення отриманого при відносній швидкості $V_h = 12 c^{-1}$

Також очевидно, що ступінь впливу даного параметру для різних марок відмінний, а отже це свідчить про те що вплив на означені вище співвідношення більш складний і ширший. Тому, з метою встановлення частинного впливу інших можливих параметрів здійснювали моделювання процесу розрізання МСЕ за умов варіювання: границі текучості; відносного подовження при розтягуванні; висоти розрізуваного перерізу.

На рис. 4.8 представлені відповідні залежності відношення максимального опору розрізанню $\tau_{\max}(\sigma_{0,2_i})$ при варіюванні значення границі текучості в діапазоні $\pm 10\% \sigma_{0,2}$ до значення границі текучості за даними експериментів $\tau_{\max}(\sigma_{0,2})$, а також відповідних значень відносного проникнення ножів при сколюванні ε_H . Як можна бачити з представлених залежностей вплив даного параметру на максимальне значення опору розрізанню практично відсутнє, оскільки не перевищує 1,5%, що цілком можливо є накопичуваною похибкою машинного розрахунку. Проте вплив на відносне проникнення ножів при сколюванні достатньо суттєвий і для окремих марок сталей може сягати 14%. А отже цей параметр може мати значення при визначенні енергосилових параметрів інших процесів розділення.

Аналогічно досліджувався частинний вплив відносного подовження при розтягуванні в діапазоні $\pm 20\%$ від значення у матеріалі за даними експериментів δ .

На рис. 4.9 представлені відповідні залежності відношення максимального опору розрізання $\tau_{\max}(\delta_i)$ при варіюванні відносного подовження при розтягуванні до значення за даними експериментів $\tau_{\max}(\delta)$, а також відповідних значень відносного проникнення ножів при сколюванні ε_H . Аналіз отриманих залежностей вказує, що вплив даного параметру в зазначеному діапазоні практично незначний для максимального опору розрізання (в межах накопичуваної похибки машинного розрахунку), проте має достатньо суттєве значення на відносне проникнення ножів при сколюванні. Зокрема збільшення або зменшення відносного подовження при розтягуванні призводить до збільшення відносного проникнення ножів при сколюванні в зазначеному діапазоні в межах $\pm 6\%$.

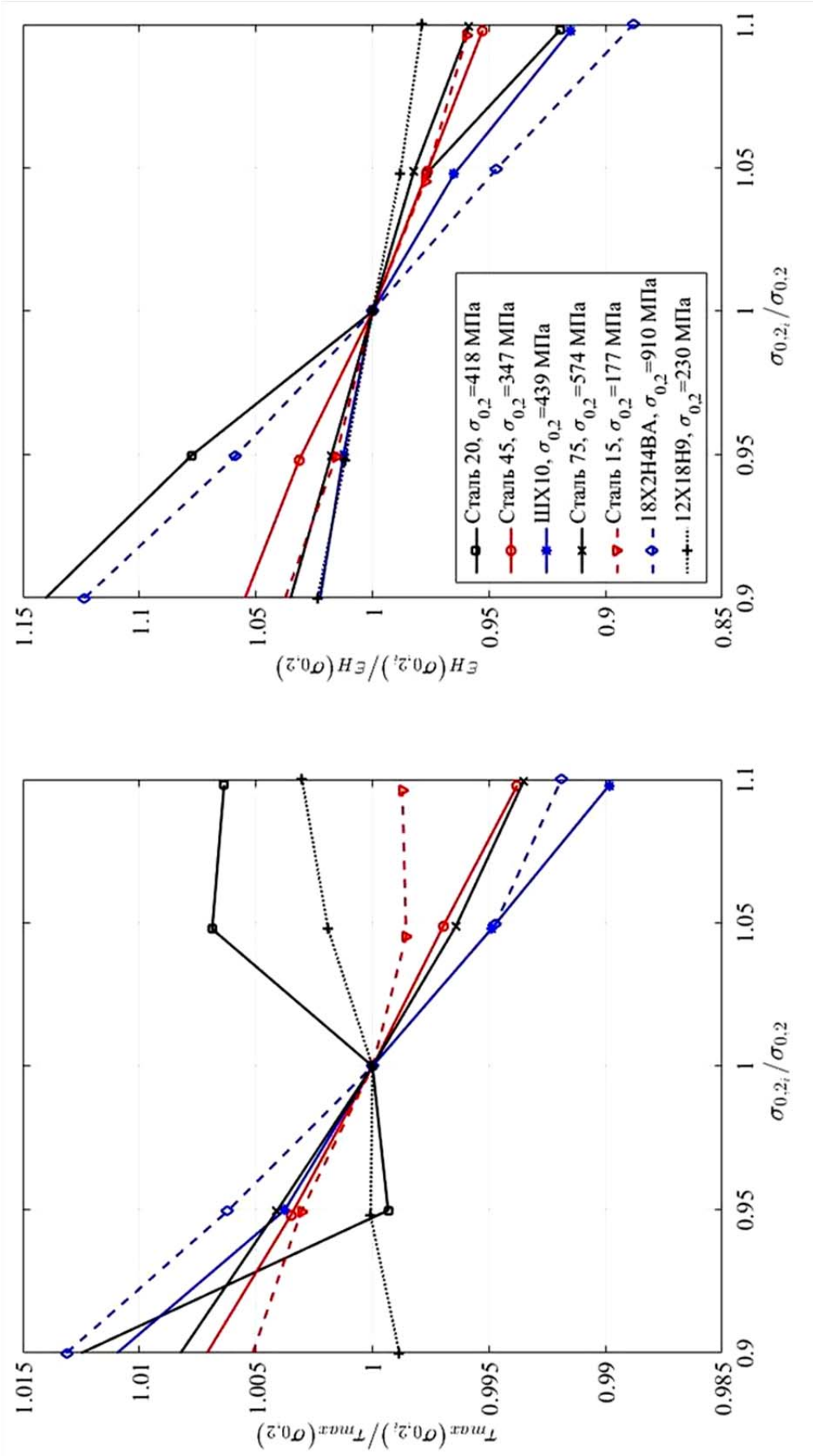


Рисунок 4.8 – Залежності відношення максимального опору розриванню τ_{max} та відносного проникнення ножів при сколюванні ε_H при різних значеннях границі текучості $\sigma_{0.2i}$ до відповідного значення отриманого при границі текучості

$\sigma_{0.2}$

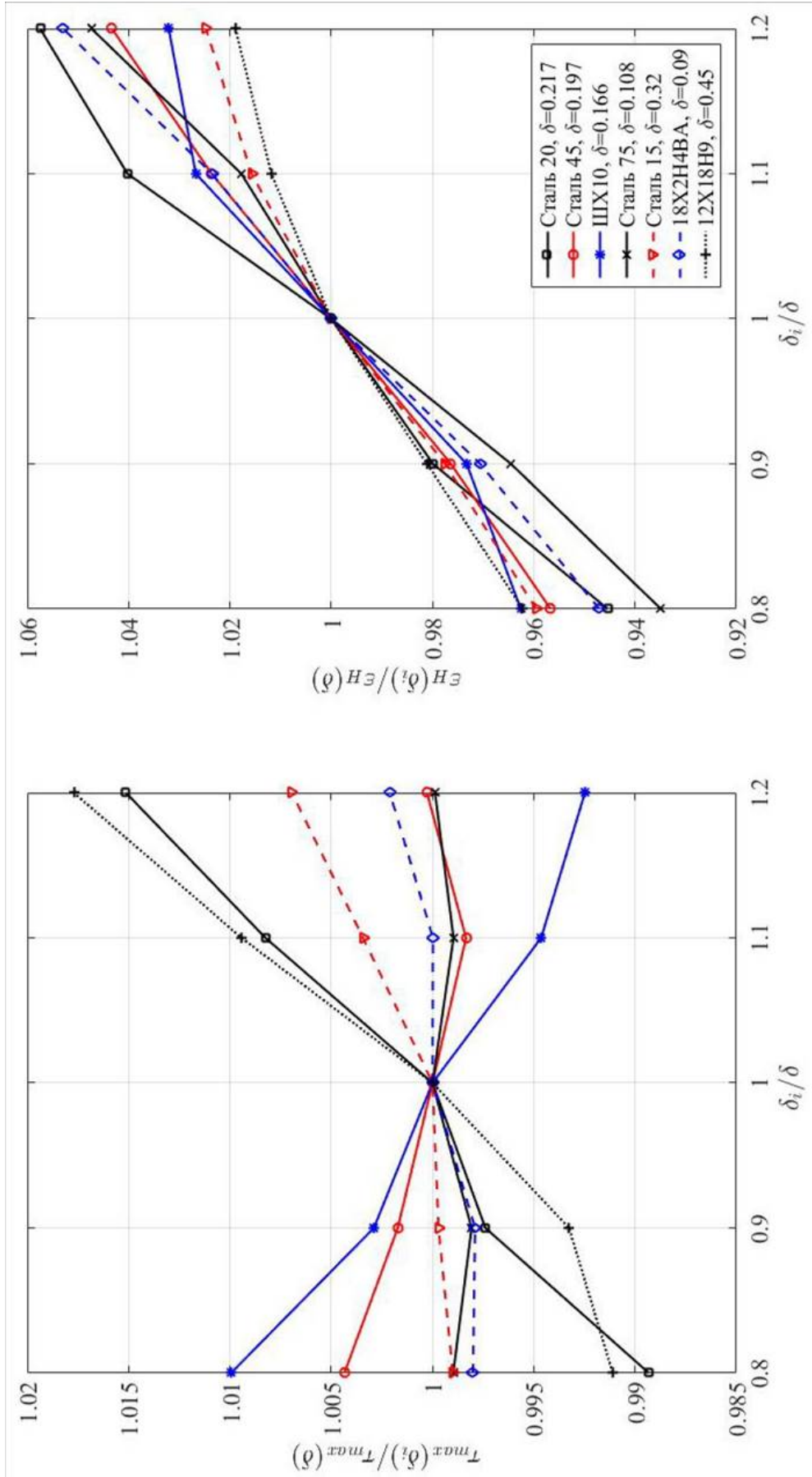


Рисунок 4.9 – Залежності відношення максимального опору розрізанню τ_{max} та відносного проникнення ножів при сколюванні ε_H при різних значеннях відносного подовження при розтягуванні δ_i до відповідного значення отриманого при відносного подовження при розтягуванні δ

Також вивчався частинний вплив висоти перерізу металу при розрізанні. При цьому, для отримання максимально наближених до частинного впливу результатів застосовували наступні обмеження:

- відносну швидкість розрізання утримували на рівні $V_h = 12 c^{-1}$, шляхом пропорційного зменшення швидкості руху ножа;
- величину ефективного пластичного переміщення, при якому відбувається повне руйнування \bar{u}_f^{pl} , змінювали пропорційно висоті перерізу металу при розрізанні.

Залежності відношення максимального опору розрізанню τ_{max} та відносного проникнення ножів при сколюванні ε_H при різних значеннях висоти розрізуваного перерізу H_i до відповідного значення отриманого при висоті розрізуваного перерізу $H=25$ мм представлені на рис. 4.10.

Як можна бачити, при зменшенні висоти перерізу в досліджуваному діапазоні від 25 до 1 мм, прослідковується чітка тенденція до збільшення, як максимального опору розрізанню межах 4...9%, так і відносного проникнення ножів при сколюванні до 32,5%. Даний факт може пояснюватися зміною кінематичних умов в зоні розрізання, що цілком підтверджується експериментальними даними (див. розділ 6).

Таким чином, можна стверджувати, що представлені в підрозділі 3.7 модель механічних властивостей матеріалів в холодному стані дозволяє враховувати вплив широкого кола факторів і отримувати результати моделювання котрі добре узгоджуються з експериментальними даними. Запропонований підхід дозволяє отримувати достатньо точні результати для широкого діапазону сталей незалежно від способу термічної обробки, що безумовно сприятиме уточненню розрахунків та отриманню нових технічних і технологічних рішень.

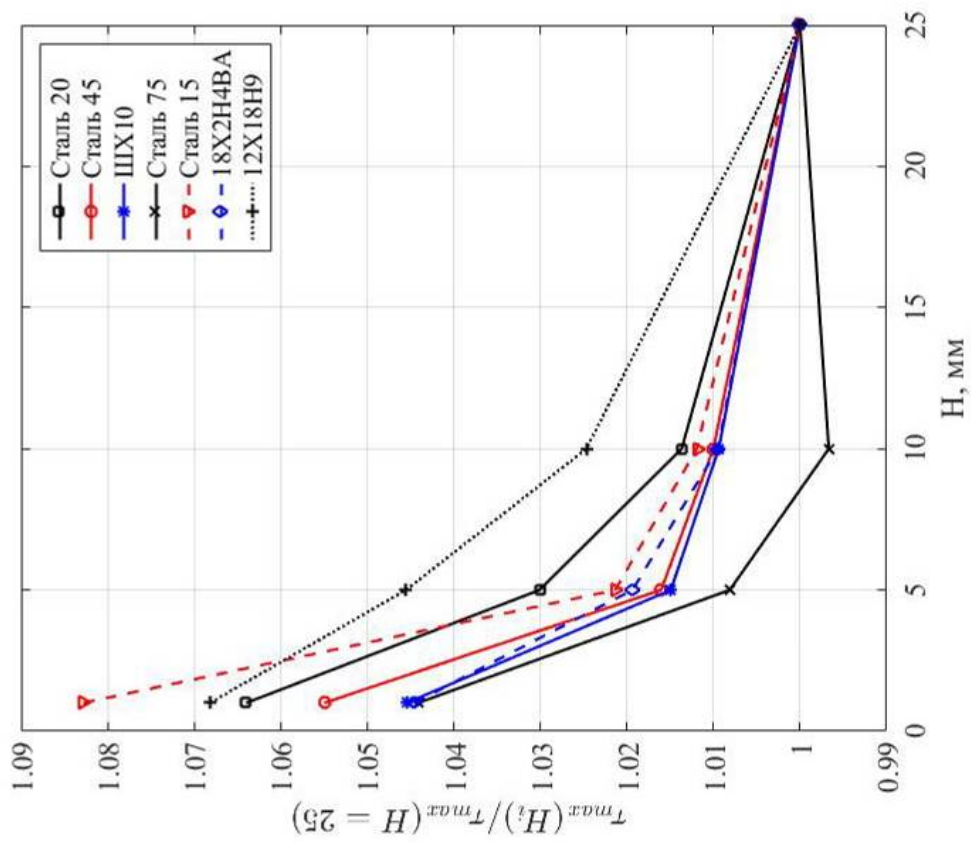
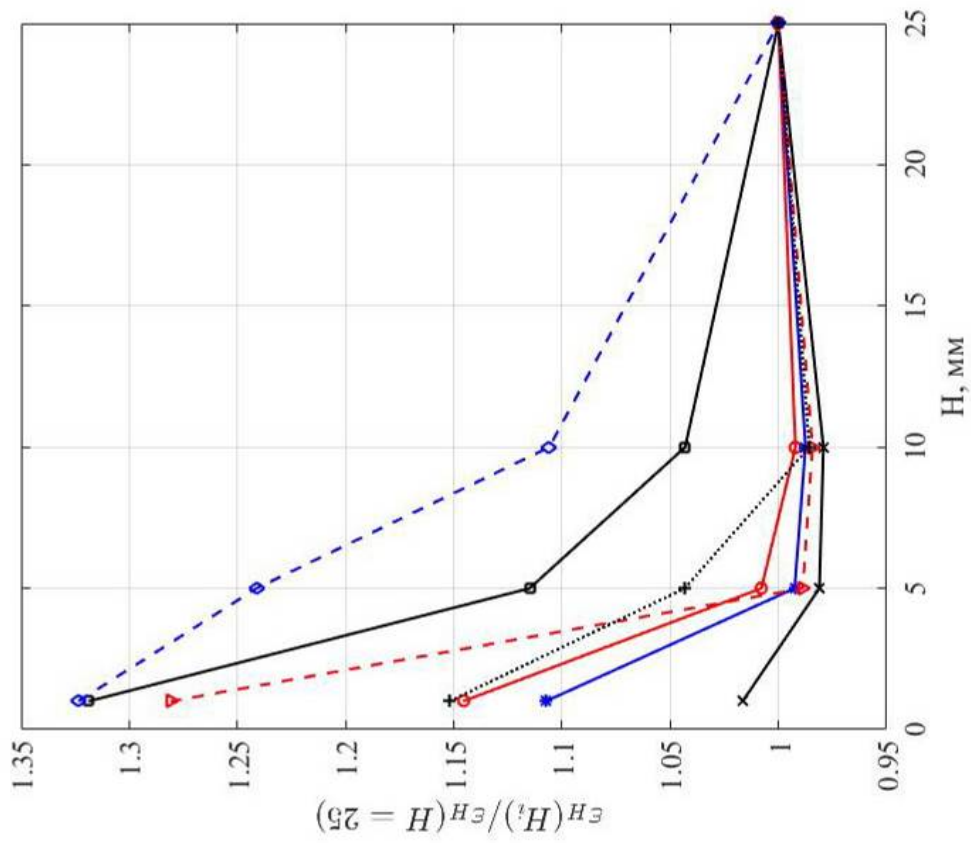


Рисунок 4.10 – Залежності відношення максимального опору розрізанню τ_{max} та відносного проникнення ножів при сколюванні ε_H при різних значеннях висоти розрізуваного перерізу H_i до відповідного значення отриманого при висоті розрізуваного перерізу $H=25$ мм

4.1.2 Тривимірна модель процесу поперечного розділення на ножицях квадратних сортових заготовок в гарячому стані

В практиці металургійного виробництва на машинах безперервного лиття сортових заготовок (МБЛЗ), процес поперечного розрізання на мірні довжини, здійснюється на летючих гідравлічних ножицях при повній кристалізації заготовки. З урахуванням специфіки безперервного лиття саме сортових заготовок, що мають квадратну форму поперечного перерізу, на даних ножицях поперечного розрізання використовують ножі трикутної форми з траєкторією їх взаємного переміщення, нахиленою під кутом $\pi/4$ до горизонтальної площини (рис. 4.11).

При цьому, як показує практика конструювання та експлуатації такого типу ножиць [40], різальний інструмент може мати різні конструктивні виконання. Зокрема (див. рис. 4.11,в), кут розкриття ножів α трикутної форми може бути, як менший, так і більший 90° , а контактні поверхні ножів можуть бути або паралельні бічним поверхням заготовки, або мати деякий ухил β , з метою загострення різальних кромки.

Вочевидь, що таке виконання ножів впливає не тільки на техніко-економічні показники процесу (ножі з ухилом контактної поверхні не можна розгорнути для подальшого використання при зношуванні різальної кромки), але і здатне істотно змінювати форму заготовки в зоні, прилеглої до площини зрізу. При цьому форма головної і хвостової зон заготовки після розрізання, може бути джерелом динамічних навантажень при подальшому транспортуванні та прокатуванні.

Застосування МСЕ дозволяє значно розширити уявлення про протікання процесу розділення фасонними ножами і оцінити вплив конструктивних параметрів ножа на якість зрізу, що буде сприяти підвищенню ступеня наукової обґрунтованості при прийнятті технологічних і конструктивних рішень по застосуванню конфігурації ножа [371].

З цією метою була розроблена тривимірна математична модель (рис. 4.12), що містить два абсолютно жорстких недеформовних фігурних ножі – верхній і нижній, а також деформовний брус – заготовку квадратного перерізу.

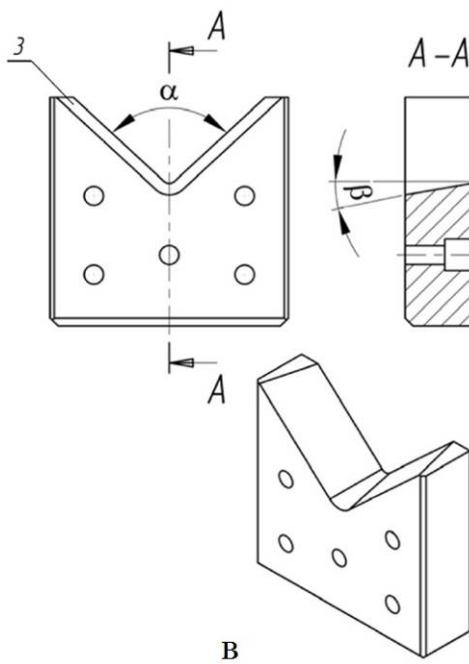
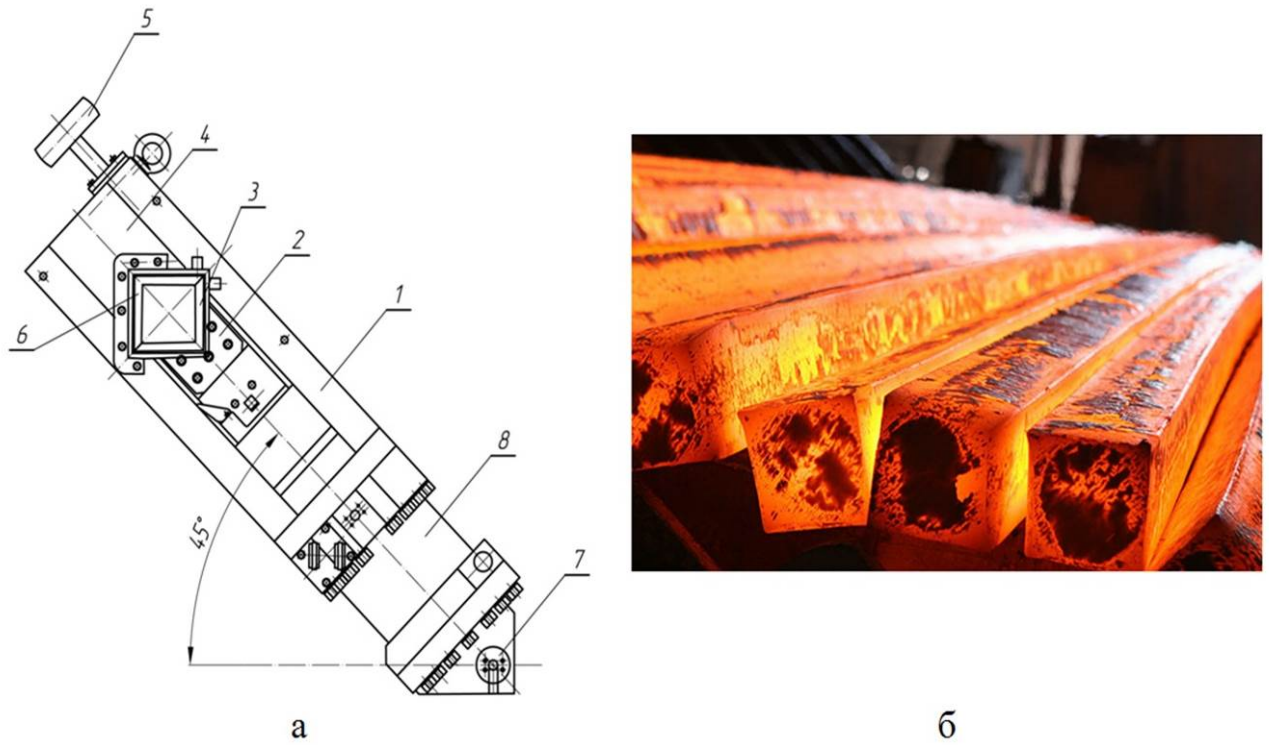


Рисунок 4.11 – Загальний вигляд (а) гідравлічних ножиць конструкції НКМЗ, використовуваних на ножицях МБЛЗ ПАТ "СМЗ" для поперечного розрізання на мірні довжини безперервнолитих заготовок і вигляд порізаних заготовок (б) і профілювання ножа (в)

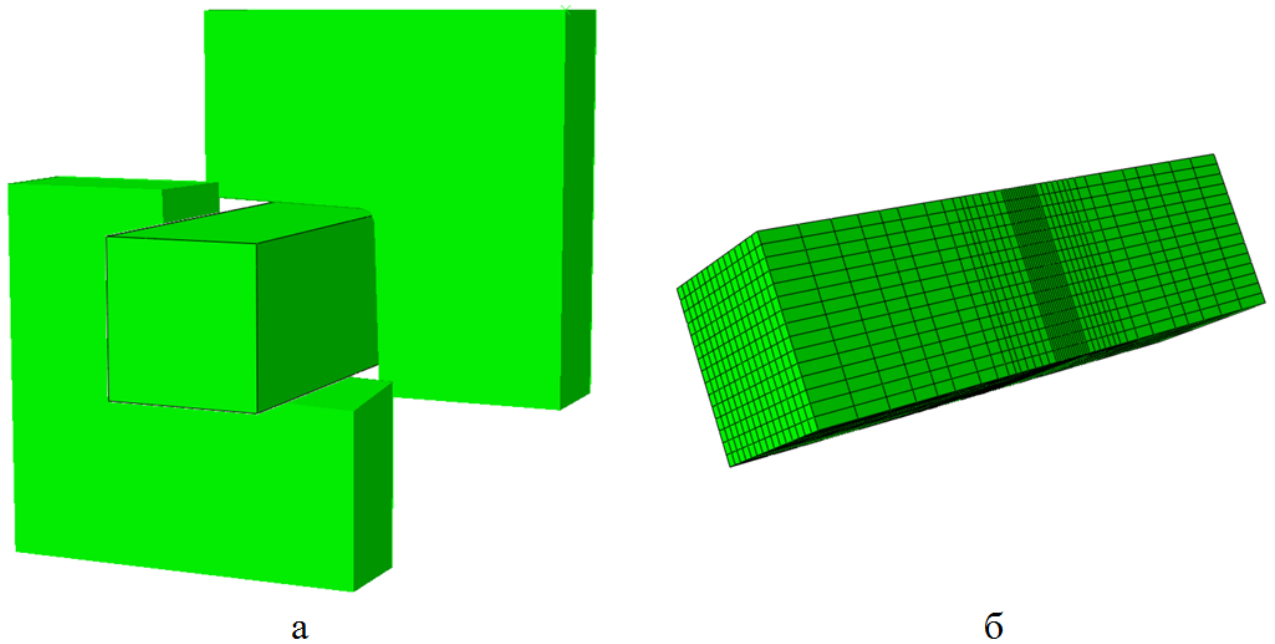


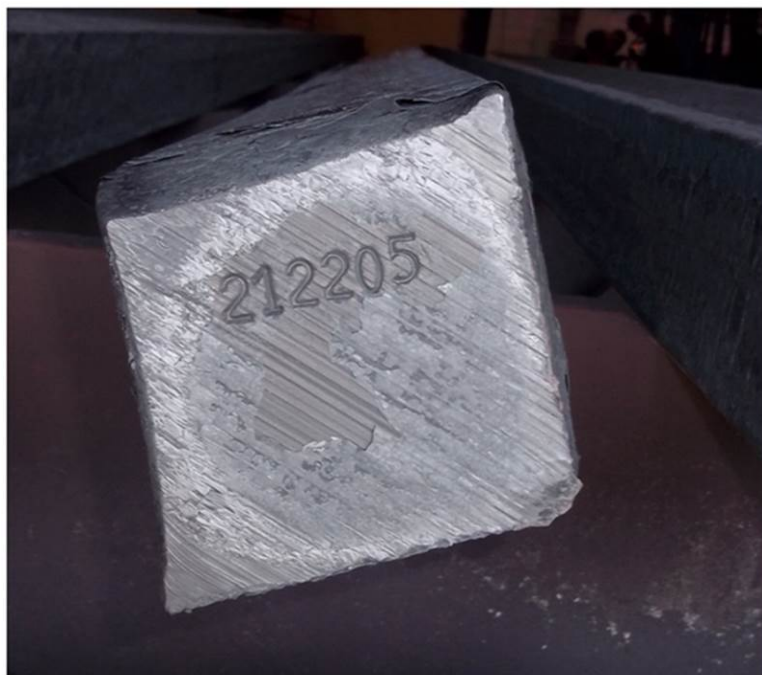
Рисунок 4.12 – Загальний вигляд моделі (а) і заготовки з нанесеною сіткою (б)

При цьому за аналогією з реальною конструкцією ножиць рухається нижній ніж, тоді як верхній залишається нерухомим.

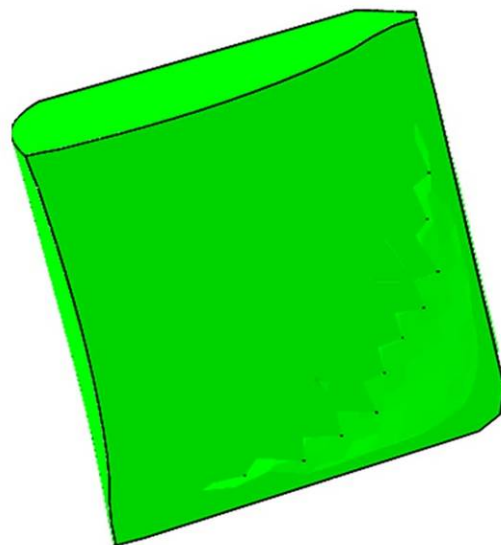
На торцеві поверхні бруса накладалося обмеження по їх переміщенню уздовж поздовжньої осі бруса, що близько до умов розділення довгомірних безперервнолитих заготовок.

Для оцінки працездатності моделі і ступеня достовірності отриманих результатів була проведена симуляція процесу розрізання заготовки перерізом 120×120 мм зі сталі 20 при температурі 970°C зі швидкістю 70 мм/с, що відповідає виробничим умовам.

На рис. 4.13 в якості порівняння представлена форма торцевої поверхні безперервнолитої заготовки після поперечного розділення на ножицях (рис. 4.13, а) і за результатами моделювання (рис. 4.13, б). З представлених зображень добре видно, що форма реальної заготовки і отриманої в результаті моделювання мають досить близьку конфігурацію. Розбіжність за максимальним значенням сили розрізання не перевищило 5%.



а



б

Рисунок 4.13 – Форма торцевої поверхні безперервнолитої заготовки після поперечного розділення на ножицях (а) і за результатами моделювання (б)

Таким чином, можна стверджувати, що розроблена тривимірна математична модель адекватно описує процес гарячого розділення на ножицях безперервнолитої сортової заготовки і може використовуватися для оцінки енергосилових параметрів і показників якості поперечного розрізання фігурними ножами.

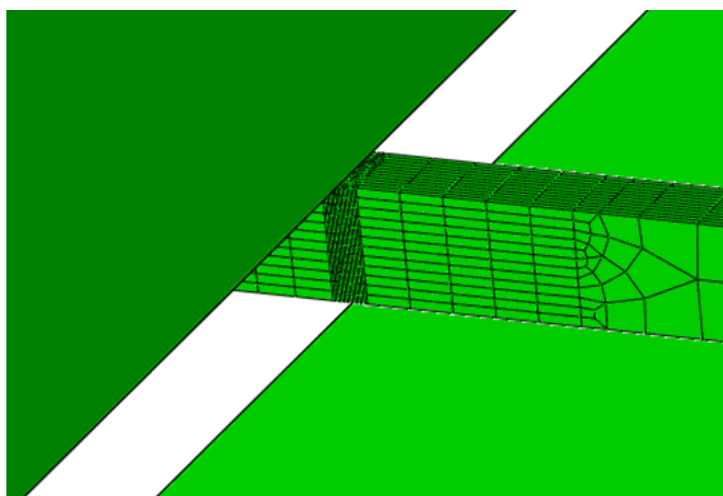
4.1.3 Моделювання напружено-деформованого стану металу при поперечному розрізанні квадратних заготовок в холодному стані на ножицях з паралельними і фігурними ножами

Як вже зазначалося в підрозділі 1.3 класичні методики [12,13] при визначенні максимальної сили розрізання профілів відмінних від квадратного, рекомендують використовувати результати розрахунку щодо розрізання паралельними ножами заготовок еквівалентної площі перерізу.

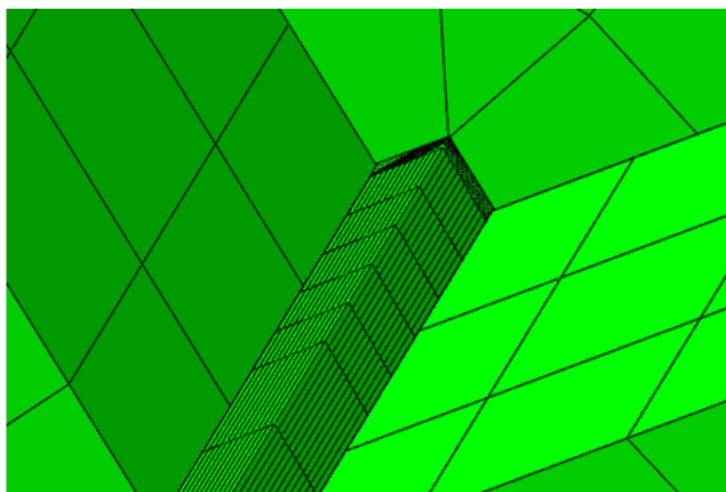
Однак, експериментальні дослідження [40] в цій області показують, що навіть при розділенні заготовок рівного квадратного перерізу в умовах розрізання

паралельними і фасонними (по діагоналі) ножами спостерігається відмінність в максимальній величині сили розрізання.

З метою аналізу НДС металу в осередку розрізання з урахуванням технологічних особливостей реалізації процесу [372], були розроблені тривимірні математичні моделі (рис. 4.14), що описують процес розділення квадратного профілю паралельними (рис. 4.14, а) і фасонними (рис. 4.14, б) ножами та складаються з двох абсолютно жорстких недеформованих тіл – верхнього і нижнього ножів, а також деформованого бруса – розрізуваного профілю квадратного перерізу.



а



б

Рисунок 4.14 – Загальний вигляд моделей розділення квадратного профілю паралельними (а) і фасонними (б) ножами

Крім того, в модель введено пружний елемент та в'язкий демпфер. Рух повідомляється нижньому ножу, тоді як верхній ніж залишається нерухомим, за аналогією з реальною конструкцією ножиць на яких, з метою оцінки адекватності даної моделі, проводилися експериментальні дослідження (див. розділ 6).

В якості зразків моделювали квадратний профіль 10×10 мм з алюмінієвого сплаву AA6066 та наступними механічними властивостями: $\sigma_{0.2} = 360$ МПа, $\sigma_b = 395$ МПа, $\delta = 0,18$. Опір металу деформації, з урахуванням швидкості деформації, визначали за представленим в підрозділі 3.7 алгоритмом.

Швидкість розрізання (руху нижнього ножа) в умовах моделювання повністю збігалася з умовами лабораторної реалізації процесу і склала 30 мм/с.

На рис. 4.15 можна бачити загальний вигляд квадратного профілю одержаного за наслідками моделювання (рис. 4.15, а) і в результаті розрізання на ножицях (рис. 4.15, б), відповідно при використанні паралельного і фасонного ножів.

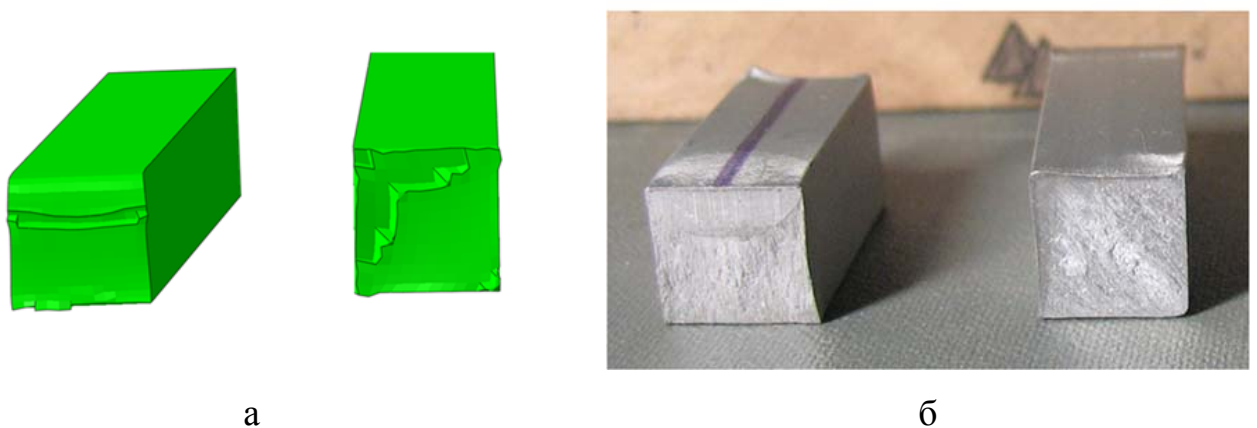


Рисунок 4.15 – Загальний вигляд квадратного профілю одержаного за наслідками моделювання (а) і в результаті розрізання на ножицях (б), відповідно при використанні паралельного (ліві частини зображень) і фасонного (праві частини зображень) ножів

Як можна бачити з представлених зображень, геометрія профілю, а також формування поверхні зрізу, за результатами моделювання досить добре узгоджуються зі зразками отриманими експериментально.

Стосовно енергосилових параметрів розглянутих умов реалізації процесу на рис. 4.16 представлені порівняння розрахункових і експериментальних залежностей сили в ході розрізання при використанні паралельного і фасонного ножів.

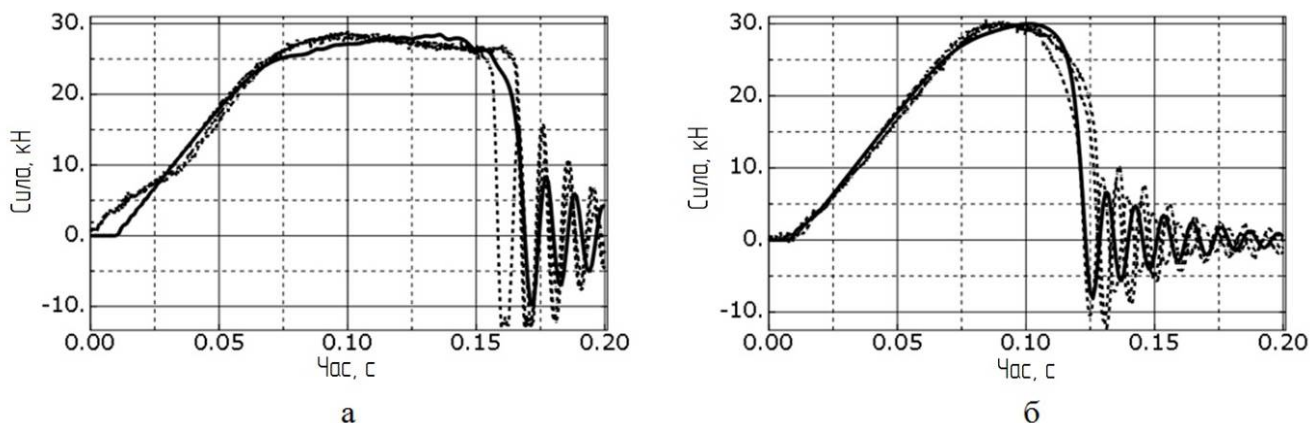


Рисунок 4.16 – Розрахункові (—) і експериментальні (---) залежно сили в ході розрізання при використанні паралельного (а) і фасонного (б) ножів

При цьому можна бачити, що представлені залежності досить добре узгоджуються. Статистична обробка показала величину коефіцієнта кореляції розрахункових і експериментальних даних на рівні 0,874...0,960 при розрізанні паралельними ножами і 0,908...0,978 фасонними.

З огляду на досить високий ступінь збіжності розрахункових та експериментальних даних, а також враховуючи обсяг інформації про НДС матеріалу в процесі розрізання, за результатами моделювання МСЕ представляється можливим розширити уявлення про протікання процесу.

В ході подальшої обробки результатів математичного моделювання МСЕ визначали усереднені показники НДС досліджуваних параметрів для всіх зруйнованих елементів. При цьому зруйновані елементи об'єднували в стовпці і визначали усереднені значення. Такий підхід дозволив розглядати розрізуваний переріз по аналогії з скінченно-різницевою формою статичної рівноваги, коли переріз складається з набору окремо виділених елементарних об'ємів з постійною (паралельні ножі) або змінною (фасонні ножі) висотою по ширині перерізу. В результаті, на даному етапі, стало можливим виявити ряд особливостей характерних процесу розрізання на ножицях квадратних профілів, а в подальшому перейти до роз-

гляду більш простих (по відношенню до МСЕ) одновимірних математичних моделей, які здатні підвищити точність вироблених розрахунків (див. розділ 7).

Зокрема, по ширині перерізу ($x=0$ відповідає осі симетрії) розрізаного профілю (при розрізанні фасонним ножом брали горизонтальну діагональ) були отримані розподіли максимальних значень еквівалентної пластичної деформації $\bar{\varepsilon}^{pl}$ (рис. 4.17, а), еквівалентного напруження по Мизесу σ (рис. 4.17, б) і показника трьохосного напруженого стану η (рис. 4.17, в).

Як можна бачити величина інтенсивності пластичних деформацій (див. рис. 4.17, а), при повному руйнуванні перерізу і розрізанні паралельними ножами збільшується від периферії до вертикальної осі (середнє значення 1,519), а фасонними ножами має дещо коливальний характер (що може бути наслідком дискретності скінченно-елементної моделі) щодо деякої середньої величини (1,747).

Однак якщо проаналізувати залежності, представлені на рис. 4.17, можна відзначити, що при використанні фасонних ножів більший ступінь пластичної деформації досягається за менший проміжок часу, а, отже, і при меншому ході ножа в абсолютному значенні до 12,5% (≈ 4 мм паралельними, $\approx 3,5$ мм фасонними ножами), проте спостерігається певне (порядку 7%) збільшення максимального значення сили розрізання.

У той же час при розрізанні фасонним ножом більш високий ступінь деформації можна пояснити більш стисненими умовами деформування, що підтверджується величиною показника напруженого стану (див. рис. 4.17, в).

Характер зміни даного показника також залежить від схеми реалізації процесу. Так при паралельній схемі розташування ножів, повне руйнування хоч і відбувається практично відразу по всьому перерізу, але починається від вільних бічних поверхонь. Підтвердження цьому можна бачити на рис. 4.15 за характерною формою зони власне різку, причому, як в реальних умовах, так і за результатами моделювання.

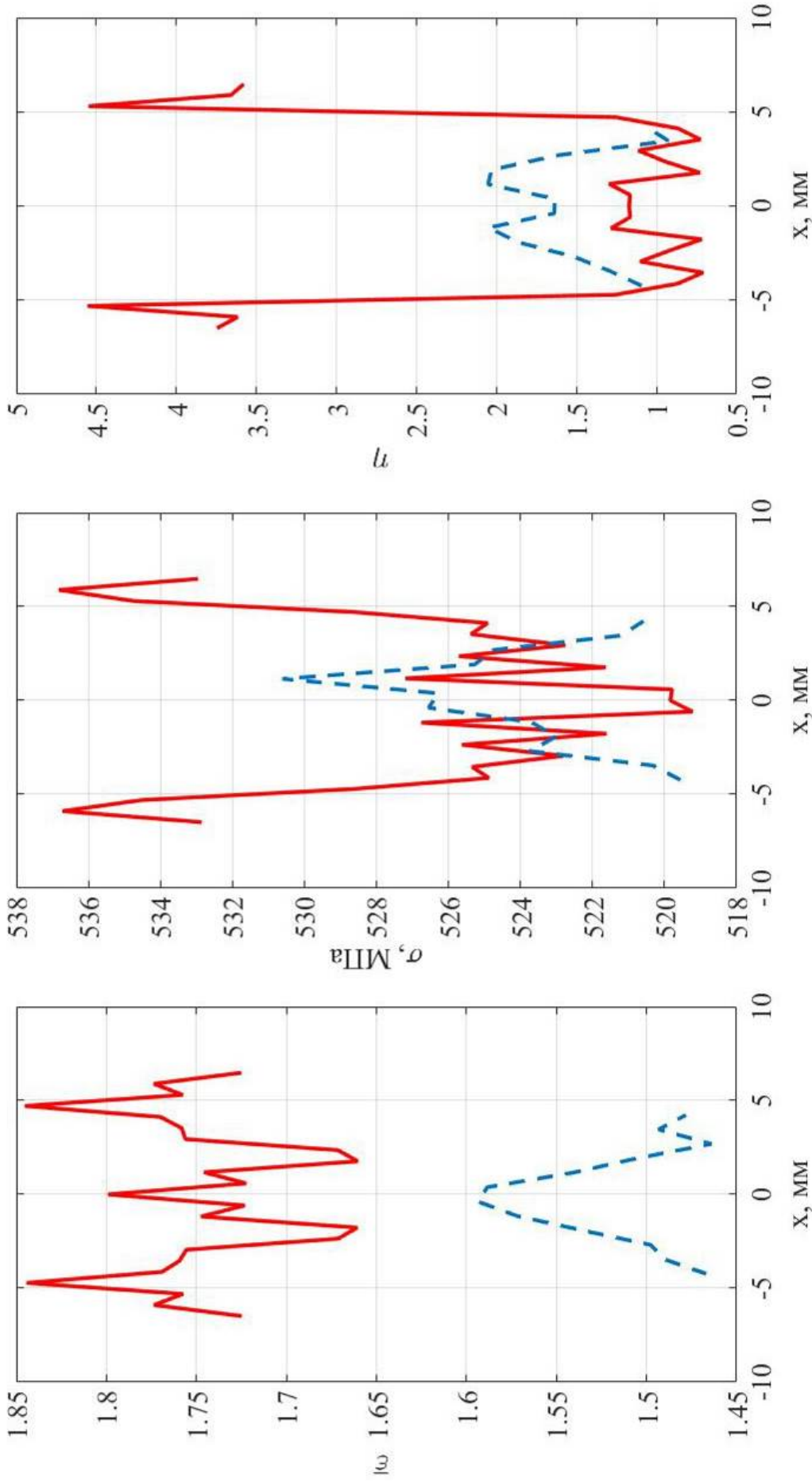


Рисунок 4.17 – Розподіли максимальних значень еквівалентної пластичної деформації (а), еквівалентного напруження по Мизесу (б) і показника трьохосного напруженого стану (в) уздовж горизонтальної осі при розрізанні квадрата паралельними (---) і фасонними (-) ножами

Що стосується схеми з фасонними ножами, то по краях спостерігається практично 4-х кратне збільшення показника напруженого стану, при досить близьких за величиною ступенях пластичної деформації, що, при постійному зазорі між ножами, цілком пояснювано малою висотою даних перерізів і, як наслідок, збільшенням зазору по відношенню до них.

Крім того, можна бачити (див. рис. 4.17, б), що в середній частині перерізів величини максимальних напружень досить близькі при кожній з розглянутих схем, а середні показники різняться менше 0,6% (паралельна схема 523,8 МПа, фасонна – 526,9 МПа). У той же час, на периферії спостерігається істотна різниця величини інтенсивності напружень.

У зв'язку з цим, були отримані розподіли (рис. 4.18) тих же параметрів уздовж горизонтальної діагоналі квадрата, але при відповідних значеннях відносного проникнення ножів в метал стосовно кожного з виділених об'ємів в перерізі.

При цьому дані розподілу отримані тільки для елементів, коефіцієнт пошкоджуваності яких менше 1,0. З представлених залежностей можна бачити, що відносне проникнення до сколу в крайніх перерізах може перевищувати 1,0, що вказує на сингулярність даних областей розрізуваного перерізу в загальному уявленні про процеси розрізання на ножицях.

Крім того, при детальному розгляді представлених розподілів можна відзначити досить добре простежуваний функціональний зв'язок між вхідними і вихідними параметрами, перш за все від товщини металу розрізуваного перерізу.

Таким чином, за умови розширення бази експериментальних досліджень, а також математичних моделей на базі МСЕ, представляється можливим розширити уявлення про процеси, що протікають в металі при розділенні його на ножицях.

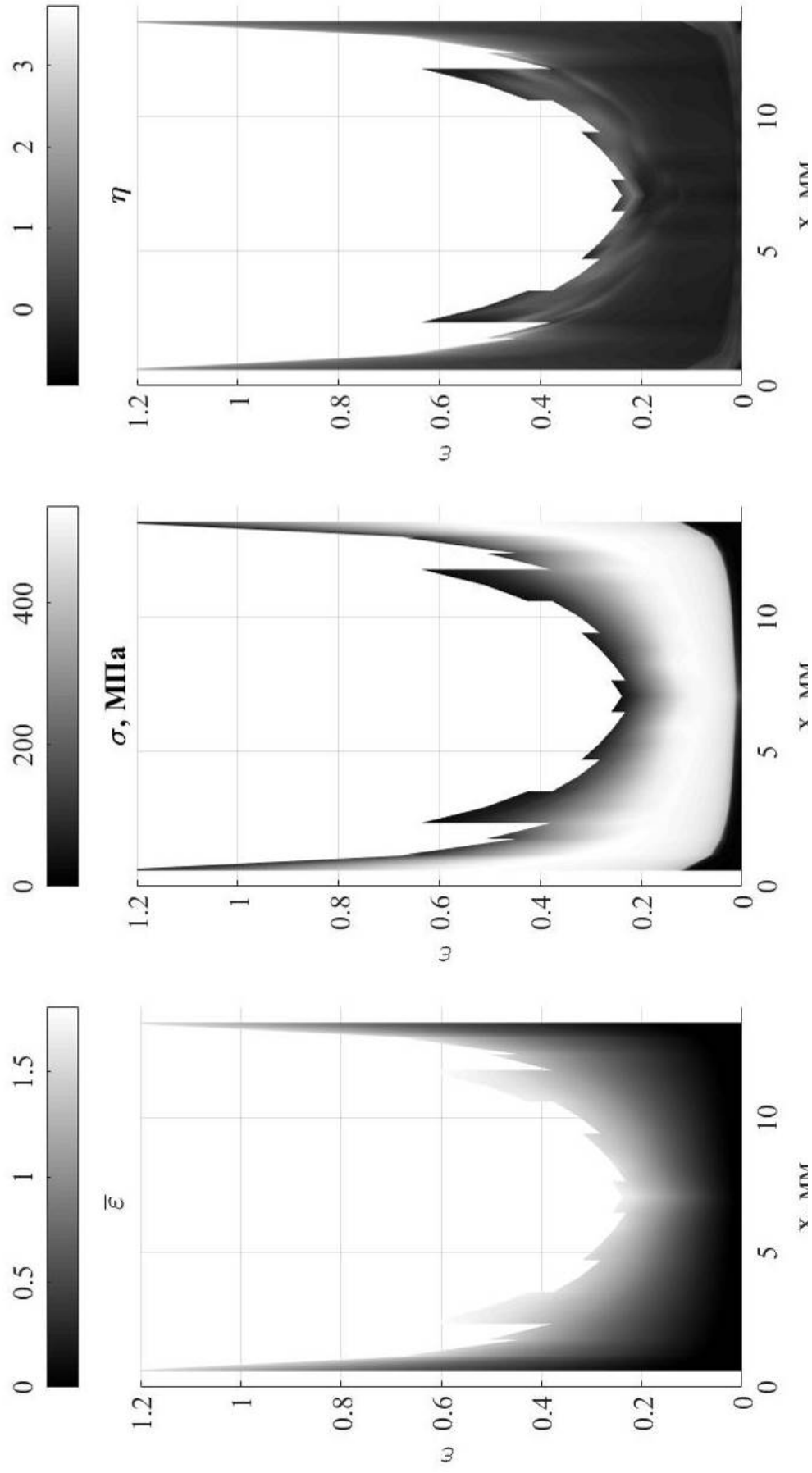


Рисунок 4.18 – Розподіли інтенсивності пластичних деформацій (а), інтенсивності напруження (б) і показника напруженого стану (в) вздовж горизонтальної діагоналі квадрата при відповідних значеннях відносного проникнення ножів в метал

4.2 Математичне моделювання напружено-деформованого стану і основних показників якості при поперечному розрізанні листових заготовок на ножицях похилими ножами і з криволінійним ножем

4.2.1 Аналіз впливу конструктивних особливостей різального інструменту на енергосилові параметри і показники якості процесу поперечного розрізання листових заготовок на ножицях з похилими (шевронними) ножами

У ножицях такої конструкції (див. підрозділ 1.2) для реалізації процесу розрізання використовують верхній (або нижній) шевронний ніж, що дозволяє отримати ряд переваг, а саме, зниження сили розрізання, за рахунок нахилу різальних кромки ножа на кут, і рівномірного розподілу навантаження на гідроциліндри, за рахунок центрування листа шевронним ножем.

У той же час, практика застосування шевронного ножа показала наявність дефекту в вигляді «галочки» (або «будиночок»), який формується на відрізуваній частині, котра розташовується під шевронним ножем (рис. 4.19).

В основному, даний дефект не перевищує вимог по площинності готового гарячекатаного листа, проте істотно псує його товарний вигляд і, в ряді випадків, вимагає додаткової його обробки.

У роботах [102-104] можна знайти технічні рішення, спрямовані на задоволення вимог якості, що пред'являються до площинності готового гарячекатаного листа. Суть даних рішень полягає в конструктивних змінах конфігурації ножа.

Зокрема, в технічному рішенні ПрАТ "НКМЗ" [102] передбачається поетапне виконання ножа з горизонтальними і похилими ділянками. Технічне рішення, розроблене співробітниками ВАТ "Северсталь" [104], передбачає наявність горизонтальної площадки в вершині сходження похилих площин ножа, довжину, якої пропонується визначати за емпіричною формулою.



а



б

Рисунок 4.19 – Вигляд торцевої поверхні листів, порізаних шевронними ножами: а – загальний вигляд; б – вигляд в області змикання різальних кромek шевронного ножа

Дані рішення дозволяють поліпшити якість розрізуваного листа з приводу появи залишкової деформації, що перевищує допуски на прямолінійність у вертикальній площині. Однак, вочевидь, що зниження величини дефекту, неминуче буде сприяти збільшенню максимальної сили розрізання, що в свою чергу може призводити, або до перевантаження ножиць, або до скорочення сортаменту розрізуваних листів.

З метою розширення уявлення про протікання процесу розрізання товстих листів шевронними ножами і оцінки впливу окремих факторів на якість і енергосилові параметри процесу була розроблена тривимірна скінченно-елементна математична модель, що описує процес поперечного розрізання листів шевронними ножами [373].

Модель (рис. 4.20) являє собою одну другу симетричну частину і складається з чотирьох абсолютно жорстких недеформовних тіл: притиск, стіл, верхній (шевронний) і нижній (прямий) ножі, а також деформовного бруса, що моделює розрізуваний лист. Структура сітки нерівномірна, згущується в зоні розрізання (рис. 4.21).

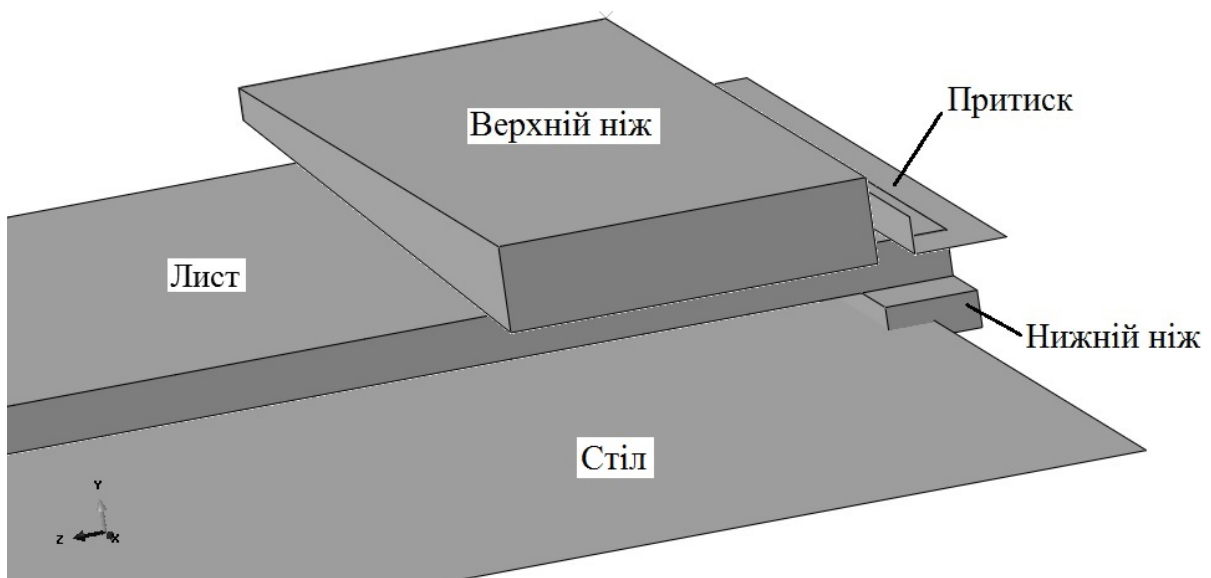


Рисунок 4.20 – Загальний вигляд моделі розрізання шевронним ножем

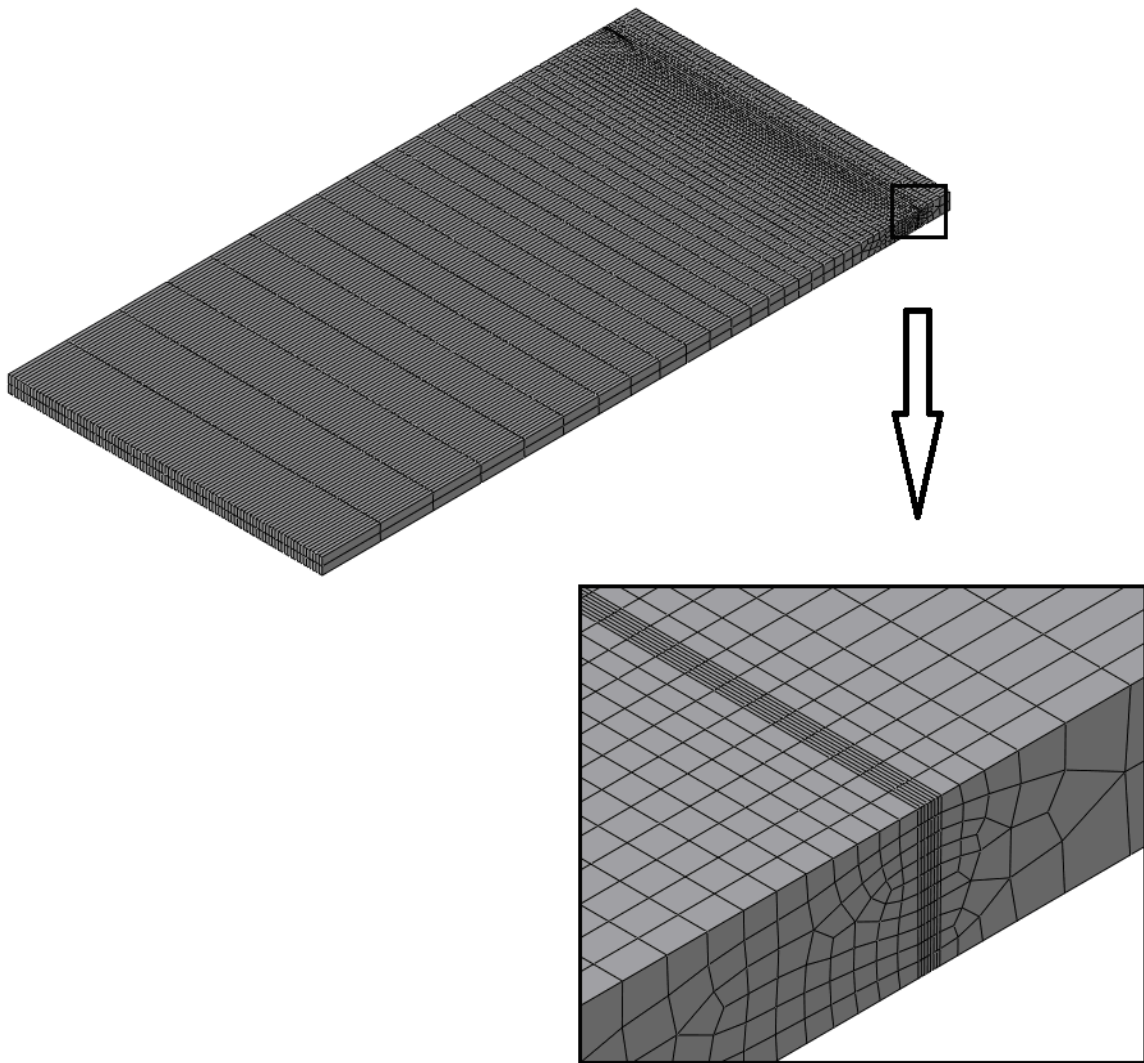


Рисунок 4.21 – Структура сітки

Для забезпечення симетричності на бічну поверхню бруса (розрізаного листа), розташовану в площині YZ , накладали відповідні обмеження властиві площині симетрії.

При цьому, за аналогією з реальною конструкцією ножиць, нижній ніж, рухався одночасно з притиском, а верхній ніж і стіл залишалися нерухомими.

При моделюванні в якості розрізаного матеріалу була обрана сталь Ст2пс з наступними механічними властивостями [365]: $\sigma_{0,2} = 215 \text{ МПа}$, $\sigma_b = 330 \text{ МПа}$.

В ході дослідження були проведені розрахунки з наступними вихідними даними: товщина розрізаного листа – 5, 15 і 25 мм; ширина розрізаного листа – 1000 мм; швидкість розрізання – 70 мм/с; кут нахилу різальних кромek ножа – 3° .

Як приклад, на рис. 4.22 показана кінцева форма торцевого профілю відрізаної частини для листа товщиною 25 мм.

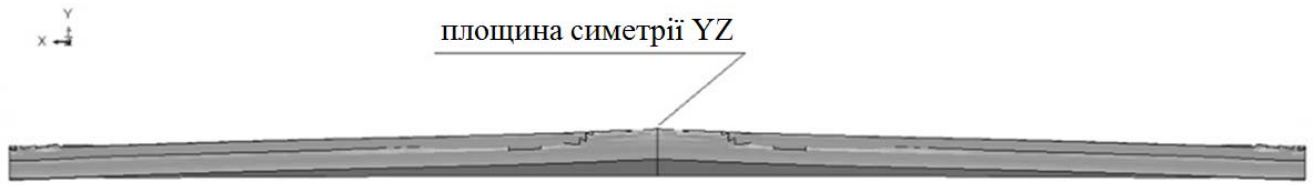


Рисунок 4.22 – Торцевий профіль відрізаної частини листа

За результатами моделювання [373, 374] були отримані залежності сили розрізання (рис. 4.23,а) і геометричні розміри торцевого профілю відрізаної частини (рис. 4.23,б).

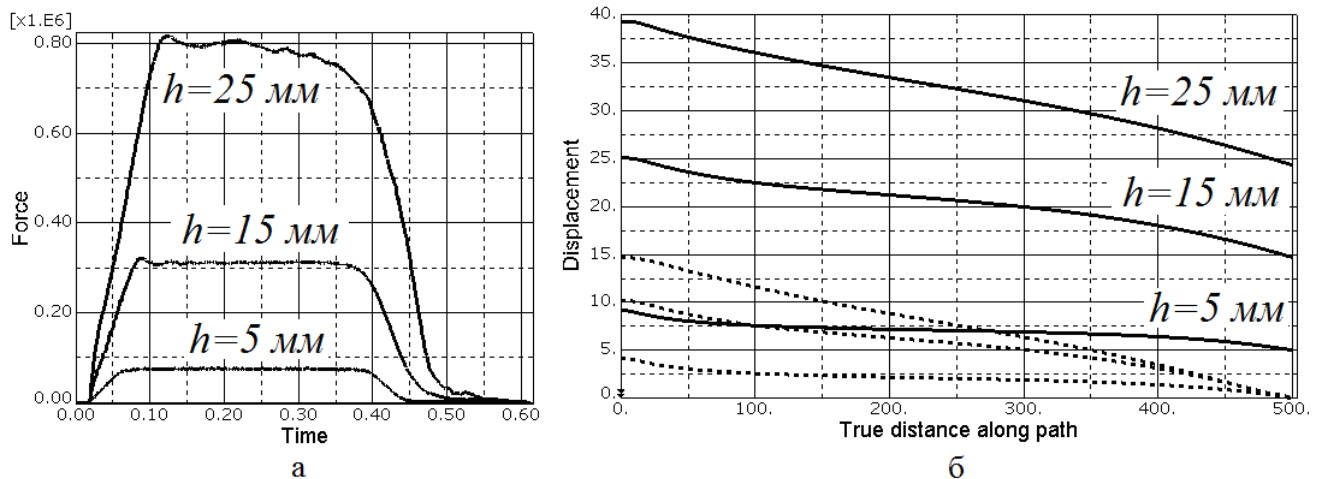


Рисунок 4.23 – Контрольовані параметри за результатами моделювання:

а – залежність сили (Н), що припадає на одну частину шевронного ножа, на стадії розрізання; б – зміщення у вертикальній площині (мм) верхньої (суцільна лінія) і нижньої (пунктирна лінія) грані на торцевій поверхні відрізаної частини при віддаленні (мм) від осі симетрії після розрізання

При подальшому дослідженні моделювали умови розрізання з шевронним ножем конфігурація, якого була отримана згідно [104]. Стосовно до ножиць конс-

трукції НКМЗ товщина тримача ножа з різальною пластиною становить 220 мм, при цьому довжина прямолінійної ділянки згідно розрахунку склала $l = 283$ мм.

Результати моделювання представлені на рис. 4.24. Як можна бачити з представлених залежностей сила розрізання (рис. 4.24,а) зростає більш ніж в 1,5 рази, що в реальних умовах роботи ножиць є неприпустимим.

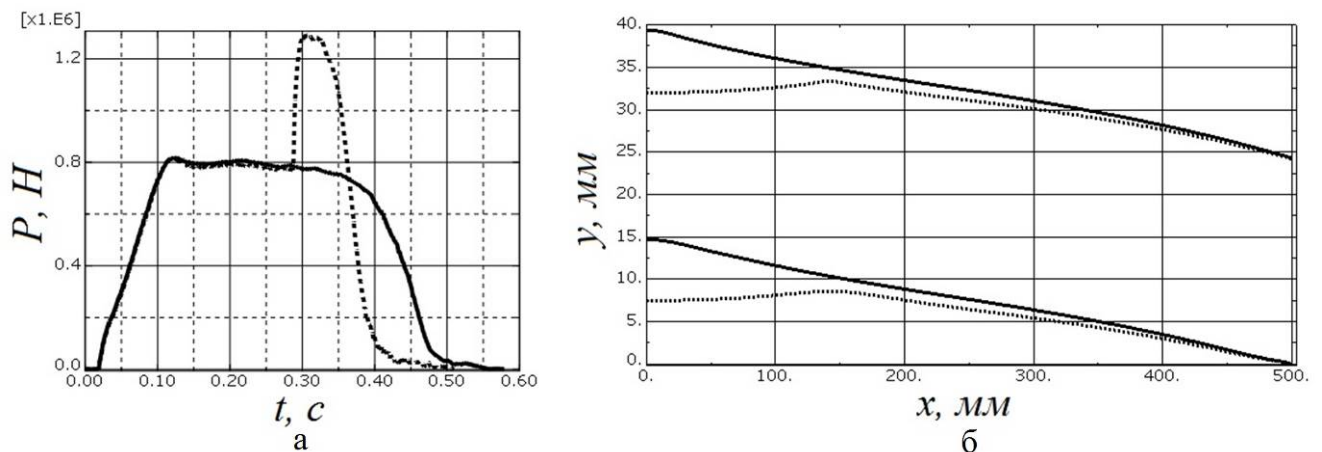


Рисунок 4.24 – Результати моделювання для шевронного ножа з прямолінійним ділянкою [104] довжиною $l = 283$ мм (пунктирна лінія) при розрізанні листа товщиною 25 мм в порівнянні з класичною конфігурацією (суцільна лінія): а – залежність половини сили розрізання P ; б – залишкові після розрізання зміщення y граней на торцевій поверхні відрізаної частини на відстані x від осі симетрії

У той же час, можна спостерігати істотне (на 41,5%) зниження відхилення від прямолінійності у вертикальній площині (рис. 4.24,б).

Вочевидь, що навіть за умови досягнення показників якості даний підхід стосовно аналізованої конструкції ножиць непридатний, оскільки таке істотне збільшення сили для ряду марок сталей може призвести до перевантаження ножиць, що є неприпустимим. Уникнути таких перевантажень можливо, тільки знизивши граничну розрізувану товщину, що також є небажаним.

Таким чином, з огляду на все вищевикладене, було вирішено розглянути варіант конструкції шевронного ножа, де замість прямолінійного ділянки, введена округлена ділянка в вершині сходження різальних кромek [375]. В результаті на

третьому етапі дослідження були змодельовані різні варіанти округлень при розрізання листів різної товщини.

Після обробки результатів моделювання були отримані залежності, представлені на рис. 4.25. Так на рис. 4.25,а показана залежність відношення величини максимальної сили P_{\max} розрізання до сталої сили P розрізання класичним шевронним ножом в залежності від відношення величини радіуса R округлення до товщини h розрізуваного листа. Як можна бачити з отриманих розподілів залежності для листів товщиною 15 і 25 мм практично збігаються.

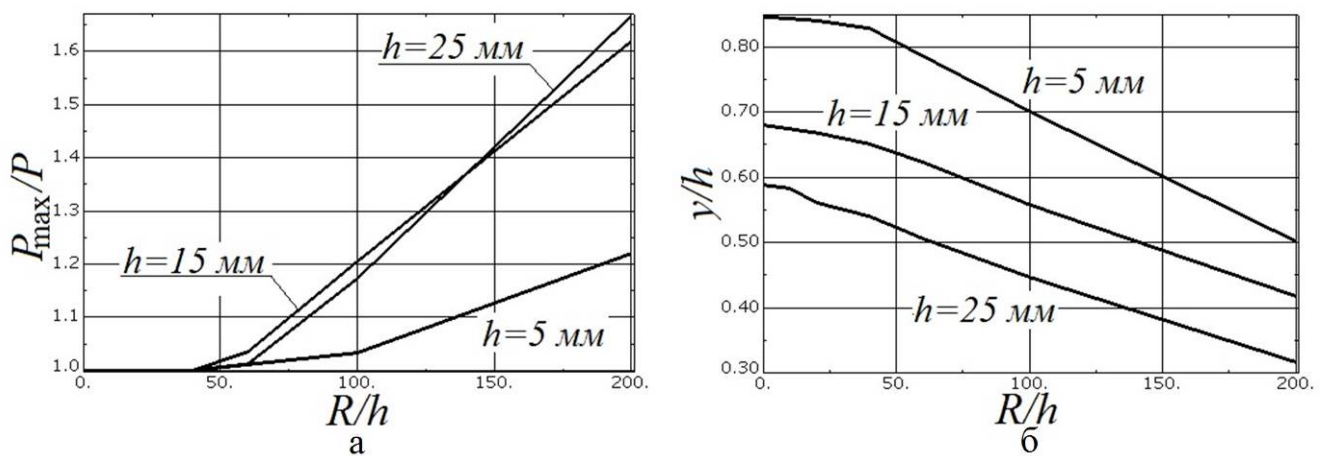


Рисунок 4.25 – Результати моделювання для шевронного ножа з округленою ділянкою при розрізанні листів різної товщини: а – залежність коефіцієнту збільшення сили розрізання P_{\max}/P від відносної величини R/h радіуса округлення ножа; б – залежність величини відносного залишкового зміщення y/h у вертикальній площині від відносної величини R/h радіуса округлення ножа

При цьому для радіуса $R \leq 75h$ максимальна сила розрізання перевищує сталу, не більше ніж на 10%, що можна вважати допустимою величиною перевантаження.

Стосовно якості розрізання на рис. 4.25,б представлені залежності відношення величини вертикального залишкового зміщення y до товщини h розрізуваного листа в залежності від відношення величини радіуса R округлення до то-

вщини h розрізуваного листа, котрі демонструють, що величина залишкового зміщення у вертикальній площині знижується на 11...18%.

Порівняння результатів моделювання процесу розрізання шевронними ножами з прямолінійною и округленою ділянками, вказує (рис. 4.26), що при товщині листа 25 мм величина сили розрізання ножом з прямолінійною ділянкою довжиною 283 мм практично збігається з силою розрізання з округленою ділянкою радіусом 5000 мм, а величина залишкового вертикального зсуву u менше 7,5%.

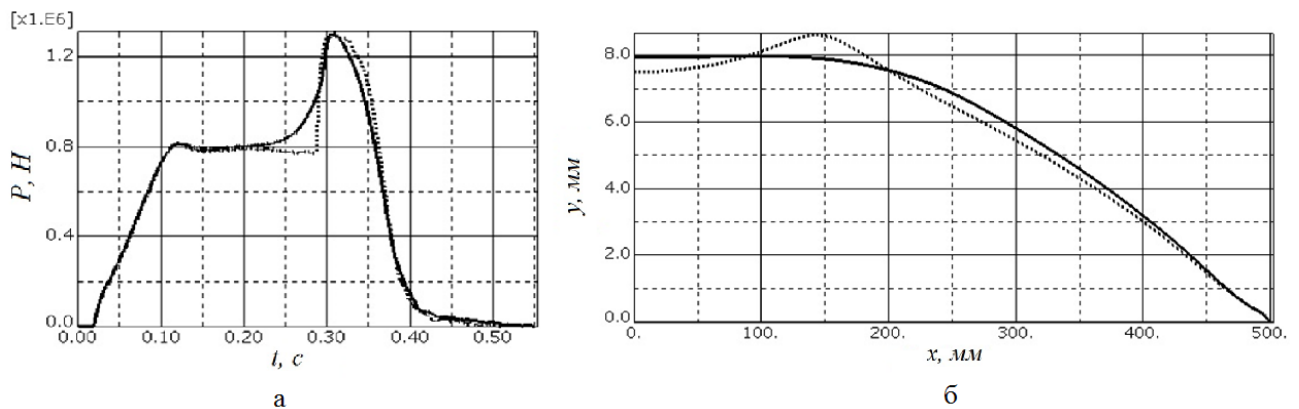


Рисунок 4.26 – Порівняльні результати моделювання для шевронного ножа з прямолінійною (пунктирна лінія) $l=283$ мм і округленою (суцільна лінія) $R=5000$ мм ділянкою при розрізанні листа товщиною 25 мм: а – половина сили розрізання; б – залишкові після розрізання зміщення u граней на торцевій поверхні відрізаної частини на відстані x від осі симетрії

Однак такий підхід не дозволяє істотно впливати на якість розрізання без збільшення навантаження на ножиці, або звуження сортаменту допустимого до розрізання.

4.2.2 Аналіз енергосилових параметрів процесу розрізання на ножицях з криволінійним ножом

Як показує практика [40,43], при використанні криволінійного ножа, за рахунок його перекочування, залежність сили розрізання при входженні ножа в метал має яскраво виражене пікове значення, що можна пояснити меншими величи-

нами кута розрізання в початковий момент реалізації процесу. Залежно від конструкції ножиць різниця між максимальним і сталим значенням сили розрізання може становити 30...60%. Даний факт сприяє збільшенню металоємності ножиць.

Відомі технічні рішення [107,108] спрямовані на зниження пікових навантажень в процесі перекочування ножа, реалізуються за рахунок зміни конфігурації ножа. Однак такий підхід має низьку технологічність у виробничих умовах з причини суттєвого ускладнення, а відповідно й здороження, при виготовленні ножів такої конфігурації.

В рамках даного дослідження [376] ставилося завдання на базі МСЕ встановити фактори, що впливають на величину сили розрізання на ножицях з перекочуванням ножа.

Для досягнення зазначеної мети була розроблена тривимірна модель, що описує процес розрізання листів криволінійним ножом на ножицях з перекочуванням ножа.

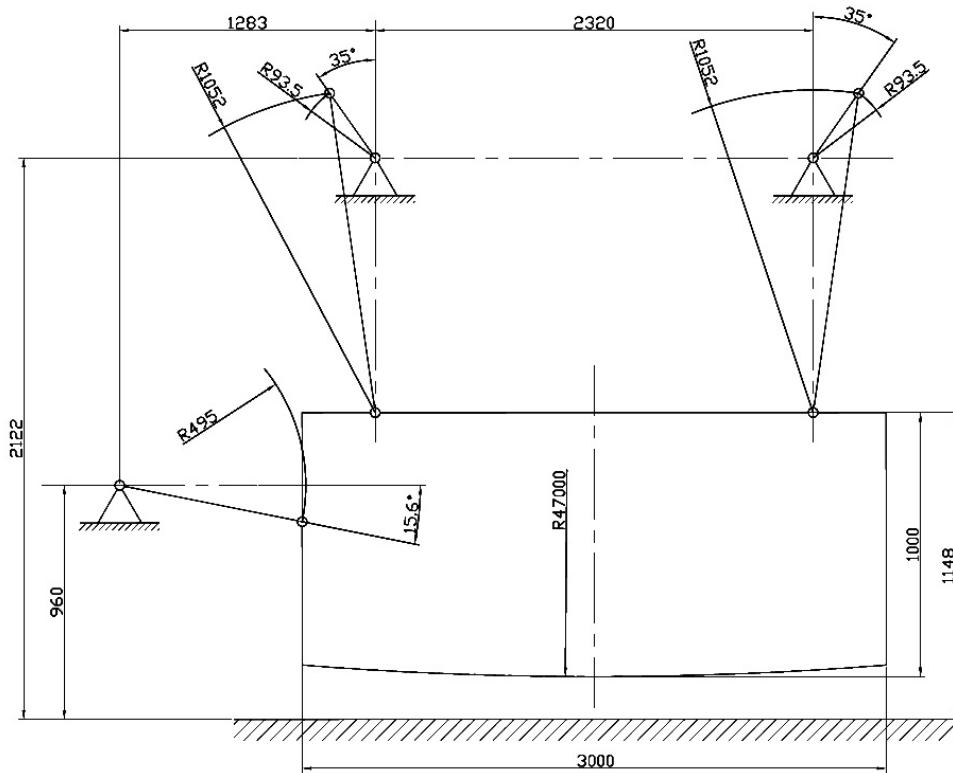
За основу була взята кінематична схема механізму різання ножиць поперечних стану 3000 конструкції НКМЗ (рис. 4.27,а). Модель (рис. 4.27,б) складається з чотирьох абсолютно жорстких недеформовних тіл – притиск, стіл, верхній (криволінійний) і нижній нерухомий ножі, а також деформовного бруса, котрий моделює розрізуваного листа.

При цьому за аналогією з реальною конструкцією ножиць рух повідомляється верхньому криволінійному (дуговому) ножу по певній траєкторії та столу в вертикальному напрямку, тоді як нижній ніж і притиск залишаються нерухомими.

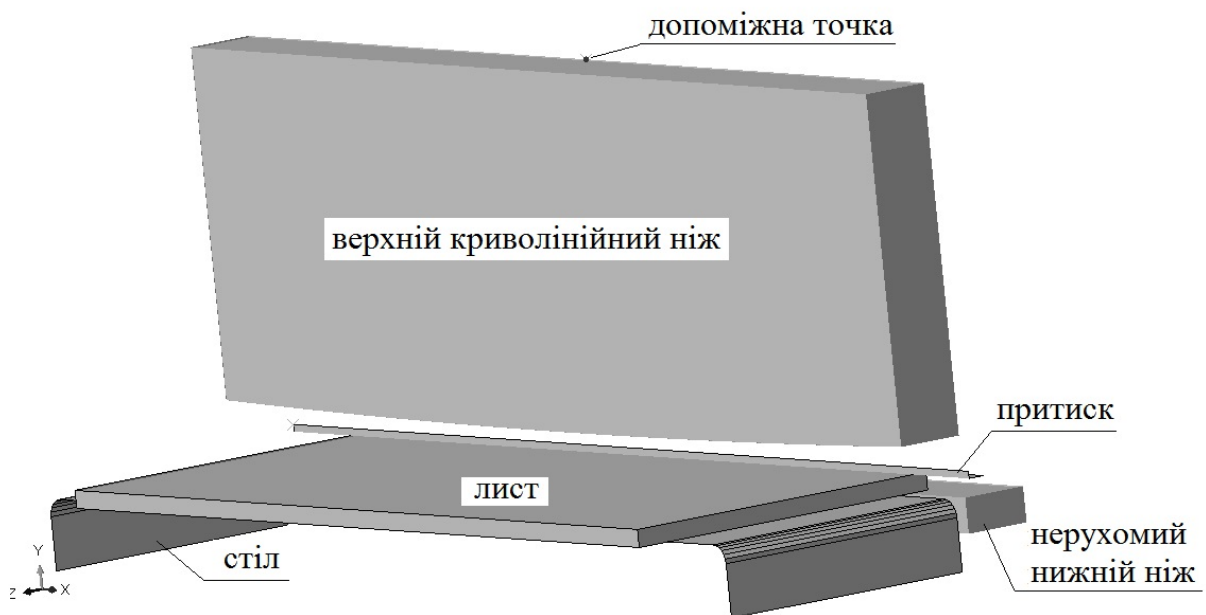
В ході моделювання в якості розрізуваного матеріалу була обрана сталь Ст2пс. Товщина листа – 50 мм, ширина – 2500 мм.

Структура сітки розрізуваного модельованого листа представлена на рисунку 4.28.

На першому етапі дослідження, за відомими методиками [40,43, 271] були проведені розрахунки кінематичних параметрів роботи двохкривошипних ножиць.



а



б

Рисунок 4.27 – Кінематична схема механізму різання ножиць поперечних стану 3000 конструкції НКМЗ (а) і загальний вигляд моделі процесу розрізання листів криволінійним ножом на ножицях з перекочуванням ножа

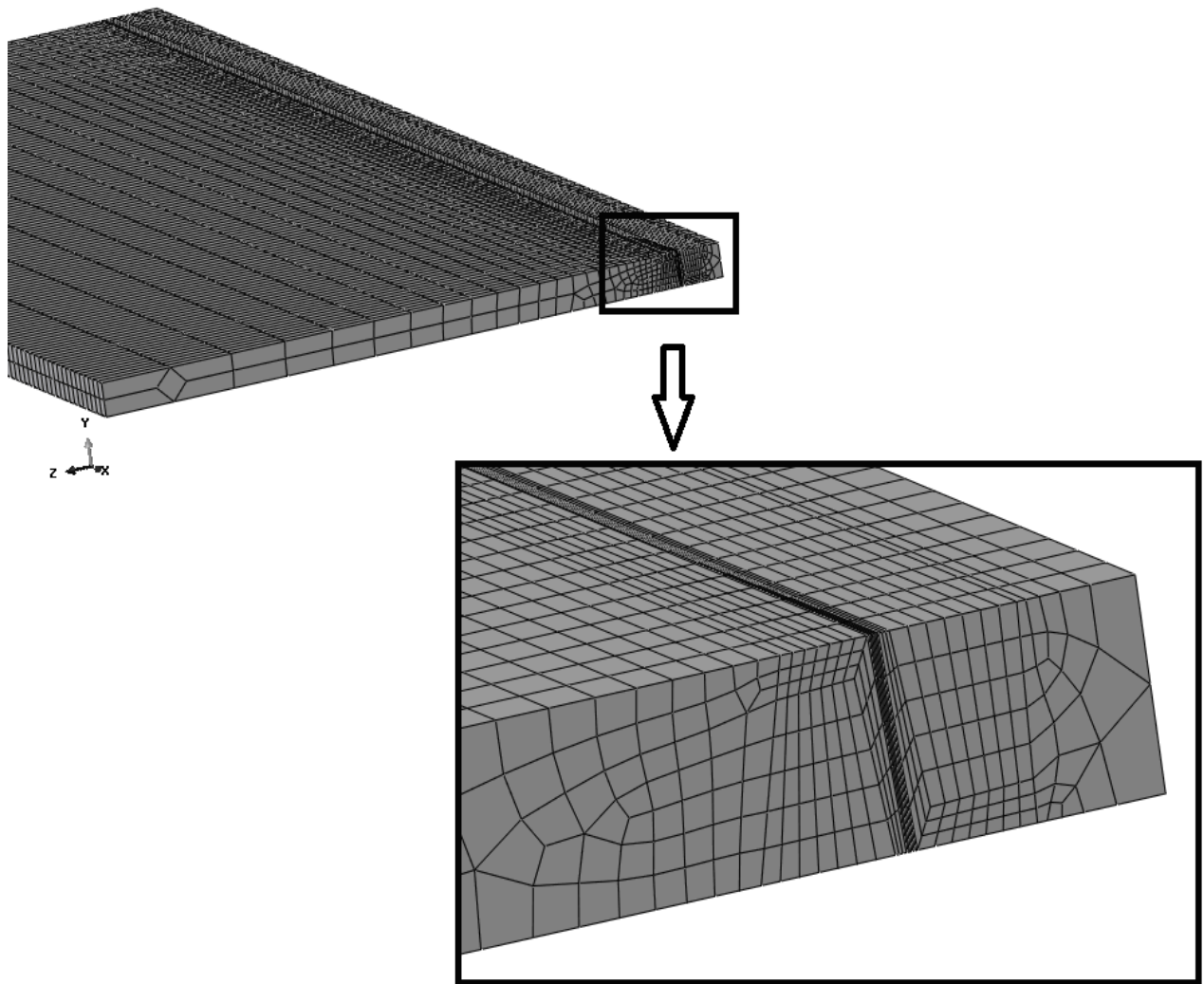


Рисунок 4.28 – Вихідна структура сітки

На рис. 4.29 показана розрахункова траєкторія для допоміжної точки (рис. 4.29,а), а також кут повороту ножа в площині руху (рис. 4.29,б), які згодом закладалися в модель для симуляції руху ножа.

У досліджуваній конструкції ножиць з перекочуванням радіус ножа становить 47 м, а зазор між ножами в початковому положенні – 148 мм.

На рис. 4.30 представлені результати моделювання. З яких можна бачити, що максимальне значення сили розрізання в $\approx 1,6$ рази більше мінімального значення по ходу процесу розрізання. Таким чином, подальші дослідження були спрямовані на виявлення можливості зниження даного розриву.

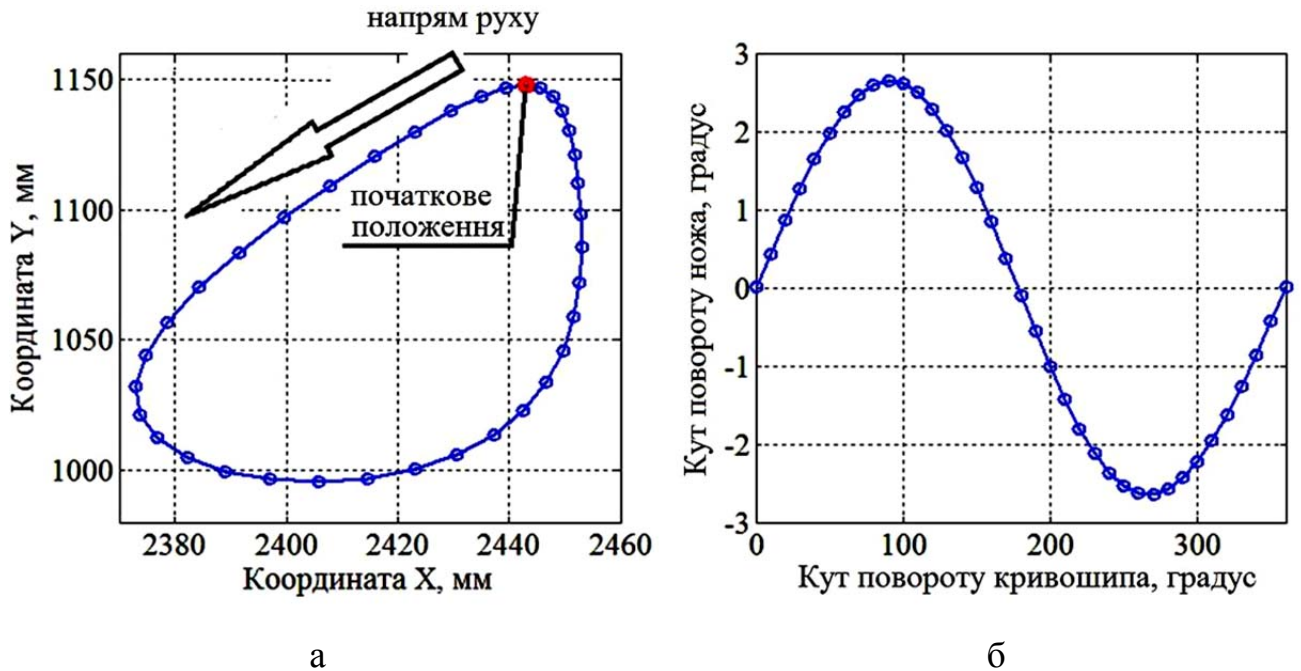


Рисунок 4.29 – Розрахункова траєкторія руху допоміжної точки (а) і кут повороту ножа в площині руху (б) з дискретним кроком повороту кривошипів 10°

Для цього змінювали радіус дуги ножа, при незмінному зазорі між ножами і кінематиці руху системи. В результаті було встановлено, що збільшення радіусу дуги ножа сприяє зменшенню сили на початку розрізання і одночасного її збільшенню в кінцевій фазі (рис. 4.31,а), що є свідченням більш стабільного утримання кута нахилу та довжини осередку розрізання по ходу процесу.

На підставі отриманих результатів була побудована залежність максимальної сили розрізання від радіуса дуги ножа (рис. 4.31,б), котра дозволяє відзначити, що:

- технологічні можливості ножиць з криволінійним (дуговим) ножем не завжди використовуються в повній мірі, за рахунок істотної (до 60%) розбіжності між максимально силою розрізання та її сталим значенням;
- збільшення радіусу дуги ножа до певної величини сприяє більш рівномірному розподілу сили в процесі розрізання, а потім спостерігається її зростання в кінцевій фазі розрізання;

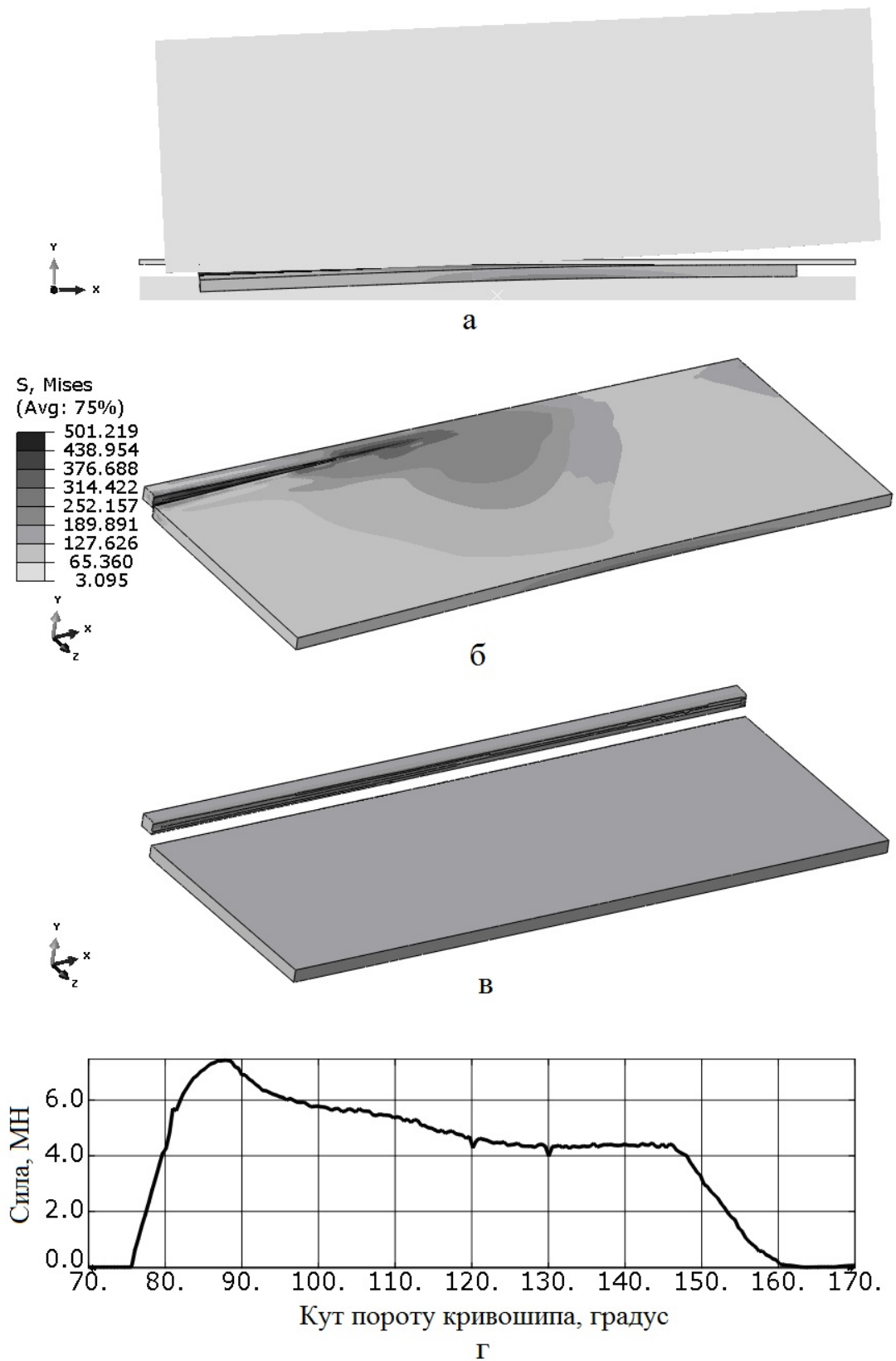
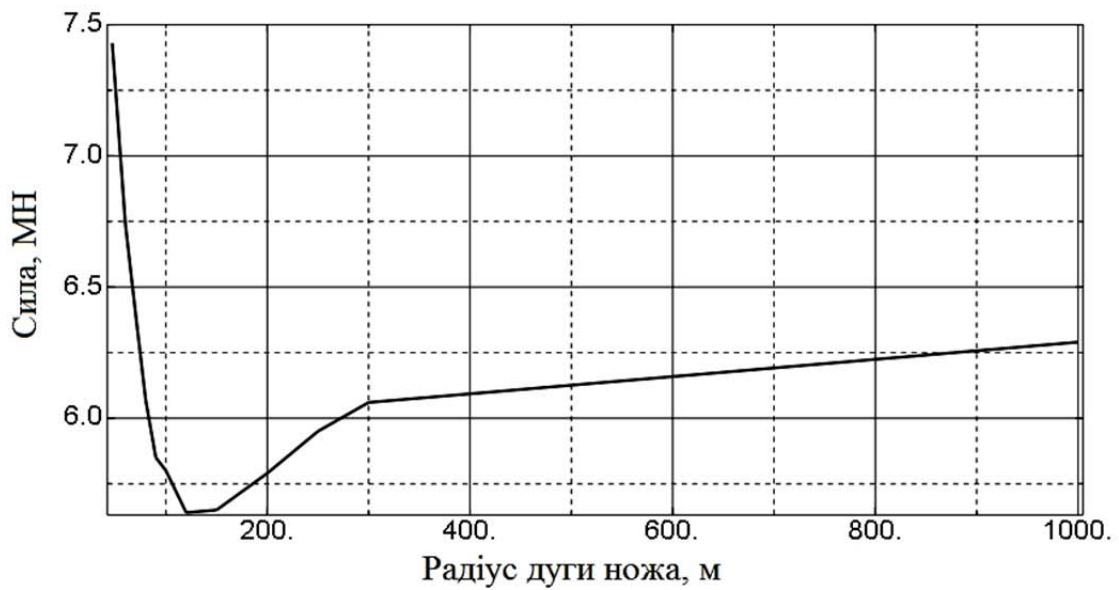


Рисунок 4.30 – Результати моделювання: а – положення ножа при повороті ексцентриків на 99° ; б – напружено-деформований стан листа в тому ж положенні; в – конфігурація після повного розділення листа; г – залежність сили розрізання від кута повороту ексцентриків



а



б

Рисунок 4.31 – Вплив радіусу дуги ножа на силу розрізання: а – характерні залежності сили розрізання при збільшенні радіуса дуги ножа; б – залежність максимальної сили розрізання від радіуса дуги ножа

– стосовно розглянутої конструкції ножиць за умови розрізання листів максимальною товщиною 50 мм радіус дуги ножа в діапазоні 80...200 м дозволяє отримати більш рівномірний розподіл сили розрізання по ходу процесу і знизити її на 25...30%, що вказує на потенційну можливість розширення сортаменту розрізуваних листів, або зменшення металоємності конструкції ножиць за інших рівних умов.

4.3 Математичне моделювання напружено-деформованого стану металу і основних показників якості при розрізанні профілів зі складною формою поперечного перерізу

4.3.1 Моделювання процесу розділення круглого профілю ножами різної форми

У технологічних схемах прокатного виробництва реалізують чорнове і чистове розрізання фасонних профілів. При цьому чорнове розрізання застосовують для розділення на мірні довжини, як правило, квадратних і круглих профілів і вимоги до якості зрізу невисокі і переважно обмежуються умовами подальшої обробки заготовок [377].

При розділенні на мірні довжини готового фасонного металопрокату використовують обладнання здатне виконати рівний і якісний зріз з мінімальними допусками, для чого застосовують ножиці з фасонними (профільованими) ножами. Основними перевагами розрізання фасонних профілів на ножицях є відсутність втрат металу при розрізанні і висока продуктивність в порівнянні з іншими способами.

Для забезпечення всіх висунутих вимог до якості зрізу, а також продуктивності ножиць важливим є розуміння процесів, що відбуваються в металі в процесі розрізання, що може сприяти вдосконаленню профілювання ножів, а також конструкції ножиць.

З метою розширення уявлення про процеси, що відбуваються в металі були розроблені тривимірні SE математичні моделі (рис. 4.32), що описують процес розділення круглого профілю паралельними, фасонними кутовими і фасонними дуговими ножами. Кожна складається з двох абсолютно жорстких недеформовних тіл – верхній і нижній ножі, а також деформовного бруса, який моделює розрізуваний профіль круглого перерізу, зі згущенням сітки в зоні розрізання.

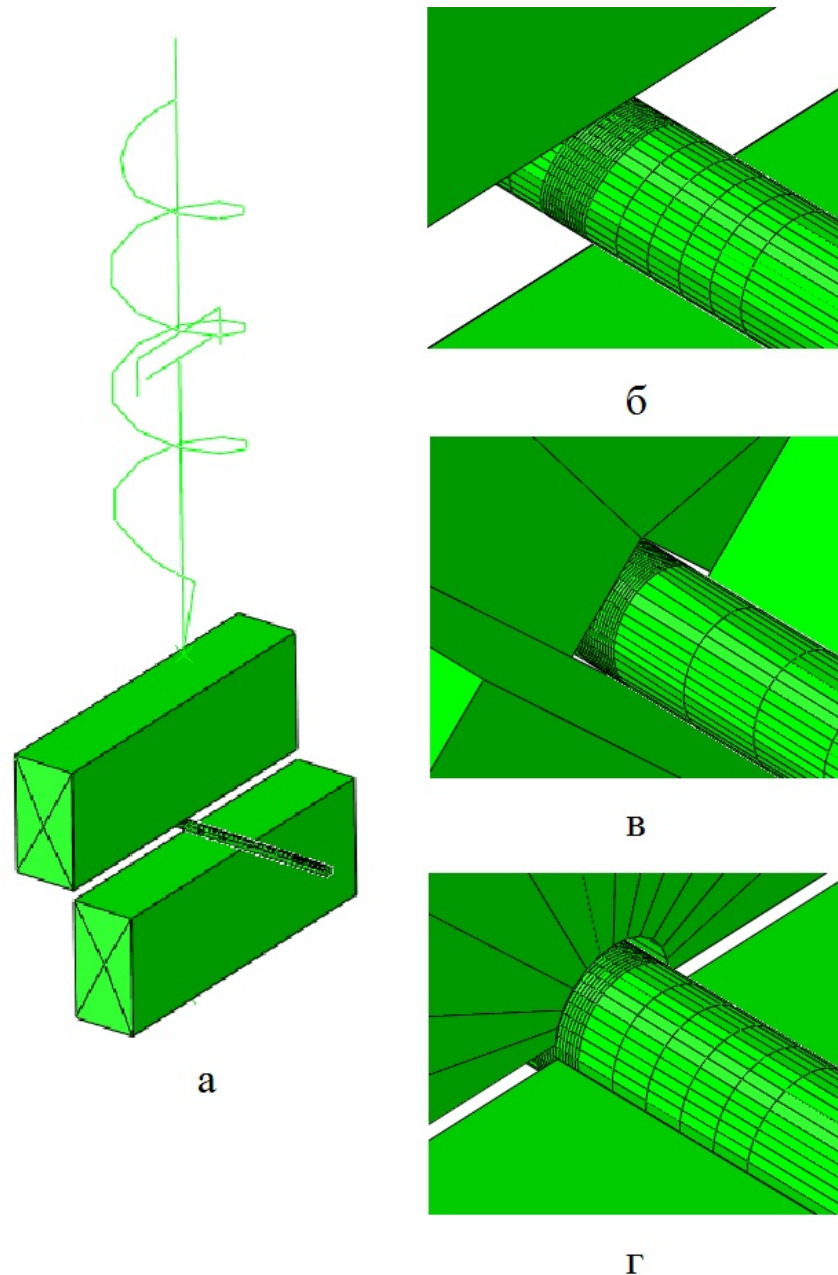


Рисунок 4.32 – Загальний вигляд моделі розділення круглого профілю паралельними ножами (а), а також структура сітки в зоні розрізання паралельними (б), фасонними кутовими (в) і фасонними дуговими (г) ножами

Також до складу моделі входять пружний елемент та в'язкий демпфер.

При цьому, за аналогією з реальною конструкцією ножиць, рухався нижній ніж, тоді як верхній ніж залишався нерухомим.

Для оцінки адекватності розроблених моделей виконувалося порівняння результатів моделювання з результатами лабораторних експериментальних досліджень (див. розділ 6), які проводилися в умовах кафедри «Машини металургійного комплексу і прикладна механіка» Донбаського державного технічного університету (м. Алчевськ) на лабораторній установці кривошипно-шатунних ножиць з паралельним розташуванням супортів, в які встановлювали ножі відповідно умовам реалізації процесу розділення. Досліджувані зразки круглого профілю $\varnothing 12$ мм, виготовлені з алюмінієвого сплаву АА6066 і мали наступні механічні властивості: $\sigma_{0,2} = 360$ МПа, $\sigma_b = 395$ МПа, $\delta = 0,18$.

Швидкість розрізання (руху нижнього ножа) в умовах моделювання повністю збігалися з умовами лабораторної реалізації процесу, і склала 30 мм/с.

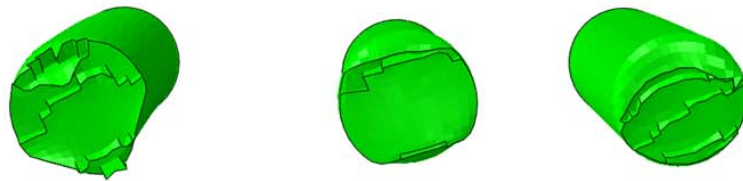
На рисунку 4.33 можна бачити загальний вигляд круглого профілю отриманого в результаті розрізання на ножицях (рис. 4.33,а) і за результатами моделювання (рис. 4.33,б), при використанні фасонного кутового, паралельного і фасонного дугового ножів, а також напружено-деформований стан для кожного з розглянутих випадків (рис. 4.33,в).

Порівняння енергосилових параметрів в розглянутих умовах реалізації процесу свідчить, що мінімальне значення сили розрізання має місце на паралельних ножах, а її збільшення для інших форм не перевищило 7%. На рисунку 4.34 представлені розрахункові (по результатам моделювання) і експериментальні залежності сили в динаміці процесу і для умов використання різних конфігурацій ножів.

Статистична обробка геометричних та енергосилових параметрів показала досить високі значення коефіцієнта кореляції між розрахунковими і експериментальними даними на рівні 0,927...0,962 при розрізанні фасонними кутовими, 0,932...0,973 паралельними і 0,856...0,966 фасонними дуговими ножами.



а



б

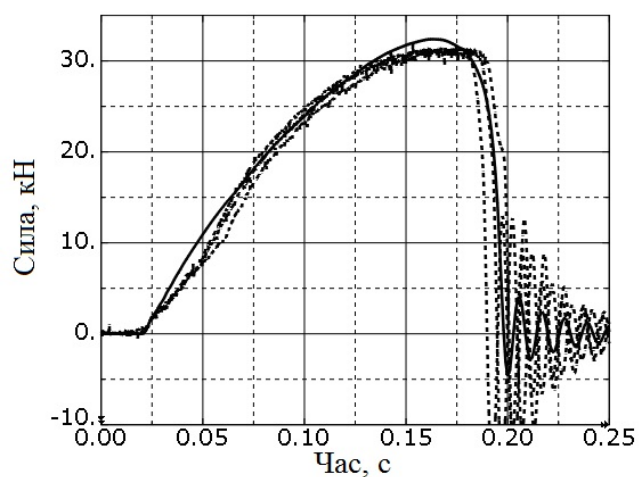


S, Mises
(Avg: 75%)

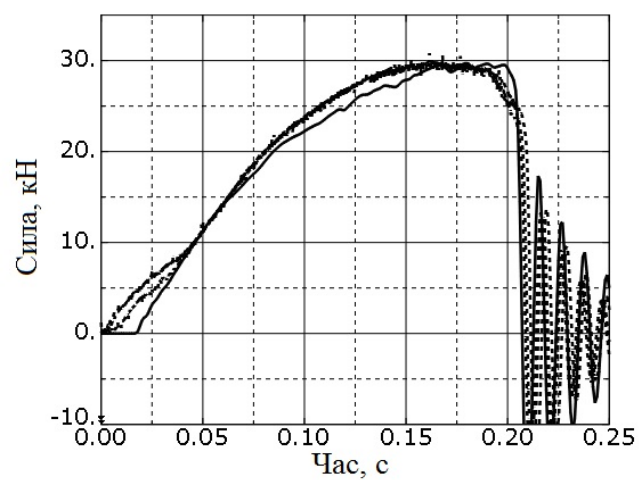
550.0
440.0
330.0
220.0
110.0
0.0

в

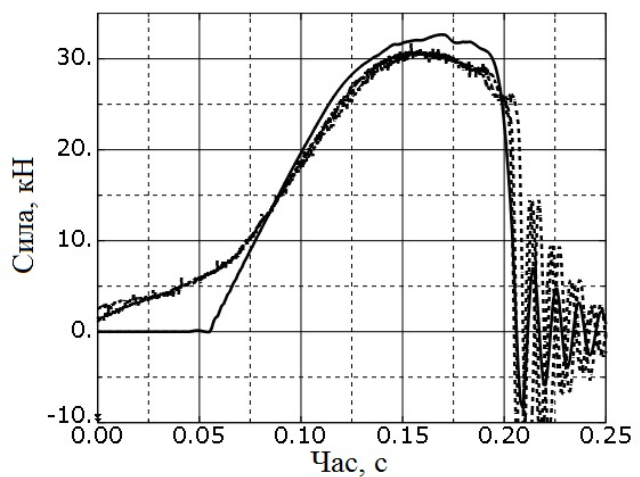
Рисунок 4.33 – Загальний вигляд круглого профілю отриманого в результаті розрізання на ножицях (а) і за результатами моделювання (б), а також напружено-деформований стан перед розділенням (в), відповідно (зліва на право) в результаті розрізання кутовими, паралельними і дуговими ножами



а



б



в

Рисунок 4.34 – Розрахункові (—) і експериментальні (---) залежності сили в часі розрізання при використанні кутових (а), паралельних (б) і дугових (в) ножів

В цілому можна констатувати адекватність розроблених математичних моделей. Крім того, інформативність даних моделей стосовно визначення впливу окремих параметрів істотно вище, ніж експериментальних даних.

В якості головних переваг розроблених математичних моделей слід виділити наступні можливості:

- простежити картину напружено-деформованого стану в динаміці процесу;
- оцінити ступінь впливу механічних властивостей розрізуваних металів, зокрема, границі міцності і границі текучості матеріалу;
- встановити вплив швидкості розрізання на енергосилові параметри процесу, оскільки розроблені моделі враховують швидкість деформації;
- розширити уявлення про процеси, що протікають в металі при розділенні на ножицях з різною конфігурацією ножів, що буде сприяти розвитку методів розрахунку сили розрізання, а також основних показників якості металопрокату після розрізання.

4.3.2 Аналіз напружено-деформованого стану металу при розділенні кутика

З огляду на отримані вище (див. п. 4.1.3 і 4.3.1) результати можна переходити до розробки математичних моделей з розділення фасонних профілів більш складного поперечного перерізу [378].

Розглянемо СЕ математичну модель процесу розділення рівнобічного кутика фасонними ножами. При цьому в якості матеріалу зразків, за аналогією з розглянутими вище моделями (див. П. 4.1.3 і 4.3.1) використовували алюмінієвий сплав АА6066 з тими ж механічними властивостями: $\sigma_{0.2} = 360$ МПа, $\sigma_b = 395$ МПа, $\delta = 0,18$.

За аналогією з попередніми моделями в даній моделі (рис. 4.35) мають місце два абсолютно жорстких недеформованих тіла – верхній і нижній ножі, а також деформовний брус, який моделює профіль рівнобічного кутика, що розділяється.

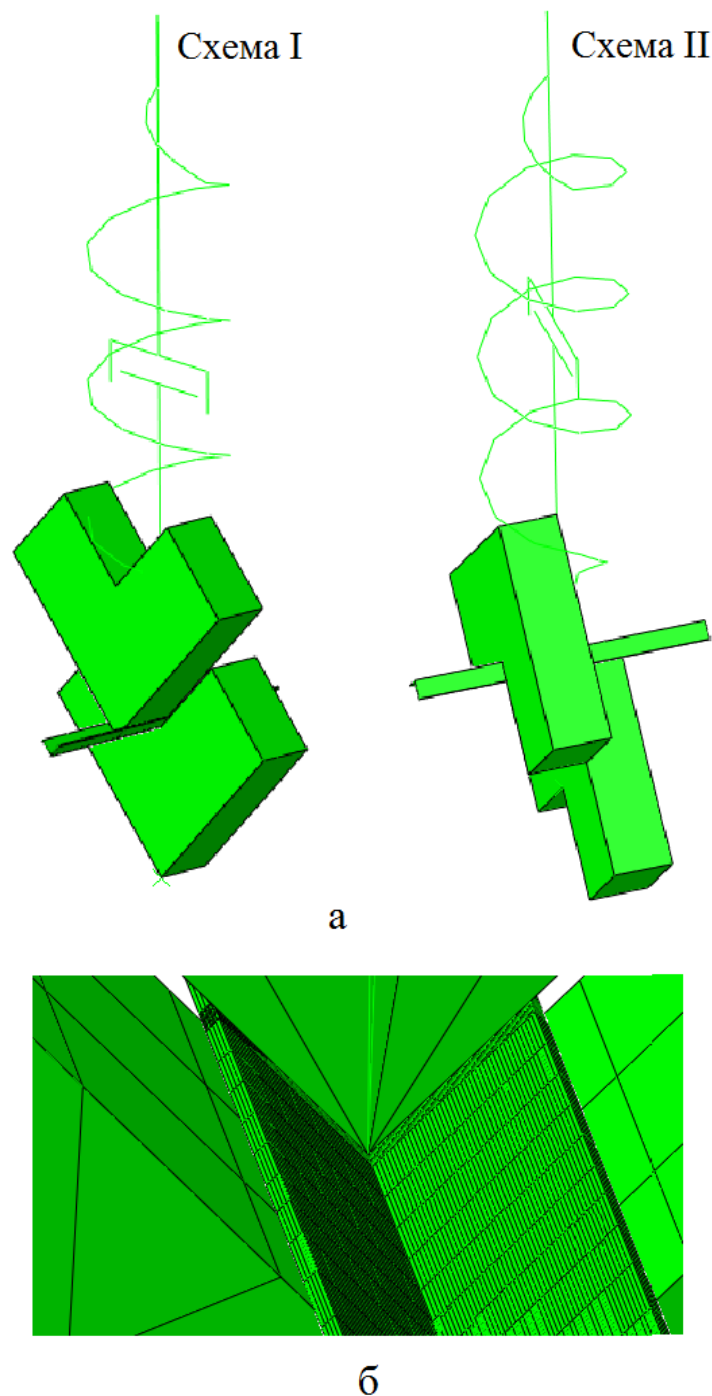


Рисунок 4.35 – Загальний вигляд моделі поділу кутика профільованими ножами (а) для двох схем реалізації процесу, а також структура сітки в зоні розрізання (б) для схеми I

До складу моделі також введені пружний елемент і в'язкий демпфер. Рухається нижній ніж зі швидкістю – 30 мм/с., а верхній ніж залишається нерухомим. Реалізація процесу поділу моделювалася за двома схемами, як показано на рисунку 4.35,а.

Геометричні розміри рівнобічного кутика наступні: ширина полиці 25 мм, товщина полиці 1,9 мм. Розрахункова площа поперечного перерізу склала 91,39 мм².

Для порівняльного аналізу схем I і II реалізації процесу розділення рівнобічного кутика на ножицях з профільованими ножами на рисунку 4.36 представлений ряд основних залежностей, що характеризують процес. Показники, представлені на даних залежностях, визначали шляхом усереднення відповідних показників по елементарних об'ємах усіх зруйнованих елементів, згідно розробленого (див. підрозділ 3.6) алгоритму обробки локальних і узагальнених параметрів НДС та руйнування.

Насамперед, слід вказати, що в першому наближенні обидві схеми реалізації процесу розділення кутика практично ідентичні, проте при більш детальному розгляді можна звернути увагу на деякі відмінності, що мають місце в різних схемах.

Те, що стосується енергосилових параметрів реалізації процесу (див. рис. 4.36,а) слід вказати, що на розділення кутика по схемі II потрібно трохи більше часу, а, отже, і енерговитрат, за умови, що максимальна сила розрізання практично ідентична по кожній зі схем. У той же час проникнення ножів в метал (див. рис. 4.36,б) при реалізації схеми II дещо менше, що цілком пояснюється трохи меншим показником напруженого стану (див. рис. 4.36,в).

Також слід відзначити, що повне розділення відбувається в той момент, коли показник напруженого стану сягає свого максимального значення (див. рис. 4.36, в). При цьому в схемі II показник напруженого стану трохи нижче, що пояснюється дещо більш стисненими умовами деформації, а отже і іншим показником трьохосного напруженого стану. Як наслідок цієї обставини усереднена пластична деформація при повному розділенні перерізу кутика по схемі II трохи вище (див. рис. 4.36,г). Крім того, дещо більш обмежені умови деформації за схемою II сприяють інтенсивнішому росту усередненої пластичної деформації (див. рис. 4.36, е) в міру проникнення ножів в метал. При цьому залежність між пластичною деформацією і напруженням (див. рис. 4.36, е) в обох випадках практично ідентична, крім незначної відмінності в завершальній стадії.

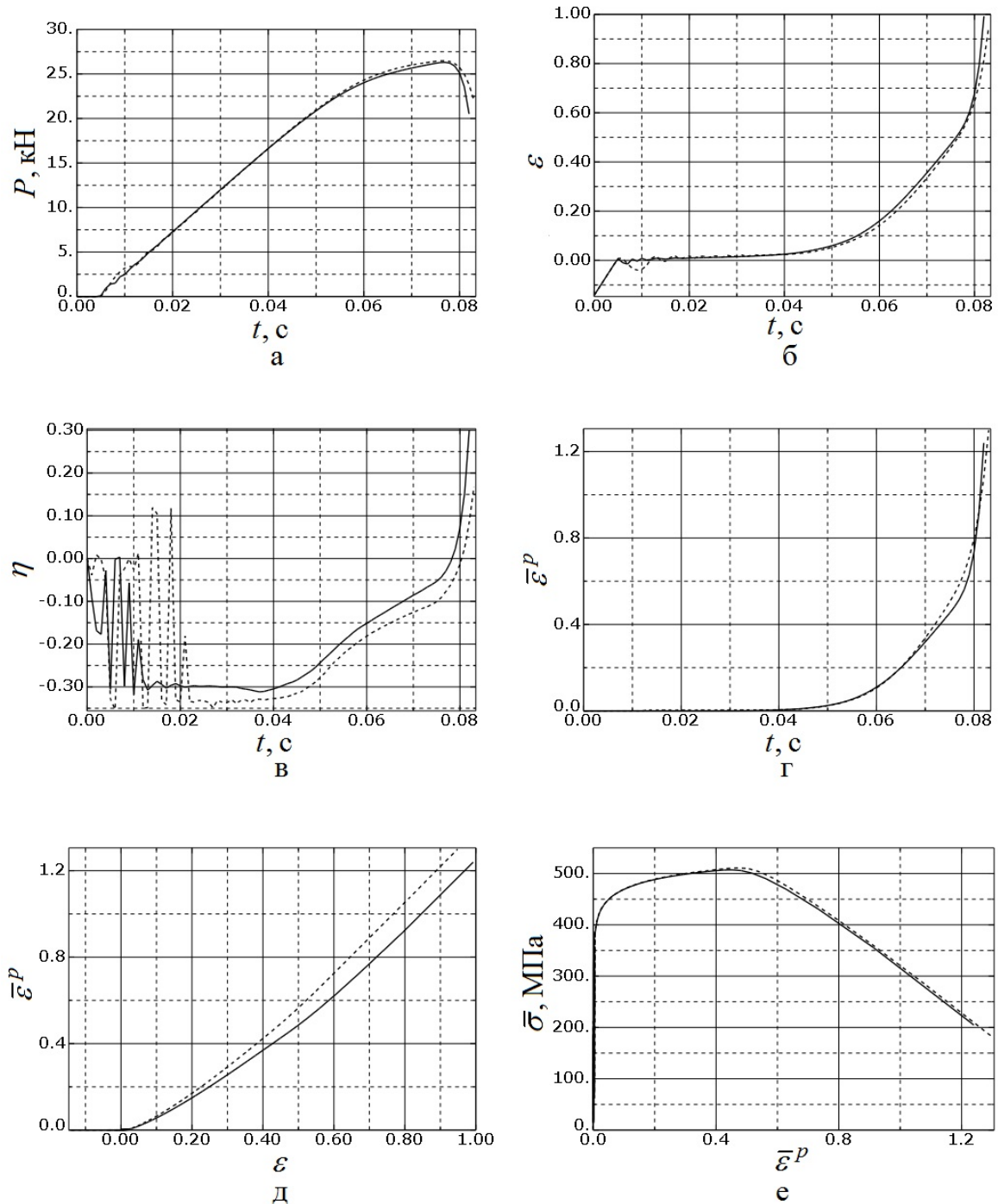


Рисунок 4.36 – Основні залежності що характеризують процес розділення кутика за схемою I (—) і за схемою II (---): сила розривання P (а), проникнення ножів в метал ε (б), усереднений показник напруженого стану η (в) і усереднена пластична деформація $\bar{\varepsilon}^P$ (г) з плином часу t , а також усереднена пластична деформація $\bar{\varepsilon}^P$ в функції проникнення ножів в метал ε (д) і усереднене напруження $\bar{\sigma}$ зі зміною усередненої пластичної деформації $\bar{\varepsilon}^P$ (е)

Вочевидь, що більш детальний розгляд процесу з розумінням явищ, що відбуваються всередині розрізуваного матеріалу, має сприяти розширенню уявлення про досліджувані процеси і підвищенню ступеня наукової обґрунтованості при розробці та прийнятті відповідних технологічних і конструкторських рішень.

4.3.3 Процес розділення швелера на ножицях і аналіз напружено-деформованого стану металу при розрізанні фасонними ножами

Відмінною особливістю процесу розділення швелера від всіх розглянутих вище є той факт, що поперечний переріз має в центральній частині (полиці) меншої висоти, ніж біля країв (стінок). Таким чином, руйнування полиці відбудеться раніше, ніж стінок, оскільки, потрібне менше зміщення ножа.

Крім того, як вже зазначалося вище, при розрахунку максимального значення сили розрізання недостатньо знати площу поперечного перерізу. Отже, моделювання даного процесу дозволить розширити уявлення про процеси, що відбуваються в металі, і уточнити методику розрахунку сили розрізання.

За аналогією з розглянутими вище математичними моделями для симуляції процесу розділення швелера на ножицях [378], використовували SE моделі, а в якості матеріалу зразків алюмінієвий сплав AA6066 з тими ж механічними властивостями. Загальний вигляд моделі процесу розрізання швелера представлений на рис. 4.37, а.

До складу моделі також введені пружний елемент і в'язкий демпфер. Нижній ніж рухається зі швидкістю 30 мм/с, а верхній ніж залишається нерухомим.

Сітка деформовного бруса рівномірно структурована в поперечному перерізі профілю і нерівномірна в поздовжньому напрямку з метою її згущення в осередку розрізання (рис. 4.37,б). Крім того, конфігурація сітки з метою врахування різних висот полиці і стінок, а також можливих її спотворень з цієї причини, мала різний нахил на відповідних ділянках (рис. 4.37,в).

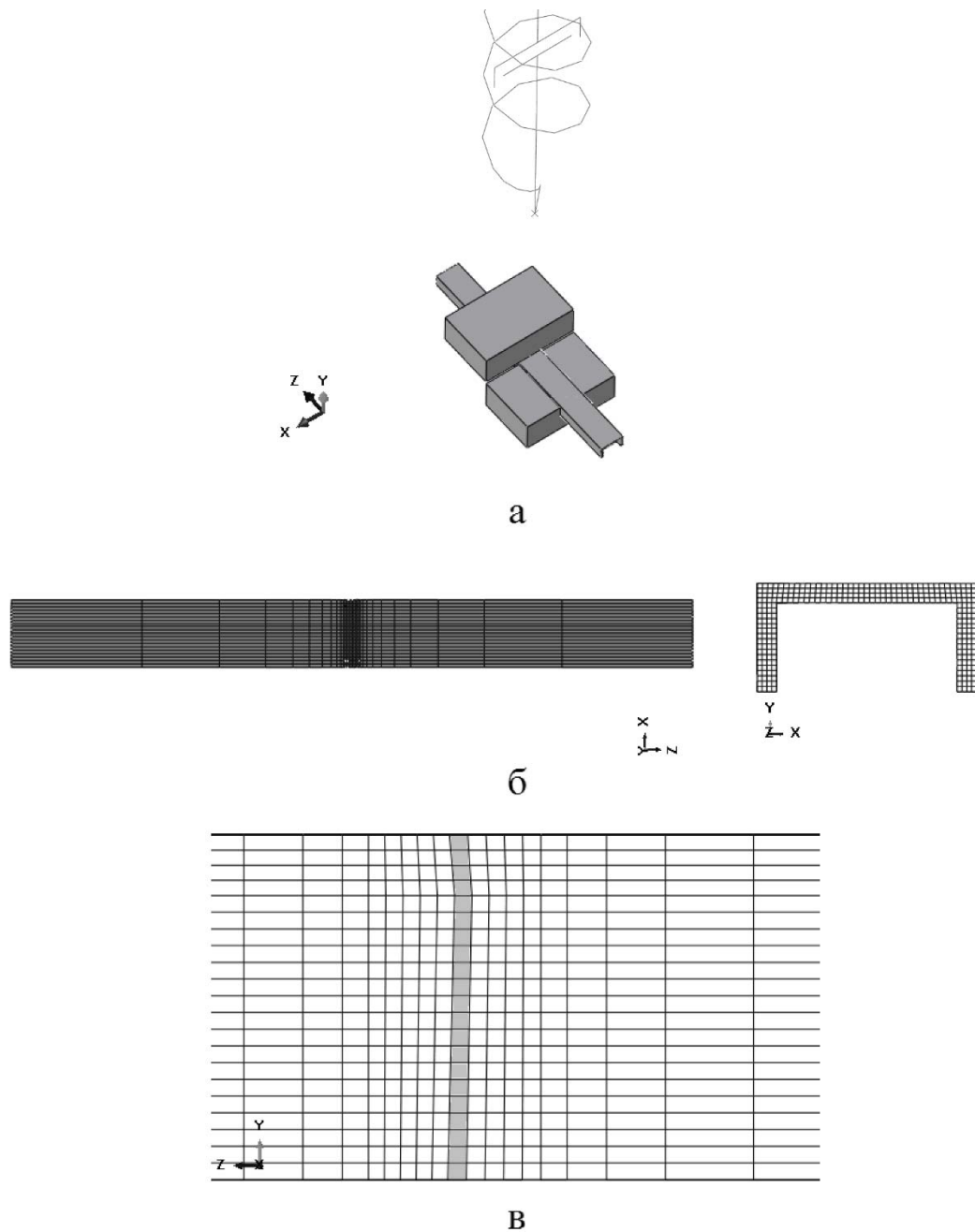


Рисунок 4.37 – Загальний вигляд моделі процесу розрізання швелера (а), структура сітки (б) і особливості конфігурації сітки в осередку розрізання (в)

Геометричні розміри швелера наступні: ширина 20 мм, висота 10 мм, товщина полиці і стінки 1,75 мм. Розрахункова площа поперечного перерізу склала $63,875 \text{ мм}^2$.

За результатами симуляції процесу на рис. 4.38,а представлено НДС швелера перед розділенням полиці, на рис. 4.38,б після розділення полиці і на рис. 4.38,в перед розділенням стінок.

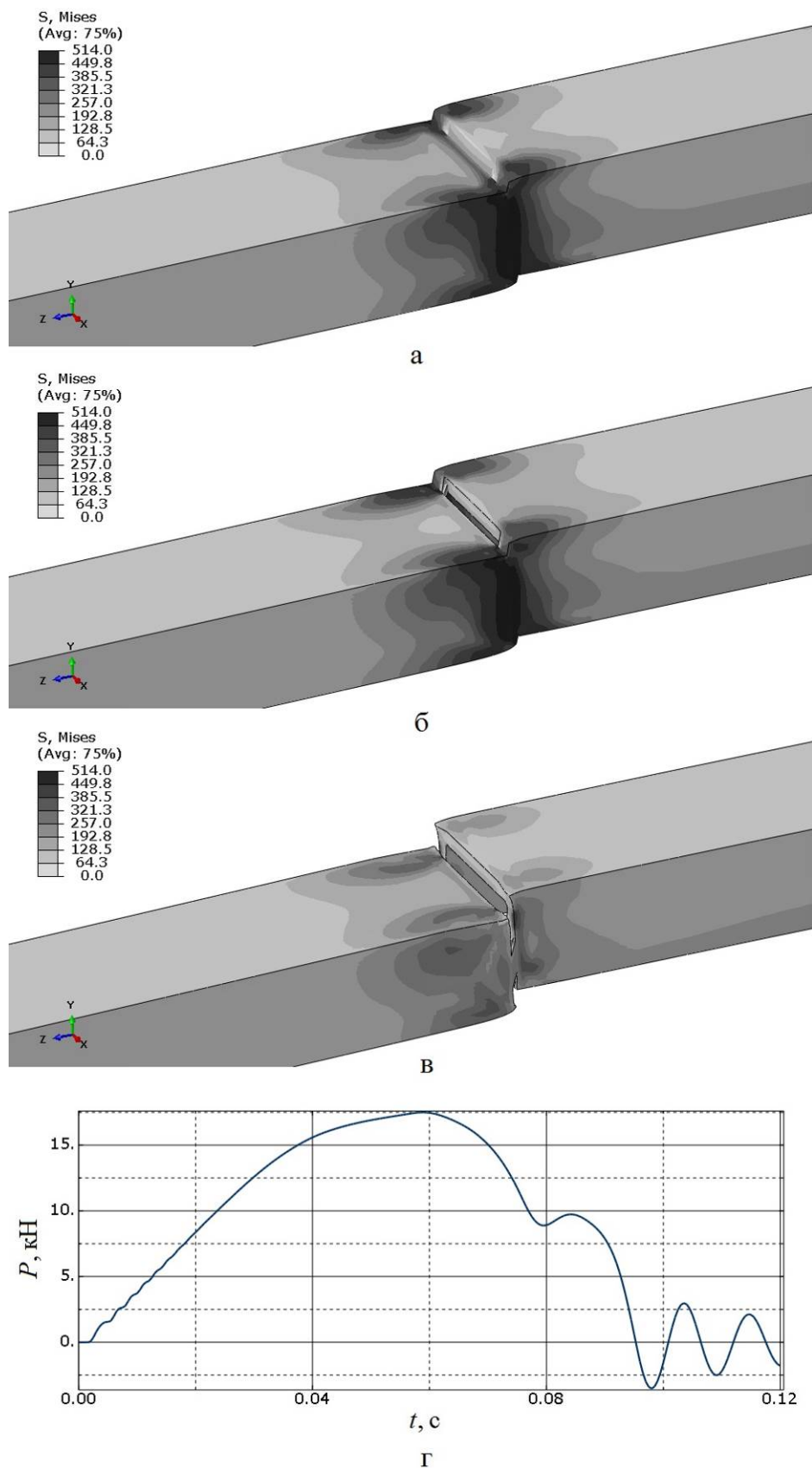


Рисунок 4.38 – НДС швелера перед розділенням полиці (а), після розділення полиці (б) і перед розділенням стінок (в), а також зміна сили розрізання P в часі t реалізації процесу (г)

Як можна бачити з представлених результатів дійсно спочатку розділяється полиця, однак тільки та її частина, яка не перебуває у безпосередній близькості до стінок, після чого в процесі розділення деякий час триває розрізання стінок спільно з частинами (прилеглими до стінки) полиці практично до повного розділення стінок.

Про це свідчить і залежність сили розрізання (рис. 4.38,г), де можна бачити, що після досягнення її максимального значення має місце другий локальний максимум, який і відповідає максимуму при розділенні двох стінок.

Крім того, відносно проникнення ножів в полицю трохи вище, ніж при розділенні стінок, що цілком укладається в відомі уявлення [266], коли величина відносного проникнення, крім іншого, залежить і від висоти розрізуваного перерізу.

У першому наближенні в даному випадку процес розділення швелера можна розглядати, як процеси, що відбуваються паралельно та накладаються один на інший, а саме розділення горизонтальної пластини перерізом $16,5 \times 1,75$ мм і двох вертикальних пластин перерізом $1,75 \times 10$ мм.

Однак при більш детальному розгляді можна відзначити деякі відмінності від процесу розрізання паралельними ножами окремих пластин.

Зокрема, використовуючи результати моделювання і знаючи інтегральні показники для відповідних зруйнованих елементів в розрізуваному перерізі, можна уявити переріз швелера в вигляді дискретних вертикальних ділянок відповідно до розбиття на елементи, використовуючи топологію, як показано на рис. 4.39.

З огляду на симетричність розподілу параметрів при реалізації процесу досить розглянути половину перерізу розрізуваного профілю, при цьому (див. рис. 4.39,а) перші чотири ділянки належать стінці, а решта представляють собою полицю. Вісь симетрії проходить через ділянку 21.

Отримавши дані для кожного елемента, щодо відповідної дискретної ділянки визначали усереднені залежності, як це було виконано вище (див. п. 4.1.1).

Так на рис. 4.39,б представлені залежності накопичення пластичної деформації для відповідних дискретних ділянок в залежності від часу протікання процесу, а на рис. 4.39,в для цих же ділянок співвідношення напруження-деформація.

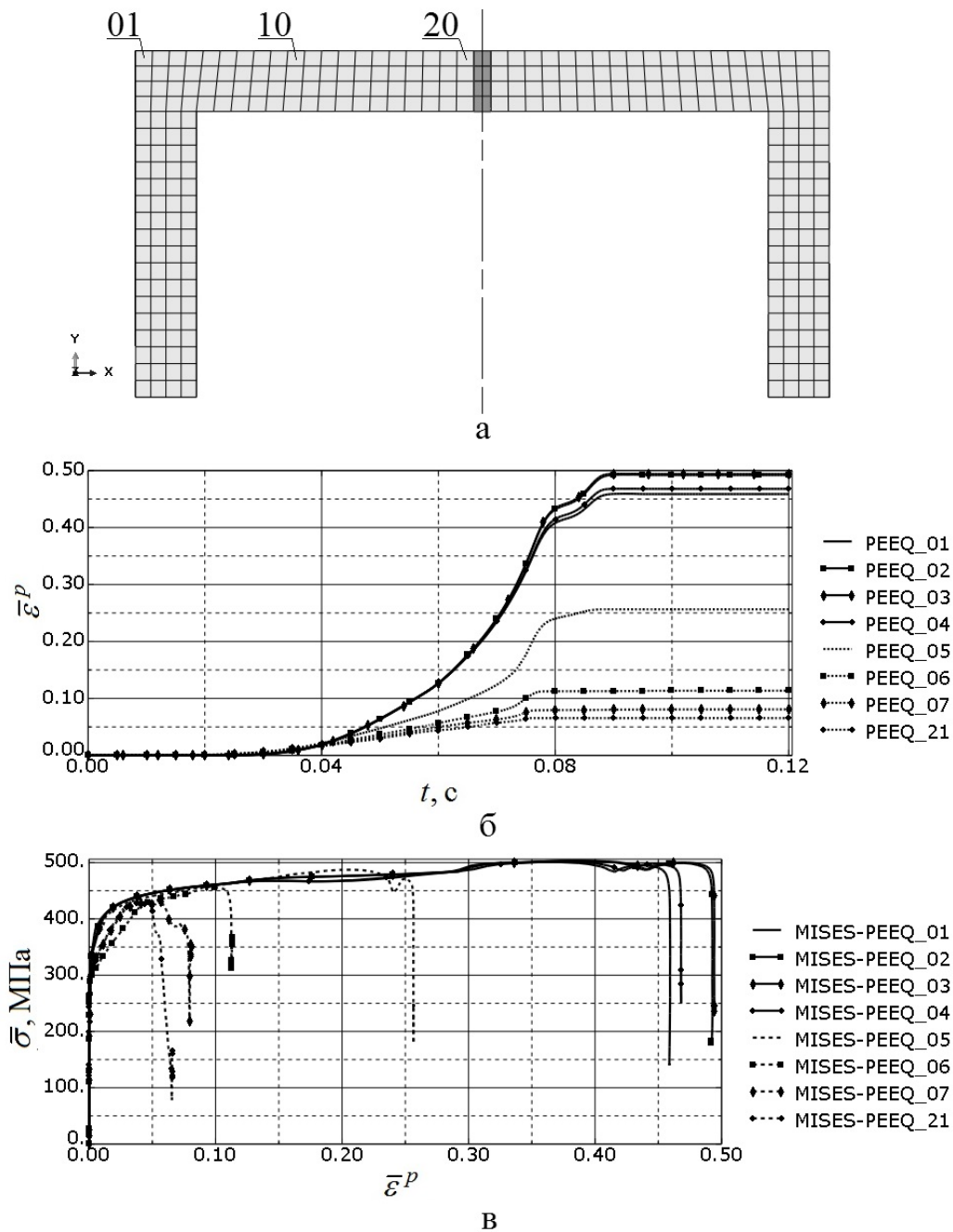


Рисунок 4.39 – Структура сітки на поперечному перерізі швелера і топологія розбиття перерізу на дискретні ділянки (а), а також відповідні їм залежності розвитку в часі t пластичної деформації $\bar{\varepsilon}^P$ (б) і розрахункові співвідношення між напруженням $\bar{\sigma}$ та пластичною деформацією $\bar{\varepsilon}^P$ (в)

З отриманих результатів випливає, що в стінках накопичення пластичної деформації відбувається практично однаково по всій ширині перерізу і відрізняється максимальною величиною тільки в завершальній стадії процесу, при цьому

більші значення припадають на внутрішні ділянки (2 і 3), а різниця не перевищує 7% (див. рис. 4.39,б). Аналогічну картину можна спостерігати і для співвідношень напруження-деформація (див. рис. 4.39,в).

Щодо полиці швелера картина дещо відрізняється від умов розрізання паралельними ножами, що загалом можна пояснити двома причинами. Перше, полиця нерозривно пов'язана зі стінками і, друге, ширина нижнього ножа менша від ширини полиці на величину зазору між бічними поверхнями ножа і швелера.

В результаті, мінімальне значення накопиченої пластичної деформації має місце на ділянці 21, котра розташована на осі симетрії швелера з подальшим поступовим збільшенням до країв полиці. При цьому абсолютне значення максимальної пластичної деформації на ділянці 7 перевищує величину на ділянці 21 не більше ніж на 21% (див. рис. 4.39,б).

На двох крайніх ділянках 6 і 5 можна спостерігати суттєве зростання пластичної деформації, відповідно, в 1,71 і 3, 91 рази з помітним збільшенням відносного проникнення ножів при якому відбувається повне розділення кожної з ділянок. Аналогічну картину можна спостерігати і для співвідношень напруження-деформація (див. рис. 4.39,в).

4.3.4 Аналіз впливу форми поперечного перерізу профілів на силові параметри процесу розділення

В підрозділі 1.3 зазначалося, що при розрахунку максимального значення сили розрізання фасонних профілів, що відрізняються від квадрата, слід брати силу розрізання еквівалентного за площею квадрата. З метою перевірки цього припущення здійснювали математичне моделювання процесу розділення фасонних профілів [379], що мають однакову площу поперечного перерізу (табл. 4.3).

Моделювання здійснювали на базі розроблених вище математичних моделей, а в якості матеріалу розрізуваних зразків використовували алюмінієвий сплав АА6066.

Таблиця 4.3 – Номінальні значення розмірів фасонних профілів еквівалентних по площі квадрату 10×10 мм при розділенні фасонними ножами

Профіль	Номінальний розмір, мм				
	висота	діаметр	ширина	товщина	
				стілки	полиці
Квадрат	10	–	–	–	–
Круг	–	11,3	–	–	–
Швелер	12,5	–	25	2,2	2,2
Кутик рівнобокий	26,1	–	–	2	–

Максимальні значення сили розрізання для відповідного профіля наведені в таблиці 4.4.

Таблиця 4.4 – Умови та результати моделювання процесу розрізання сортових профілів на ножицях

Профіль	Конфігурація ножів	Максимальна сила розрізання, кН	Відхилення, %
Квадрат	паралельні	28,5	–
	фасонні	30,5	+7,0
Круг	паралельні	25,6	–10,2
	фасонні	27,2	–4,6
Швелер	фасонні	23,1	–18,9
Кутик рівнобокий	фасонні	26,5	–7,0

Як можна бачити з представлених даних в переважній більшості випадків сила розрізання менша за силу розрізання квадрату паралельними ножами, проте розрізання квадрату по діагоналі фасонними ножами дає збільшення сили на 7%.

Отже можна стверджувати, що за максимальне значення сили розрізання при розділенні фасонних профілів на ножицях брати силу розрізання паралельними ножами еквівалентного за площею квадрата є некоректним і тому необхідно

розробити уточнені методики з визначення сили розрізання для кожного окремого профіля, що сприятиме більш коректному визначенню сортаменту, котрий припустимо різати на ножицях певної конструкції.

ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 4

1. За результатами моделювання встановлено, що максимальне значення опору гарячому розрізанню залежить від процентного складу, в граничних межах, хімічних елементів певної марки сталі і при зменшенні температури в діапазоні 1100...650°C може змінюватися на 5...30% відповідно, що є важливим для уточнення робочих навантажень при проектуванні або вдосконаленні обладнання.

2. Моделювання процесів холодного розрізання паралельними ножами дозволило встановити, що якісний та кількісний вплив сукупної взаємодії відносного подовження після розриву, границь міцності і текучості матеріалу, висоти розрізуваного перерізу і швидкості руху ножа на величину відносного проникнення ножів в метал до сколювання полягає в нелінійному характері досліджуваних факторів та змінному ступені їх впливу.

3. Застосування ножів трикутної форми при розділенні квадратної заготовки по діагоналі в порівнянні з паралельними ножами, незалежно від температури розрізуваного металу, дозволяє зменшити до 12,5% абсолютне значення зміщення ножа до повного розділення при зростанні сили розрізання не більше 7%, проте застосування фасонних ножів суттєво підвищує якісні показники зрізу.

4. За результатами моделювання методом скінченних елементів процесу поперечного розрізання встановлено, що застосування шевронного ножа з заокругленням профілю в вершині сходження похилих поверхонь дозволяє знизити залишкову деформацію на 11...18%., при одночасному зростанні максимальної сили розрізання не більше 10%.

5. Виявлено шляхом моделювання методом скінченних елементів, що на двохкривошипних ножицях з дуговим ножем раціональний вибір радіусу дуги ножа полягає в необхідності утримання більш стабільного кута нахилу та довжи-

ни осередку розрізання по ходу процесу, оскільки це дозволяє знизити максимальне значення сили розрізання на 25...30%.

6. Математичне моделювання процесів розділення фасонних профілів показало, що максимальне значення сили розрізання на ножицях залежить від геометрії розрізуваного профілю і відрізняється від сили розрізання паралельними ножами еквівалентного за площею квадрата на $-18,9...+7,0\%$, що дозволяє уточнити навантаження на обладнання та розрізуваний сортамент.

РОЗДІЛ 5

РОЗВИТОК МЕТОДІВ МАТЕМАТИЧНОГО МОДЕЛЮВАННЯ І ОСНОВНИХ ПОКАЗНИКІВ ЯКОСТІ ПРИ РЕАЛІЗАЦІЇ ПРОЦЕСІВ ПОЗДОВЖНЬОГО РОЗДІЛЕННЯ ЛИСТОВОГО МЕТАЛОПРОКАТУ

5.1 Математичне моделювання напружено-деформованого стану металу і основних показників якості при поздовжньому розрізанні товстих листів в гарячому стані

В сучасних умовах, при виробництві гарячекатаного товстого листа для обрізання бічних кромek розкатів досить широко використовують дискові ножиці. В умовах стану 2800, ще в 60-х роках минулого століття на Комунарському металургійному заводі технологічні можливості даного обладнання були розширені за рахунок реалізації процесу в гарячому стані [276], що дозволило на існуючій конструкції ножиць різати листи товщиною 36...40 мм при температурі 700°C.

У 2006 році стан був реконструйований до стану 3000. В рамках подальшої модернізації, з огляду на моральну і фізичну зношеність ножиць та необхідність розширення сортаменту листів до 50 мм, перед ПрАТ «НКМЗ» постало технічне завдання на розробку нової конструкції дискових ножиць гарячого розрізання.

Існуючі методи розрахунку процесу розрізання дисковими ножами [40-43, 276] не дозволяють врахувати всіх конструктивних і технологічних особливостей процесу гарячого розрізання. Тому, з огляду на розвиток підходів теоретичних досліджень і зростання можливостей сучасної обчислювальної техніки, доцільним є застосування математичного моделювання даного процесу на базі методу скінченних елементів з використанням розроблених в розділі 3 підходів, що дозволить

розширити уявлення про протікання процесу і отримати вихідні дані для проектування.

Для досягнення зазначеної мети була розроблена 3D модель, що описує процес розрізання листових розкатів дисковими ножами в гарячому стані [380].

Модель (рис. 5.1) являє собою одну другу симетричну частину розглянутого процесу і складається з одинадцяти абсолютно жорстких недеформовних тіл, два з яких описують диски ножів, чотири подавального і ще п'ять приймального рольгангів, а також деформовного бруса, що моделює розрізуваний лист.

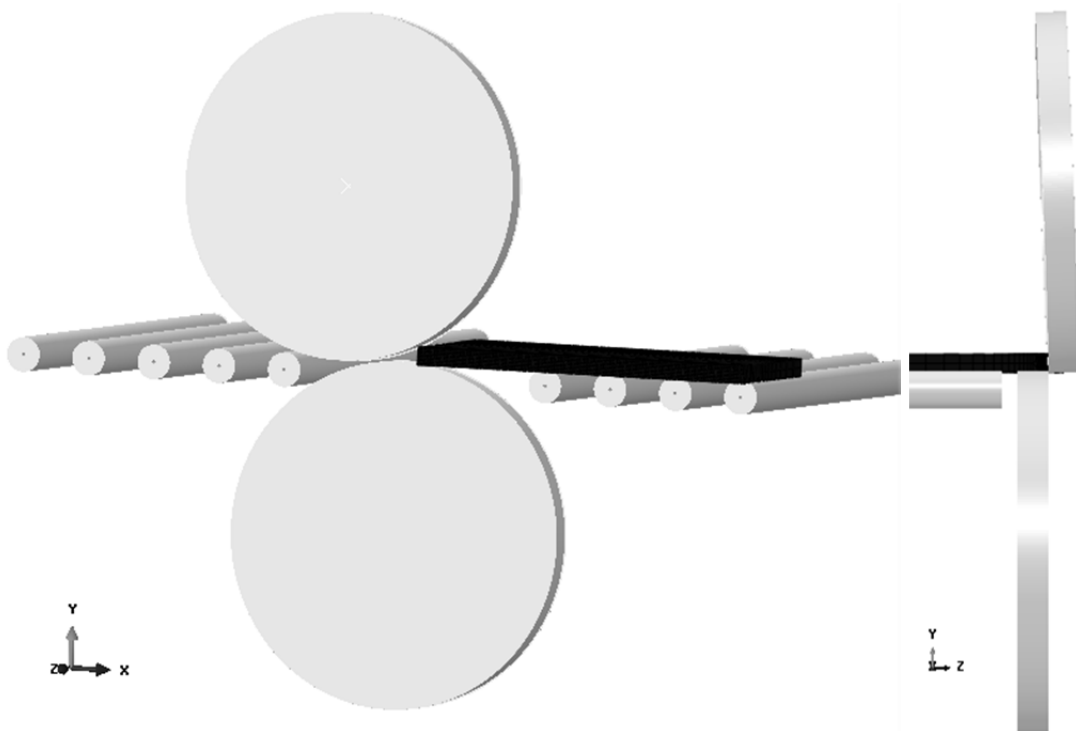


Рисунок 5.1 – Загальний вигляд моделі процесу гарячого розрізання товстолистових розкатів дисковими ножами

Структура сітки нерівномірна, зі згущенням в області розрізання (рис. 5.2).

При моделюванні товщина розрізуваного листа склала 50 мм, ширина листа – 1200 мм, ширина відрізуваної кромки – 50 мм, діаметри дисків ножів – 1000 мм, товщина ножів – 100 мм, діаметр роликів – 100 мм.

З огляду на товщину металу розрізуваного листа, з метою поліпшення умов захоплення подавальний рольганг зміщений вниз щодо верхньої точки нижнього ножа на 3,5 мм, а приймальний рольганг встановлений врівень з нижнім ножем.

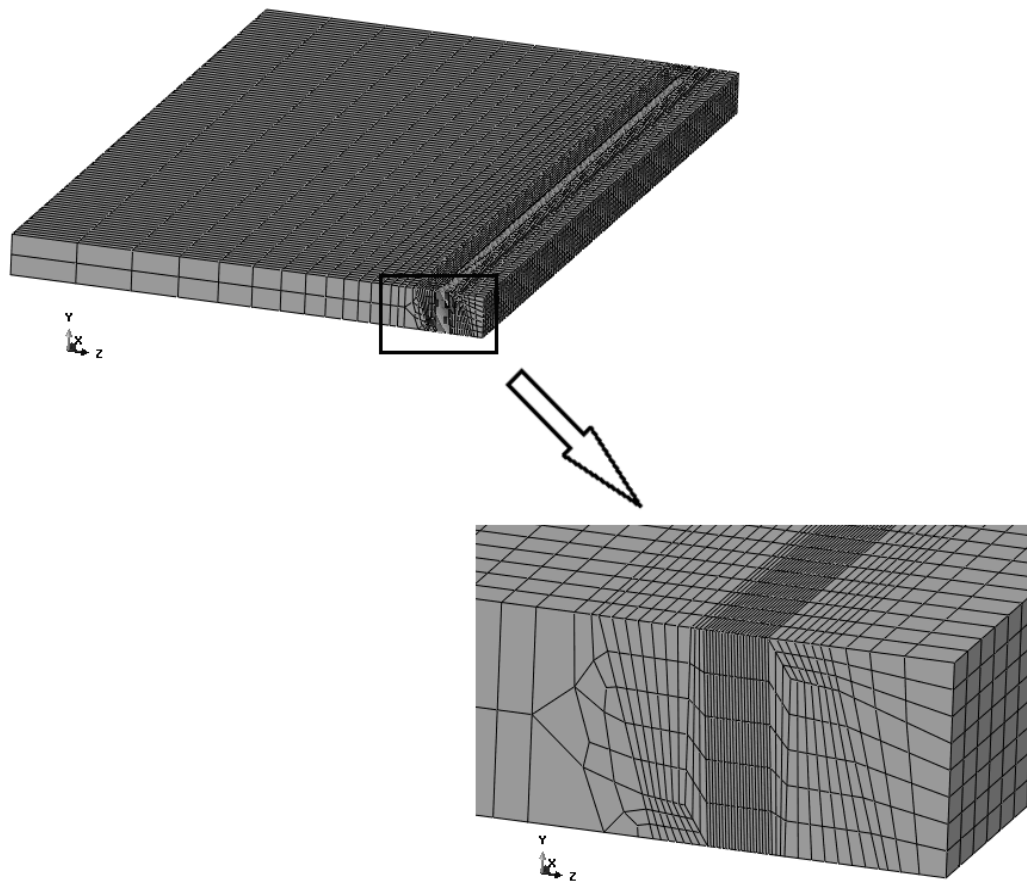


Рисунок 5.2 – Вихідна структура сітки

Спираючись на світовий досвід проектування і експлуатації ножиць, в даній моделі вісь центрів дисків ножів нахилена на 9° у напрямку руху листа в процесі розрізання.

Крім того, верхній диск повернутий відносно вертикалі на $30'$ так, щоб під час руху листа відстань між дисками збільшувалася. І, нарешті, відносно горизонтальної осі уздовж руху листа верхній диск нахилений на $2,5^\circ$ (див. рис. 5.1), що сприяє зниженню сили і зменшенню величини прикромкового стоншування (утягування).

Окружна швидкість роликів рольгангів і дисків ножів становила $0,4$ м/с. Лісту, в початковий момент часу, також була задана швидкість руху $0,4$ м/с.

В ході моделювання досліджували процес розрізання на прикладі двох марок сталі 20 і 65Г при температурі металу 700°C . На рис. 5.3 представлені результати моделювання процесу розрізання сталі 65Г.

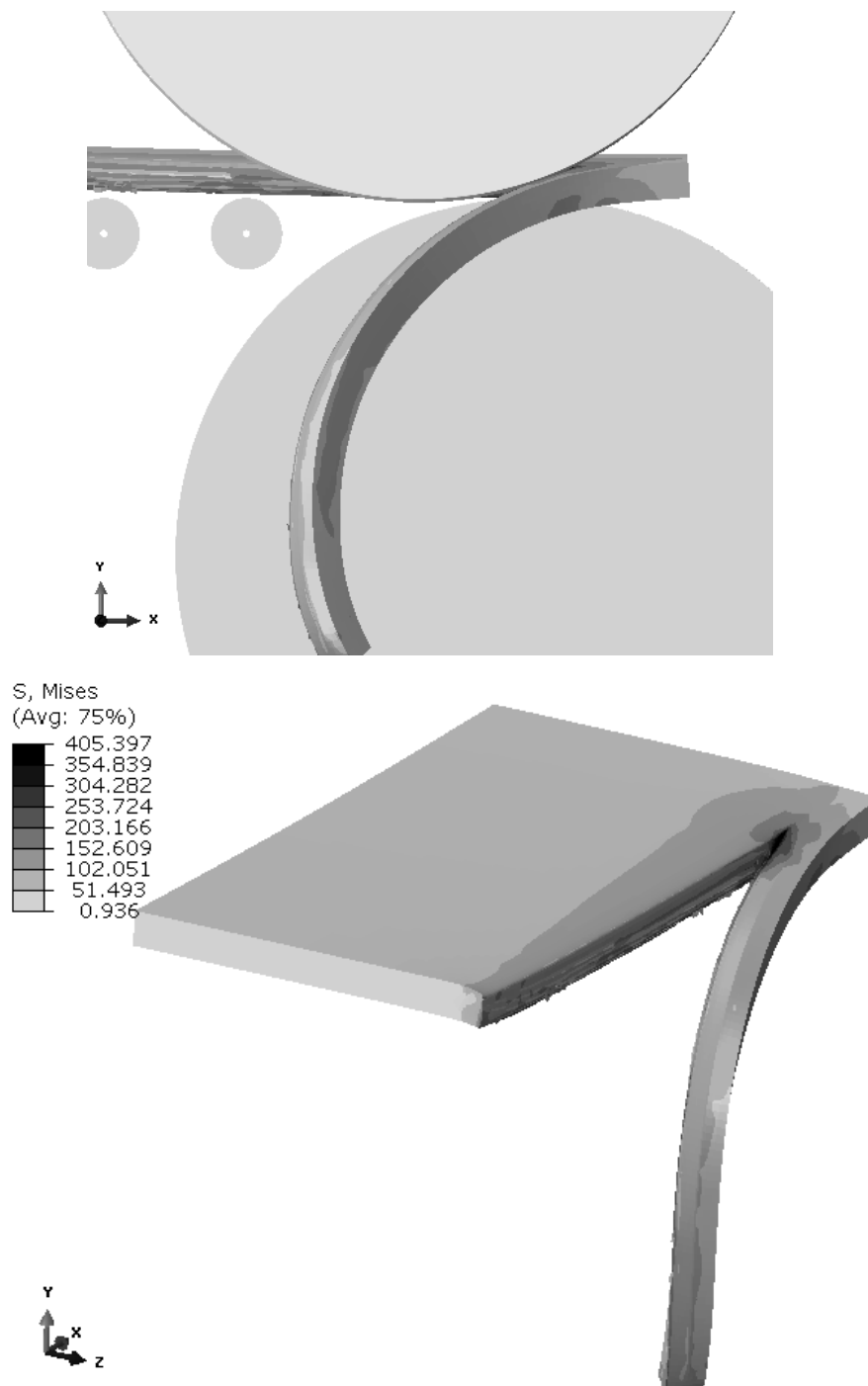


Рисунок 5.3 – Напружено-деформований стан листа за результатами моделювання на прикладі сталі 65Г

З огляду на результати проведених раніше досліджень [276] для визначення граничних навантажень процес моделювання був розділений на два етапи:

– протягом 1 секунди модельованого процесу лист переміщався в умовах вільного руху до настання сталого стану процесу;

– потім (після закінчення 1 с) на торцеву поверхню листа діяли навантаженням, протилежним по напрямку і лінійно зростаючим у часі, до повного виштовхування листа з ножів, що в реальних умови може відповідати "бурінню" листа або кромки в процесі розрізання.

В результаті моделювання були отримані залежності кінематичних і силових параметрів.

Зокрема на рис. 5.4 представлені залежності сили зовнішнього опору і швидкості листа в ножах за результатами моделювання для сталі 20 і 65Г. Як можна бачити, сила зовнішнього опору (рис. 5.4, а) в момент захоплення листа ножами має яскраво виражений негативний сплеск, що пояснюється стиканням рухомого розкату з ножами і падінням швидкості його руху (рис. 5.4, б). Надалі зовнішній вплив на систему припиняється, і швидкість стабілізується на величині дещо меншій ($\approx 5...7\%$), ніж окружна швидкість ножів. Після того, як починається зростання сили зовнішнього опору, маємо зниження швидкості до повної зупинки.

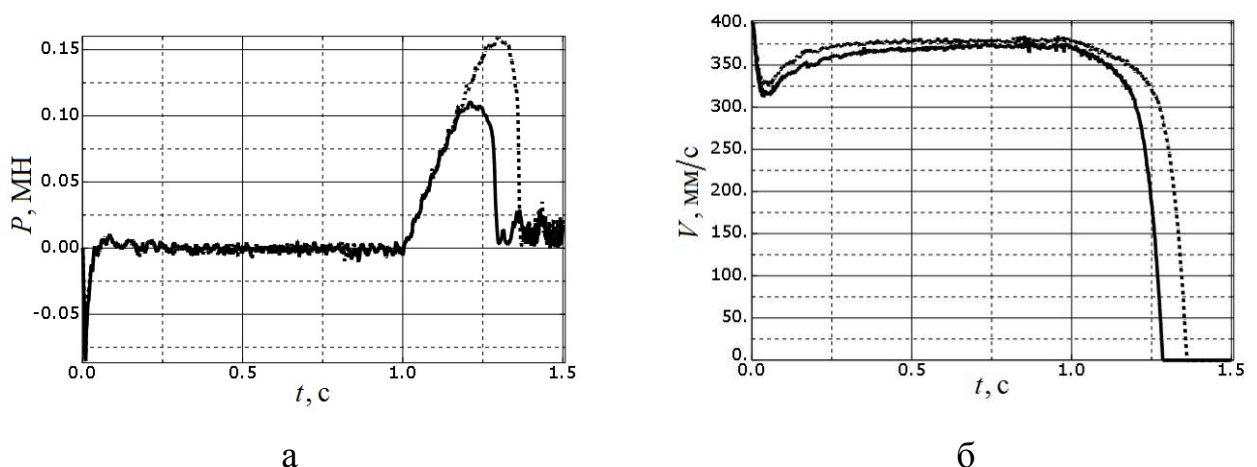


Рисунок 5.4 – Залежність сили зовнішнього опору (а) і швидкості листа в ножах (б) за результатами моделювання для сталі 20 (---) і 65Г (—)

При цьому слід зазначити, що при розрізанні листа зі сталі 20 для його зупинки необхідна сила в $\approx 1,5$ рази вище, ніж для сталі 65Г, що можна пояснити більш високим коефіцієнтом тертя.

Залежності, представлені на рис. 5.5 і 5.6, показують, що зростання сили зовнішнього опору, практично не впливає на радіальну силу, але призводить до зро-

стання крутних моментів на ножах, при цьому більш інтенсивне збільшення моменту на верхньому ножі. Також слід зазначити, що за умови вільного руху листа в ножах, має місце перерозподіл моменту розрізання в бік нижнього ножа, а верхній залишається недовантаженим. Однак при збільшенні сили зовнішнього опору співвідношення між моментами поступово вирівнюється і в критичній ситуації момент верхнього ножа всього на 5...10% менше моменту на нижньому ножі, що добре узгоджується з експериментальними даними.

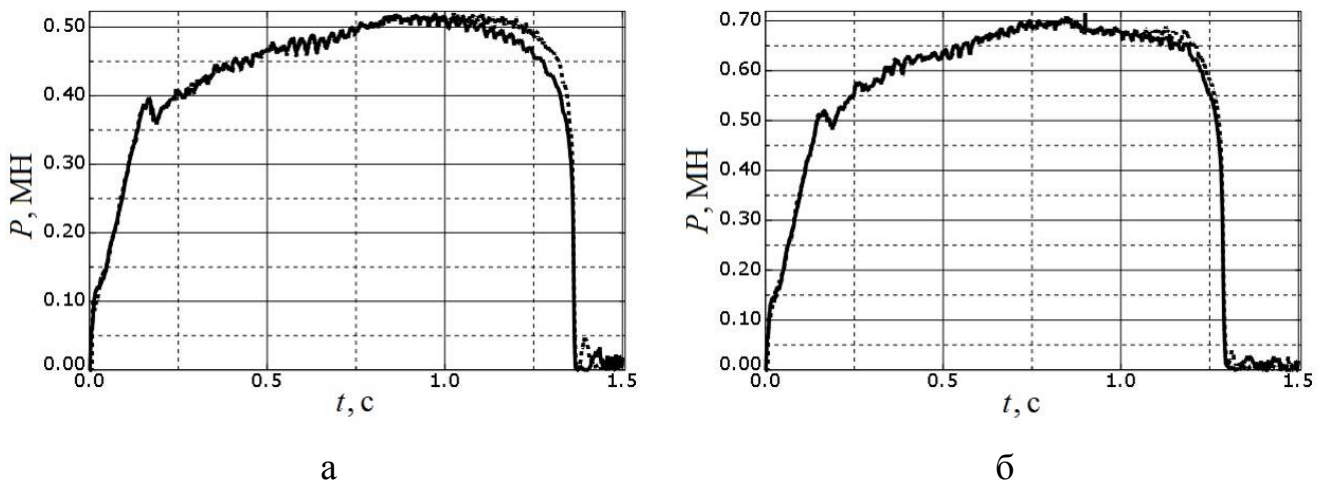


Рисунок 5.5 – Залежність радіальної сили на верхньому (—) і нижньому (---) ножі для сталі 20 (а) і 65Г (б)

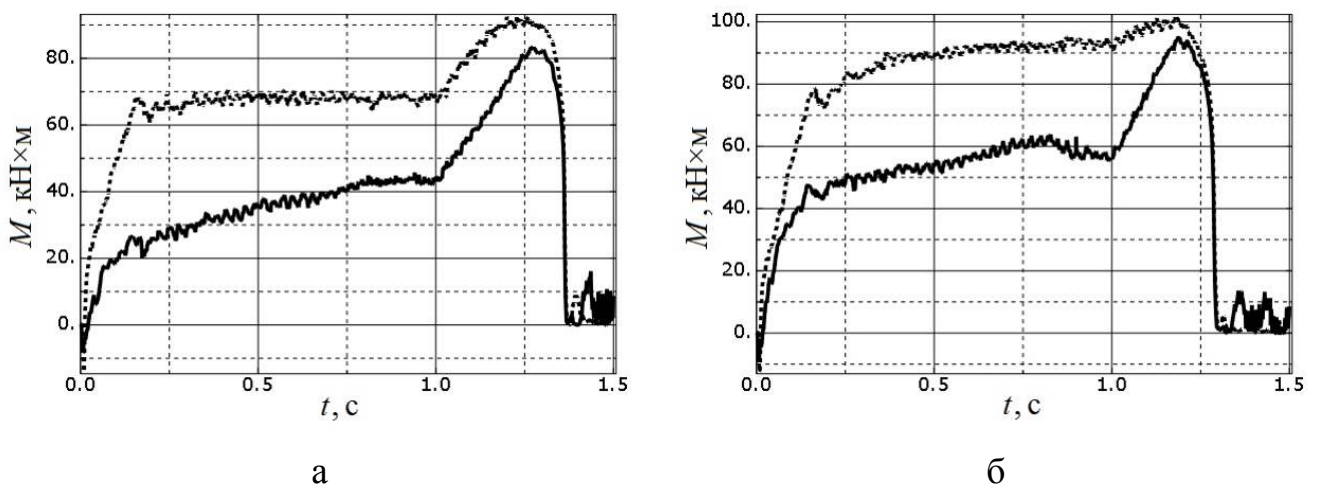


Рисунок 5.6 – Залежність моменту розрізання на верхньому (—) і нижньому (---) ножах для сталі 20 (а) і 65Г (б)

В цілому, слід зазначити, що при температурі 700°C границя міцності сталі 20 в $\approx 1,35$ рази нижче, ніж сталі 65Г, однак максимальний крутний момент парою дисків менше тільки в $\approx 1,1$ рази. Даний факт вказує на те, що при розрахунку максимального крутного моменту необхідно брати матеріал не тільки з найбільшим значенням границі міцності, а й з високим коефіцієнтом тертя.

5.2 Математичне моделювання напружено-деформованого стану металу і основних показників якості при поздовжньому розрізанні товстих листів в холодному стані

Процес поздовжнього розрізання товстих листів зазвичай полягає в обрізанні бічних кромки для надання готовому листу необхідних розмірів і форми. Проте на широкосмугових станах, в ряді випадків, можуть здійснювати розпуск на смуги меншої ширини. У першому випадку застосовують двопарні кромкообрізнальні дискові ножиці, а також ножиці з двоєні кромкообрізнальні з дуговим ножом, котрі працюють за принципом перекошування ножа, що сприяє мінімальній деформації листа після розділення. У другому – багатопарні дискові ножиці ножиці.

Основним недоліком в роботі дискових ножиць є ймовірність виникнення дефекту «серповидність», який досить ефективно вирішується методом встановлення системи роликів, які стримують рух листа в напрямку перпендикулярному його руху. Однак дискові ножиці дозволяють здійснити процес обрізання бічних кромки на всій довжині розкату з однієї установки, що не представляється можливим зробити на ножицях, що працюють за принципом перекошування ножа, в силу його обмеженої довжини. У цьому випадку також використовують систему роликів, щоб мінімізувати ймовірність виникнення уступів в областях переходу від одного зрізу до іншого.

Стосовно до математичного моделювання методом скінченних елементів процесу поздовжнього розрізання дисковими ножами товстолистових розкатів в холодному стані, склад моделі і підходи до її реалізації практично не відрізняються від моделі для умов гарячого розрізання, яка описана вище (див. підрозділ 5.1),

оскільки на практиці обидва процеси здійснюються на ножицях ідентичних конструкцій [276].

Як приклад моделювали процес розрізання дисковими ножами сталі 15ХСНД в холодному стані з межею міцності $\sigma_b = 530$ МПа. В ході моделювання товщина розрізуваного листа склала 35 мм, ширина листа – 1200 мм, ширина відрізуваної кромки – 50 мм, діаметри дисків ножів – 1000 мм, товщина ножів – 100 мм, діаметр роликів – 100 мм. Коефіцієнт тертя для модельованих умов склав 0,3.

За аналогією з розглянутою вище задачею (див. підрозділ 5.1) для визначення граничних навантажень процес був розділений на два етапи, коли лист рухався вільно (без додаткового зовнішнього опору руху) до настання сталого стану процесу, а потім на торцеву поверхню листа діяли навантаженням Q_f , протилежним по напрямку руху і лінійно зростаючим у часі.

На рисунку 5.7 представлені основні результати моделювання процесу розрізання дисковими ножами товстолистого розкату на прикладі сталі 15ХСНД. Зокрема було отримано НДС розкату в процесі розрізання (на рис. 5.7,а представлено НДС металу при сталому стані процесу розрізання).

Крім того, були отримані залежності силових і кінематичних параметрів, а саме сил (див. рис. 5.7, б) і моментів (див. рис. 5.7, в) на верхньому і нижньому ножах, а також лінійної швидкості листа (див. рис. 5.7, д), які мають місце при сталому процесі і при впливі сили зовнішнього опору (див. рис. 5.7, е).

В цілому характер залежності енергосилових параметрів процесу розрізання дисковими ножами практично повністю збігається з аналогічною залежністю, отриманою для умов гарячого розрізання (див. рис. 5.4-5.6).

Аналіз результатів показав, що незалежно від механічних властивостей розрізуваних листів, в умовах холодного розрізання співвідношення моментів між верхнім і нижнім ножами в сталому стані складає 0,4...0,45, тоді як в умовах гарячого розрізання – 0,6...0,65. Це можна пояснити, як різними значеннями коефіцієнту тертя, так і різними налаштуваннями ножиць при реалізації процесу.

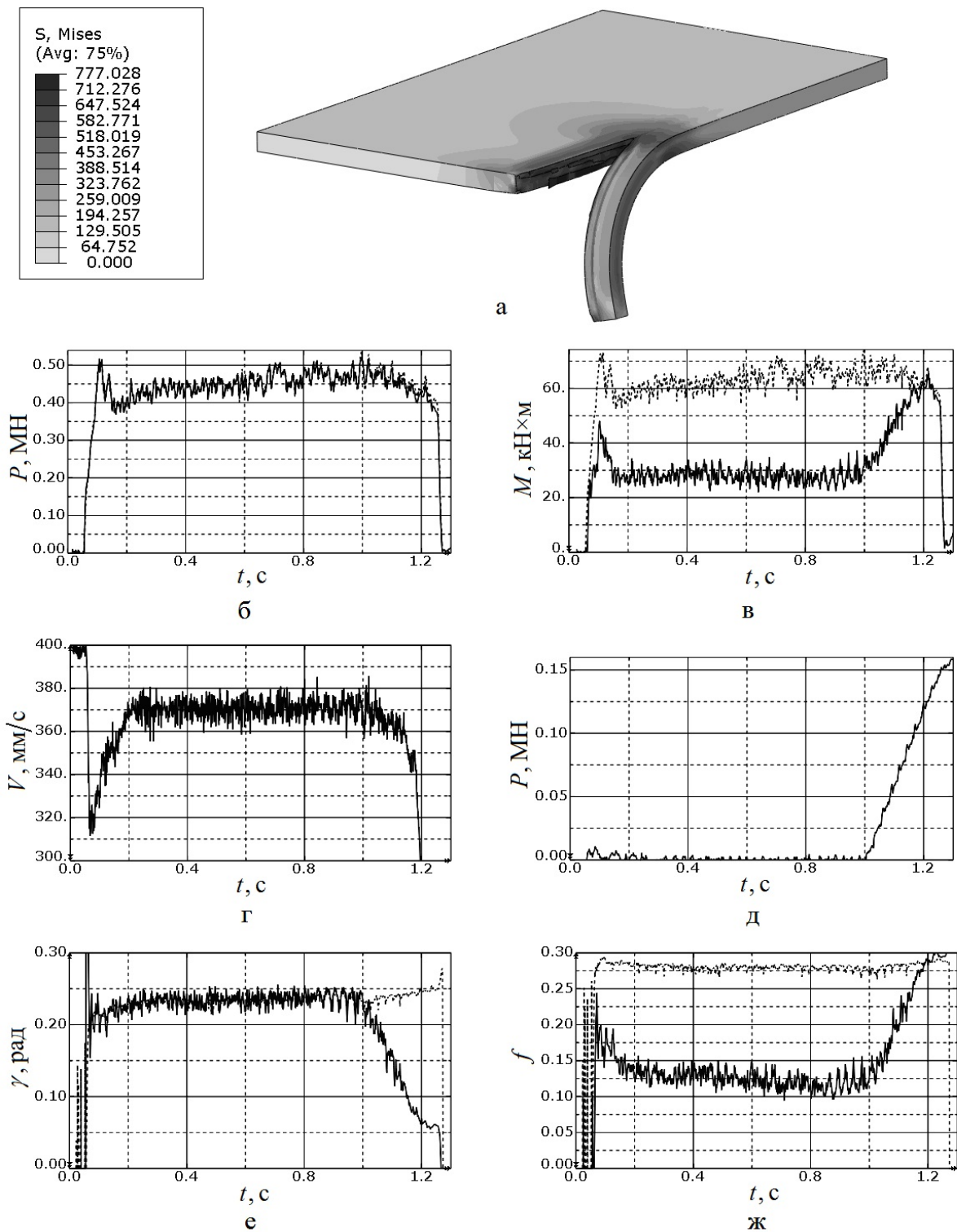


Рисунок 5.7 – Основні результати моделювання для сталі 15XCHD: а – НДС листа в сталому процесі; б, в – відповідно сила P і момент M розрізання на верхньому (—) і нижньому (---) ножах; г – швидкість руху розкату в ножах V ; д – зміна сили зовнішнього опору; е, ж – відповідно кут γ прикладання результуючої сили розрізання і приведений коефіцієнт тертя f на верхньому (—) і нижньому (---) ножах

Стала швидкість листа в ножах майже збігається в умовах гарячого і холодного розрізання і становить 0,9...0,95 окружної швидкості диска.

З огляду на отримані результати слід вказати, що дані СЕ моделі дозволяють визначити додаткові залежності, отримання яких з експериментальних даних є досить трудомістким. Зокрема на рис. 5.7, є представлено зміну кута прикладання результуючої сили розрізання на верхньому γ_1 і нижньому γ_2 ножах, які були отримані за результатами моделювання, використовуючи такі вирази:

$$\gamma_1 = \arctan(P_{1x}/P_{1y}) \text{ і } \gamma_2 = \arctan(P_{2x}/P_{2y}), \quad (5.1)$$

де P_{1y} і P_{2y} – відповідно вертикальні компоненти радіальних сил на верхньому і нижньому ножі;

P_{1x} і P_{2x} – відповідно горизонтальні компоненти радіальних сил на верхньому і нижньому ножі.

Як можна бачити представлені залежності при сталому процесі розрізання демонструють, що кути прикладання результуючої сили розрізання на верхньому і нижньому ножах рівні, але при появі сили зовнішнього опору їх співвідношення змінюється. При цьому величина кута на нижньому ножі незначно зростає, тоді, як на верхньому, кут прагне до нуля аж до повного виштовхування розкату з ножів. Фактично зміна цього кута частково пояснює перерозподіл моментів при наявності зовнішнього опору.

У той же час, відмінність у величині моментів на верхньому і нижньому ножах при сталому процесі розрізання можна пояснити, різними значеннями приведенного коефіцієнта тертя на верхньому f_1 і нижньому f_2 ножах (див. рис. 5.7, ж), значення, яких можна отримати за результатами моделювання, використовуючи такі вирази:

$$f_1 = M_1/(R \cdot P_1) \text{ і } f_2 = M_2/(R \cdot P_2), \quad (5.2)$$

де M_1 і M_2 – відповідно крутний момент на верхньому і нижньому ножі (див. рис. 5.7, в);

R – радіус диска ножа;

P_1 і P_2 – відповідно радіальні сили на верхньому і нижньому ножі (див. рис. 5.7, б).

Таким чином, запропоновані математичні моделі дозволяють розширити уявлення не тільки про НДС металу в процесі розрізання дисковими ножами, але й уточнити енергосилові і кінематичні параметри процесу, що сприятиме підвищенню ступеня наукової обґрунтованості при прийнятті відповідних технологічних і проектно-конструкторських рішень стосовно процесу розрізання товстих листів дисковими ножами.

Однак, реалізація процесу поздовжнього розрізання із застосуванням дискових ножів, крім зазначених вище недоліків, має ще й обмеження по товщині розрізуваних розкатів в холодному стані. Як відомо (див. підрозділ 5.1), розширити сортамент можливо тільки за умови реалізації процесу в гарячому стані.

Альтернативою даного рішення є застосування принципу перекочування ножа, коли процес реалізується в декілька кроків, шляхом розділення розкату на більшій частині довжини ножа і часткового надрізання на заключному етапі з подальшим переміщенням листа на довжину ділянки, де має місце повне розділення, і повторення процесу [124,125].

При розробці математичної моделі процесу поздовжнього розрізання дуговими ножами на ножицях з перекочуванням ножа [381] за основу була взята кінематична схема механізму розрізання здвоєних кромкообрізних ножиць стану 2800 конструкції НКМЗ (рис. 5.8,а). Власне скінченно-елементна модель (рис. 5.8,б) складається з трьох абсолютно жорстких недеформовних тіл – притиск, верхній (дуговий) і нижній нерухомий ножі, а також деформовного бруса, що моделює лист і відрізувану кромку.

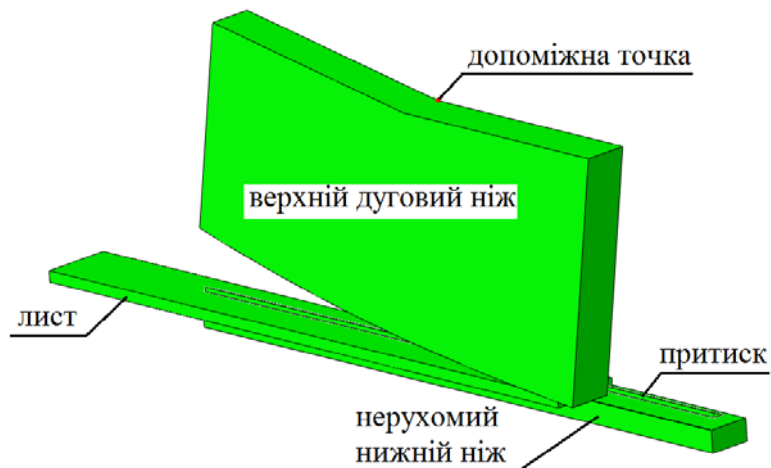
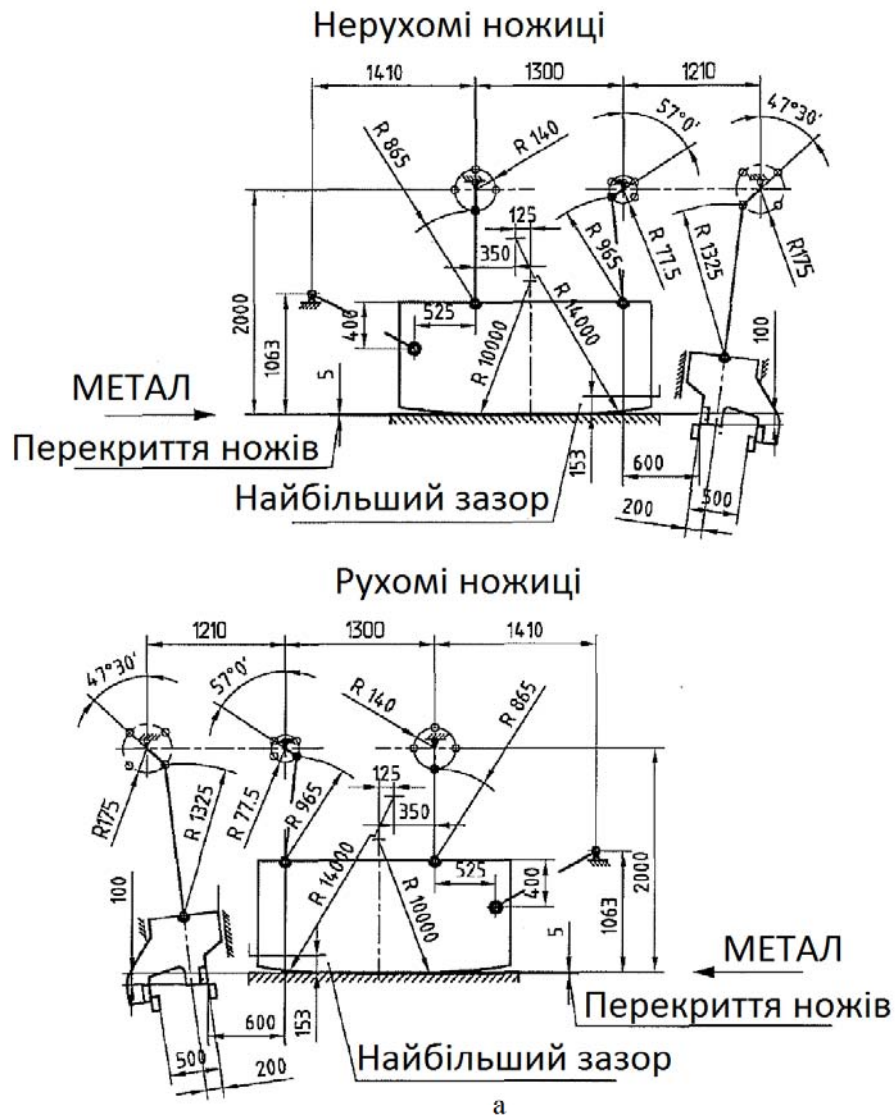


Рисунок 5.8 – Кінематична схема механізмів розрізання ЗКОН стану 2800 конструкції НКМЗ (а) і загальний вигляд моделі процесу обрізання кромки дуговим ножом на ножицях з перекочування ножа

При моделюванні в якості розрізуваного матеріалу були розглянуті чотири марки сталі 45, 75, 28Х3СНМВФА і 18Х2Н4ВА, характеристики яких і товщина листів представлені в таблиці 5.1.

Таблиця 5.1 – Характеристика матеріалу листів і умови реалізації процесу поздовжнього обрізання бічних кромки на ЗКОН

№ п/п	Марка сталі	$\sigma_{0,2}$, МПа	σ_b , МПа	δ	Товщина листа, мм
1	45	347	660	0,197	50
2	75	574	989	0,108	40
3	28Х3СНМВФА	860	1000	0,09	40
4	18Х2Н4ВА	910	1128	0,09	27

Крім параметрів зазначених в таблиці 5.1, був ряд загальних для всіх випадків параметрів, а саме ширина відрізуваної кромки – 150 мм; довжина модельованої частини листа – 2600 мм; переміщення листа після першого і кожного наступного розрізання – 1100 мм. Швидкість обертання кривошипів визначалася з умови номінальної частоти обертання двигуна ($n_{дв} = 744 \text{ об/хв}$), що з урахуванням передавального числа приводу ($U = 38,58$) склало $\omega_k = 2,0195 \text{ с}^{-1}$.

Для здійснення процесу розрізання в даній моделі, за аналогією з реальною конструкцією ножиць, рух допоміжної точки верхнього (дугового) ножа здійснювався за певною траєкторією та обертанням в площині руху. Траєкторія руху допоміжної точки, а також її обертання були розраховані на базі відомих алгоритмів [40,43, 271] з розрахунку кінематичних параметрів роботи ножиць.

В якості початкового положення кривошипів, з метою мінімізації холостого ходу моделі, був обраний кут повороту кривошипів від «нульового» (як показано на рис. 5.8) положення на величину 205° . Так на рис. 5.9 представлені розрахункова траєкторія руху допоміжної точки (рис. 5.9, а) і кут повороту ножа в площині розрізання (рис. 5.9, б).

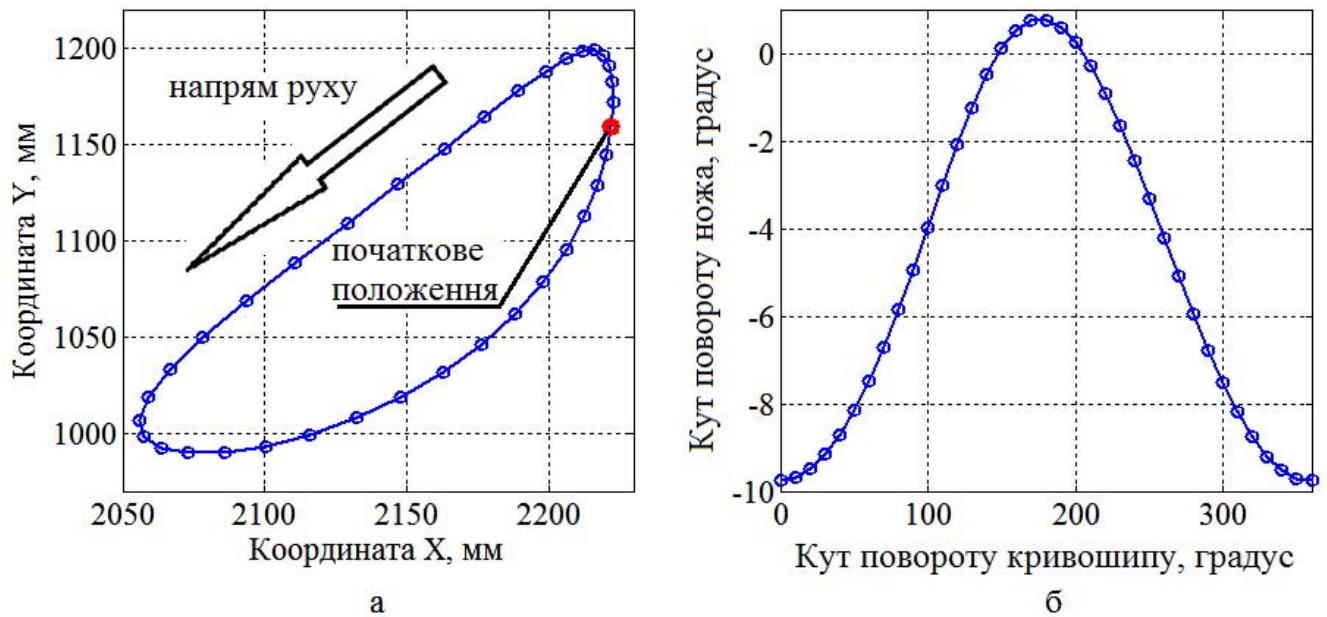


Рисунок 5.9 – Розрахункова траєкторія руху допоміжної точки (а) і кут повороту ножа в площині руху (б) з дискретним кроком повороту кривошипів 10°

Решта недеформовних елементів моделі – нижній ніж і притиск залишалися нерухомими.

На рисунку 5.10, в якості прикладу, для сталі 45 представлено поетапний аналіз реалізації процесу при обрізанні бічних крамок листа товщиною 50 мм, а саме представлені чотири положення в процесі обрізання кромки дуговим ножом, котрі є початковими для кожного з них.

Власне процес починається в початковому положенні ножа (див. рис. 5.10,а). Після повороту ексцентриків на кут 156° завершується етап проникнення дугового ножа в лист (див. рис. 5.10,б). Потім, після повного виходу ножа з контакту з листом в період холостого руху дугового ножа здійснювалося переміщення листа з надрізаною кромкою на 1100 мм, що відповідає повороту кривошипів на кут 347° (див. рис. 5.10,в).

На наступному циклі руху ножа реалізовувалося повне відділення кромки, що в даних умовах відповідало куту повороту кривошипів на 520° (див. рис. 5.10,г).

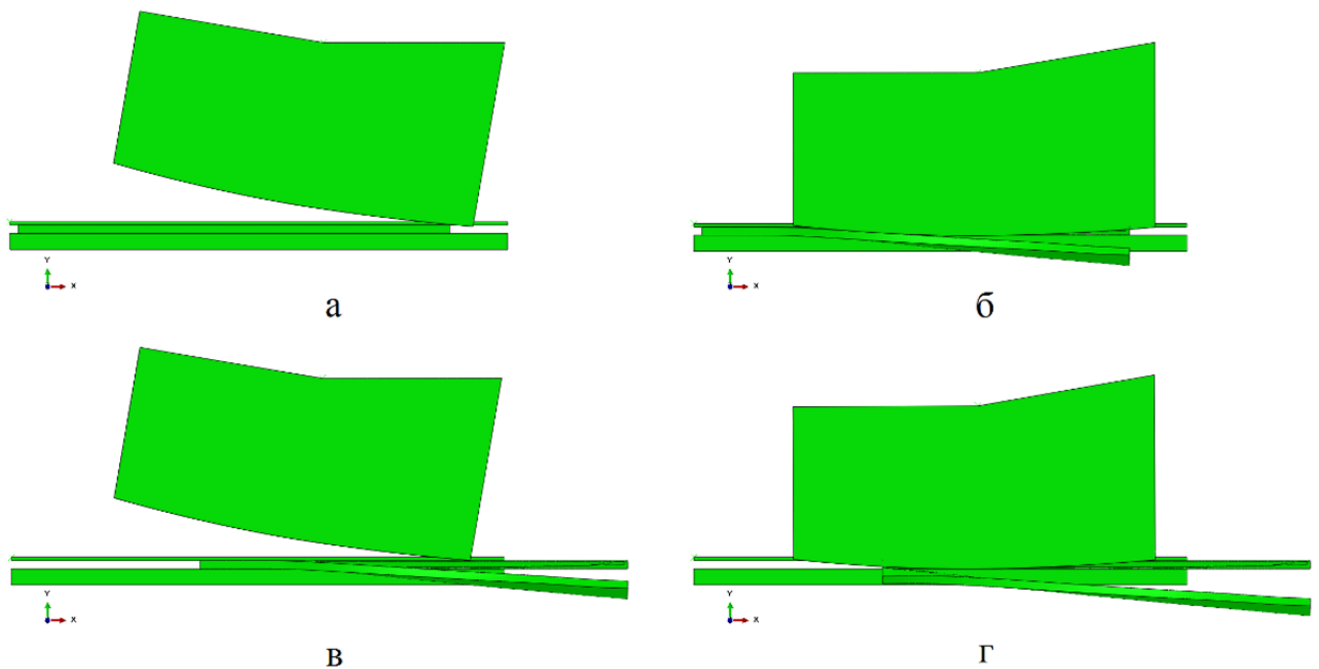


Рисунок 5.10 – Загальний вигляд моделі на прикладі сталі 45 для різних етапів процесу: а – початкове положення (ексцентрики повернені на 205° щодо «нульового» положення (див. рис. 5.8, а)); б – завершення першого надрізу на 1,40 с (поворот кривошипів 162°); в – нове положення листа після зсуву на 3,05 с (поворот кривошипів 353°); г – повне відділення кромки від листа на 4,5 с (поворот кривошипів 520°)

На рисунку 5.11, в якості прикладу також для сталі 45 при обрізанні бічних кромки листа товщиною 50 мм, представлено НДС листа і кромки на 0,7 с етапу сталого процесу (див. рис. 5.11,а) і по завершенню першого етапу проникнення на 1,4 с (див. рис. 5.11,б), а також показана залежність сили розрізання в ході першого етапу (див. рис. 5.11,в). Подібні результати моделювання були отримані і для інших умов (див. табл. 5.1).

Отримані результати моделювання показали, що при визначенні граничної товщини розрізуваного металу на ножицях недостатньо враховувати тільки границю міцності сталі і товщину листа. Так, при інших рівних умовах найбільше значення сили розрізання було отримано для сталі 75 при товщині листа 40 мм, яке на $\approx 3\%$ перевищило силу розрізання для сталі 45 при товщині 50 мм.

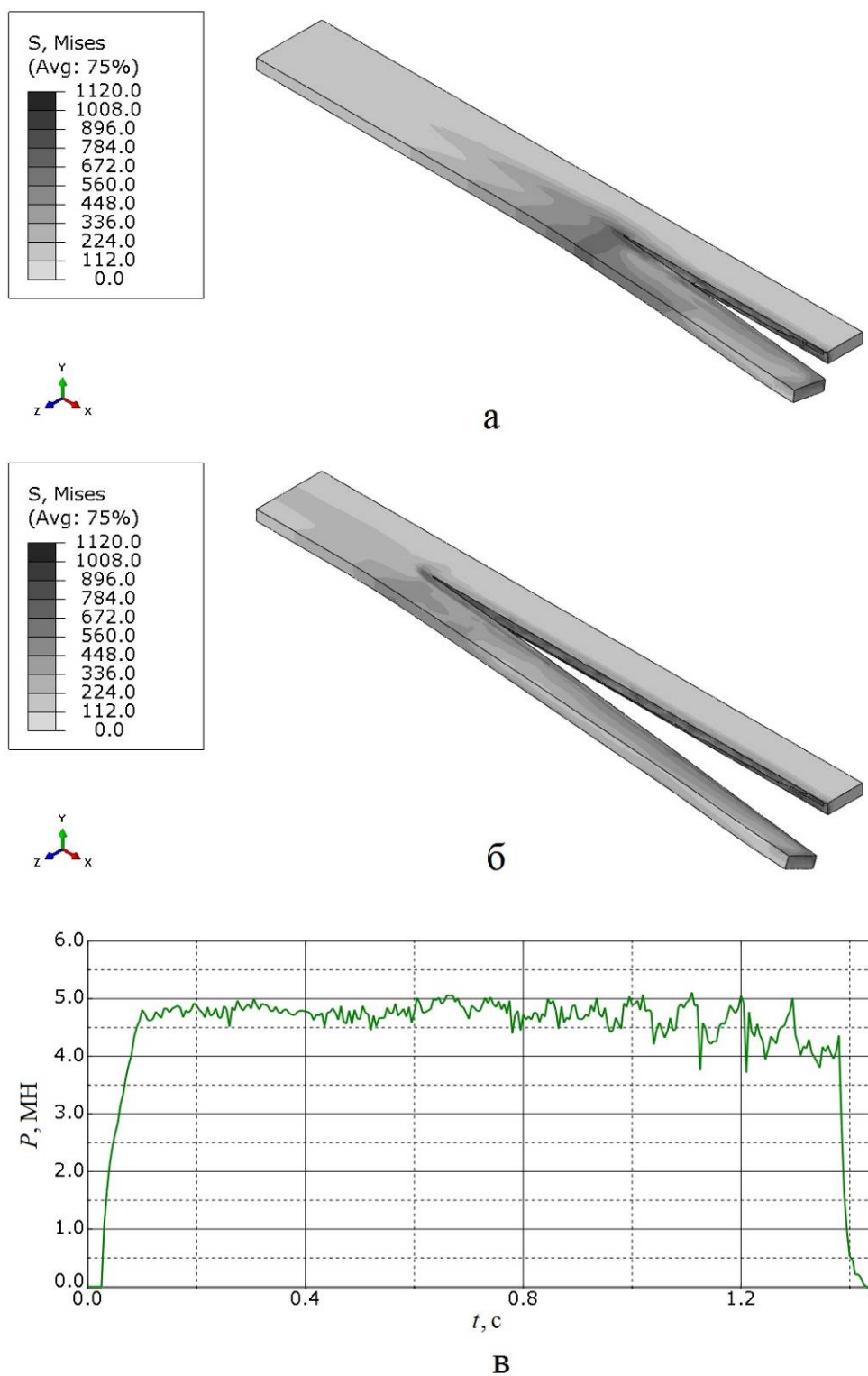


Рисунок 5.11 – НДС листа і кромки зі сталі 45 при розрізанні дуговим ножом на 0,7 с в сталому стані процесу (а), на 1,4 с після завершення першого етапу (б) і відповідна першому етапу залежність сили розрізання (в)

У той же час при розрізанні сталі 28X3СНМВФА, що має дещо вищу границю міцності по відношенню до сталі 75, сила розрізання була нижче на $\approx 9\%$. При цьому слід зазначити, що товщина даних листів дорівнювала 40 мм. Крім того, при розрізанні сталі 18X2Н4ВА товщиною 27 мм максимальна сила, незважаючи на більше значення границі міцності, була ще нижчою.

Отже узагальнюючи отримані результати можна стверджувати, що при розрахунку максимальної товщини розрізуваних листів необхідно мати уточнені математичні моделі розрахунку відносного проникнення до сколювання ε_H , оскільки від нього залежить розмір осередку різання, а відповідно й значення сили розрізання.

Раніше зазначалося (див. п. 4.1.3), що при розділенні холодного металу навіть ножицями з паралельними ножами поведінка матеріалів з однаковими значеннями границі міцності, але з різними значеннями границі текучості, може різнитися. Вочевидь, дане явище більш істотно впливає на енергосилові параметри процесів розрізання похилими, дисковими і дуговими ножами, а сам вплив може істотно залежати від величини подовження матеріалу при розтягуванні, оскільки воно в сукупності з границею міцності і границею текучості матеріалу може мати неоднозначний вплив на відносне проникнення ножів в метал до сколювання.

Розробка запропонованих моделей сприяє розширенню уявлення про процес розрізання дисковим і дуговим ножами, а також дозволяє підвищити точність і наукову обґрунтованість при розрахунку максимальних товщин листів, що допускаються до розрізання. Таким чином, даний підхід дозволяє уточнити сортамент розрізуваних листів та забезпечити роботу ножиць в режими проектних навантажень.

5.3 Математичне моделювання напружено-деформованого стану металу і основних показників якості при поздовжньому розрізанні тонких листів і смуг

В умовах металургійного виробництва тонкими вважаються листи і смуги товщиною до 4 мм, однак агрегати поздовжнього розрізання листів і смуг, як правило, охоплюють більш широкий діапазон. Зокрема, ПрАТ «НКМЗ» були виготовлені багатодискові ножиці для ВАТ "Северсталь", які призначені для розпуску смуг на більш вузькі з одночасним обрізанням бічних кромки.

Кінематична схема ножиць даної конструкції представлена на рис. 5.12. Ці ножиці розраховані на розрізання листів і смуг товщиною 3...12 мм, при ширині 700...1850 мм, з границею міцності матеріалу 650 МПа і границею текучості 400 МПа. Максимальна кількість осередків розрізання при товщині 12 мм становить 4, а при товщині 3 мм – 20. Діаметр дискових ножів становить 650 мм.

Слід зазначити, що в залежності від послідовності встановлення ножів на валах, реалізація процесу поздовжнього розділення листів і смуг може здійснюватися за двома схемами:

- 1) ножі встановлюються попарно, що призводить до почергового відгину відрізуваних смуг;
- 2) ножі встановлюються у шаховому порядку, що забезпечує вихід смуг з ножів в одній площині, але з поворотом щодо поздовжньої осі.

Вочевидь, що існуючі методики розрахунку не дозволяють врахувати вплив схеми встановлення ножів на енергосилові параметри процесу розпуску. Таким чином, доцільно розробити математичні моделі на базі МСЕ і отримати якісні і кількісні оцінки впливу схеми розділення на силу і момент розрізання.

Використовуючи програмний комплекс Abaqus, були розроблені 3D моделі, що описують процес розпуску смуги дисковими ножами в холодному стані.

Кінематична схема
ножиць багатодискових

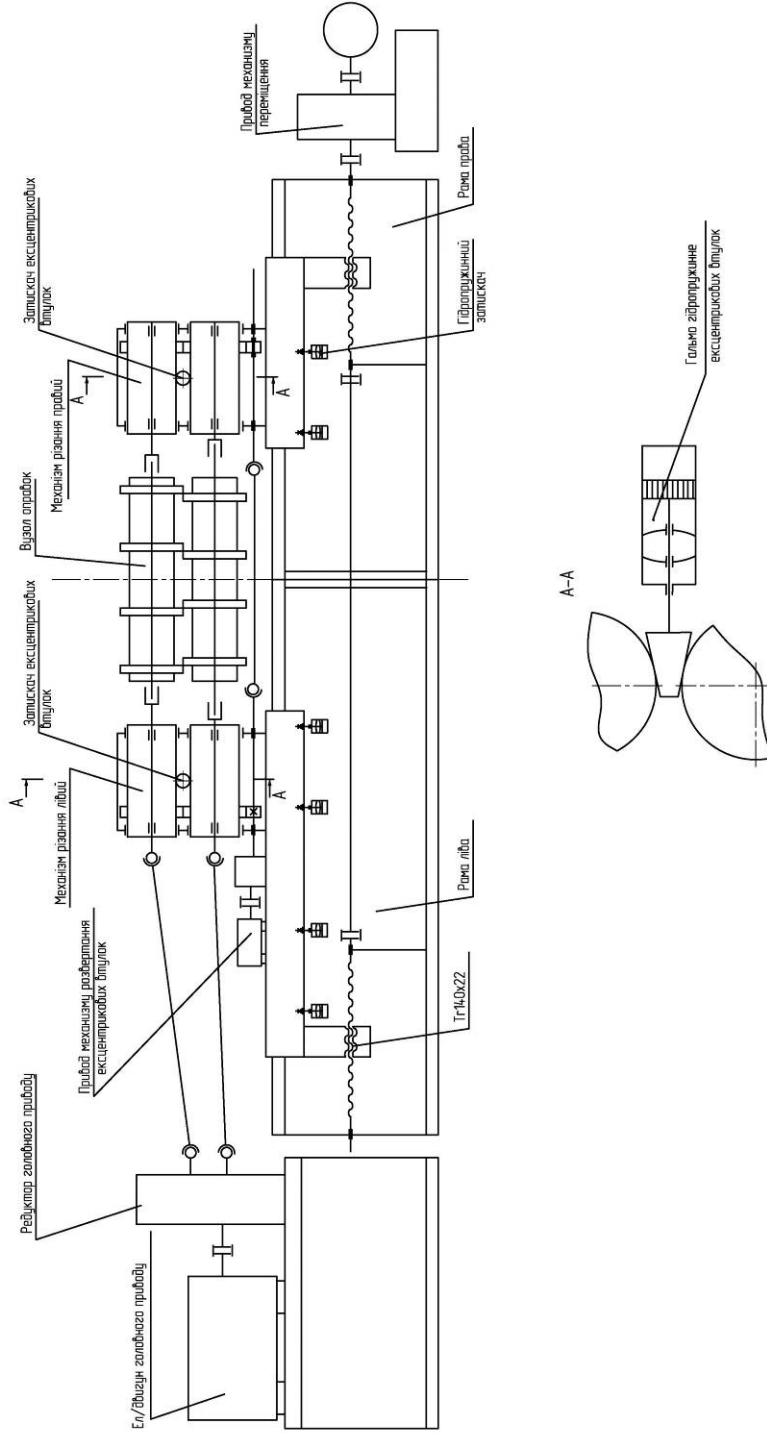


Рисунок 5.12 – Кінематична схема багатодискових ножиць ВАТ «Северсталь» конструкції ПрАТ «НКМЗ»

Дані моделі (рис. 5.13) являють собою одну другу симетричну частину розглянутих процесів, і складаються з двох абсолютно жорстких недеформовних тіл, які описують диски ножів, ще одного абсолютно жорсткого недеформовного тіла, що описує подавальний стіл, а також деформовного бруса, що моделює розрізувану смугу.

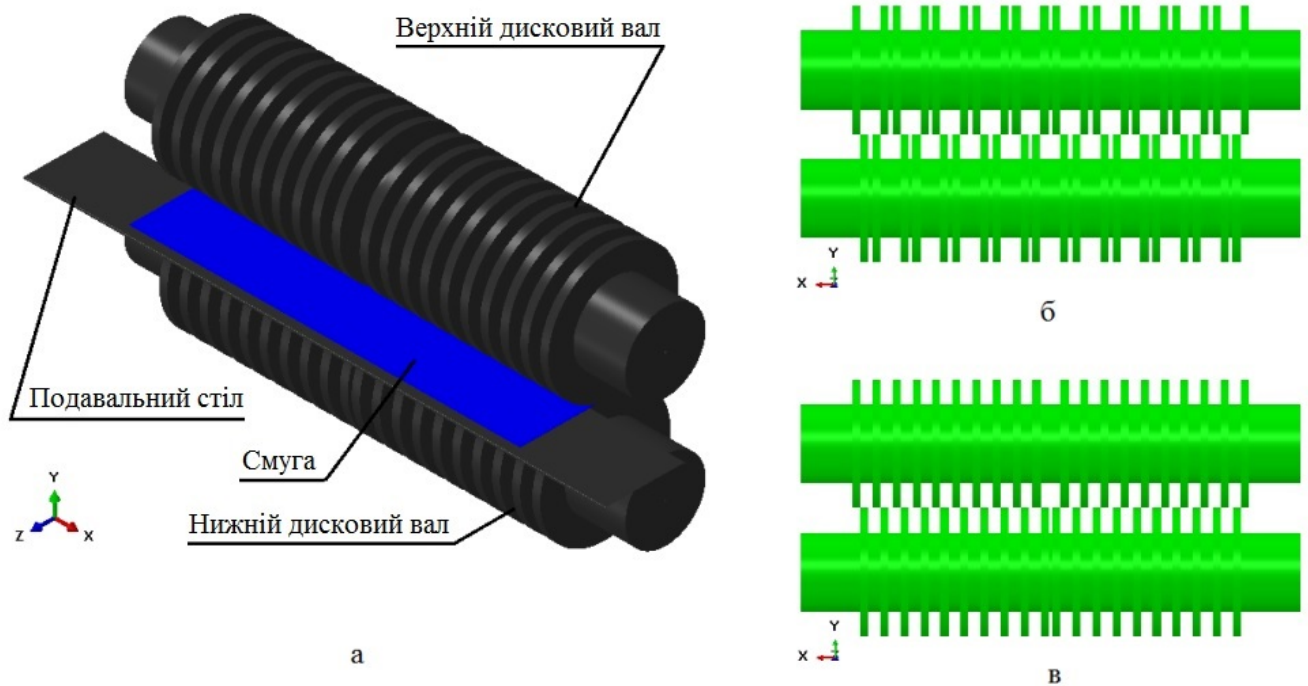


Рисунок 5.13 – Загальний вигляд моделі розрізання багатодисковими ножицями при розпусканні смуги товщиною 3 мм при одночасному числі осередків розрізання 20 (а), а також компонування ножів на валах за схемою 1 (б) і схемою 2 (в)

Всі жорсткі недеформовні тіла описуються як аналітичні поверхні.

Рівень подавального столу встановлювався виходячи з симетричних умов захоплення смуги товщиною 12 мм.

Деформований брус представляє собою сітку з ізопараметричних шестигранних восьмивузлових лінійних елементів. Структура сітки нерівномірна із згущенням в області розрізання (рис. 5.14).

За аналогією з реальною конструкцією ножиць, були розроблені чотири варіанти моделі, два варіанти для розрізання смуг товщиною 12 мм, що симулюють

одночасно 4 осередки розрізання за схемами 1 і 2, а також два симулюють розпуск смуг товщиною 3 мм з 20-ю осередками розрізання за схемами 1 і 2 (представлені на рис. 5.13, б і рис. 5.13, в).

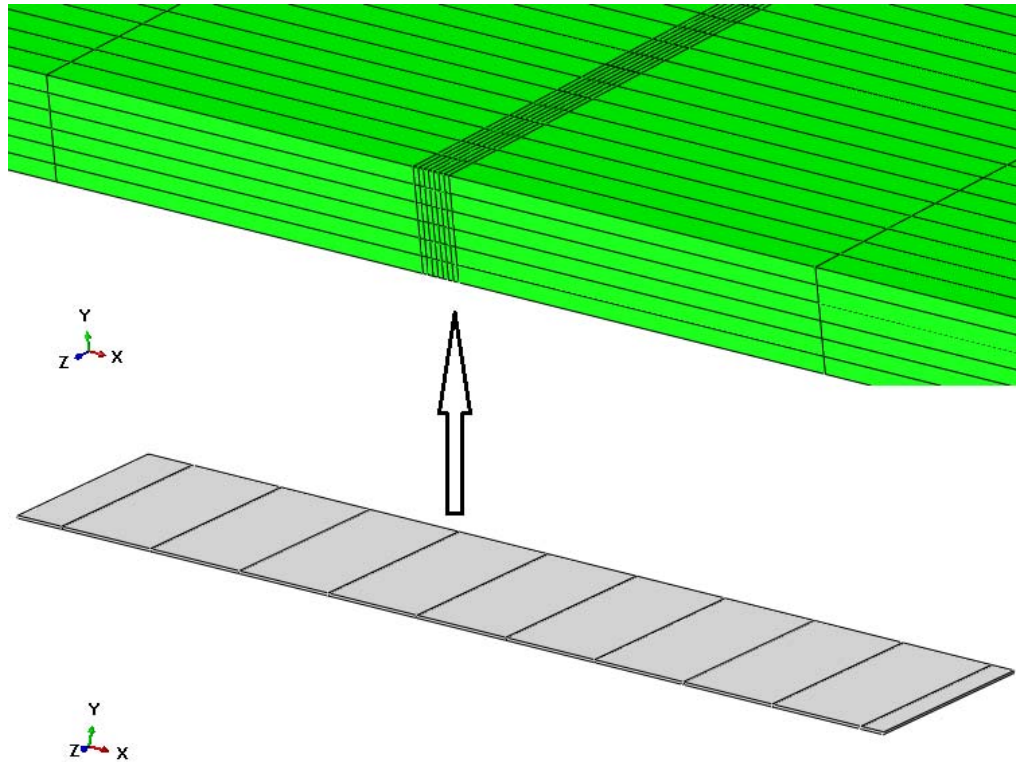


Рисунок 5.14 – Структура сітки бруса що моделює розрізувану смугу товщиною 3 мм зі згущенням в осередках розрізання

За матеріал смуг брали сталь ВСт2кп з наступними механічними властивостями [365]: $\sigma_{0,2} = 310 \text{ МПа}$, $\sigma_b = 400 \text{ МПа}$.

Як приклад результатів моделювання на рис. 5.15 представлено НДС смуги товщиною 3 мм при симуляції розпуску дисковими ножами з 20-ю осередками розрізання при реалізації процесу з установкою ножів по схемі 1 (див. рис. 5.13, б).

В ході обробки результатів моделювання визначали ряд енергосилових параметрів, які представлені в таблиці 5.2. За результатами, представленими в таблиці, можна бачити, що друга схема реалізації процесу розпуску смуг на дискових ножицях, з точки зору навантаження на ножиці є менш прийнятною.

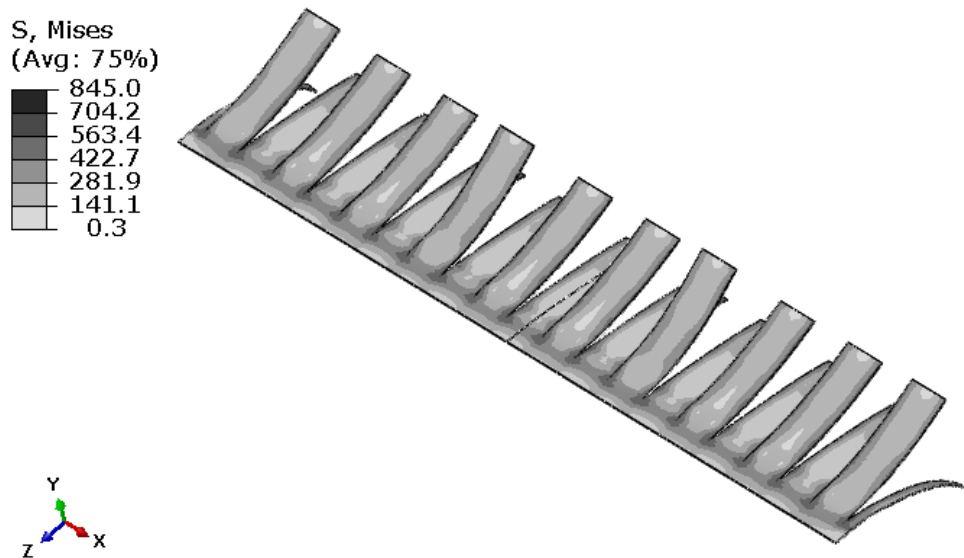


Рисунок 5.15 – НДС смуги товщиною 3 мм при симуляції розпуску дисковими ножами з 20-ю осередками розрізання при реалізації процесу з установкою ножів по схемі 1 (див. рис. 5.13, б)

Таблиця 5.2 – Основні енергосилові показники процесу розпуску смуг на багатодискових ножицях

Параметр	Умови розрізання			
	товщина 3 мм		товщина 12 мм	
	схема 1	схема 2	схема 1	схема 2
Сумарна сила розрізання, кН	266	454	546	584
Сумарний момент розрізання, кНм	8,17	10,45	27,9	30,3
Сумарна робота пластичної деформації на 1 м смуги, кДж/м	18,5	23,5	62,1	63,8

Особливо добре це можна бачити на прикладі розпуску смуги товщиною 3 мм. Зокрема можна відзначити, що в порівнянні зі схемою 1 мають місце зрос-

тання сили розрізання на 70%, а моменту розрізання на 28%. У той же час, для смуги товщиною 12 мм зростання даних показників склало 7% і 8,6% відповідно.

В цілому зростання даних показників можна пояснити додатковою роботою, що витрачається на пластичну деформацію смуг в процесі розрізання при реалізації 2-ї схеми встановлення ножів. З огляду на те, що товщина смуг відрізняється в чотири рази, робота пластичної деформації в перерахунку на одиницю об'єму для смуги товщиною 3 мм буде вищою, що цілком зрозуміло більш стисненими умовами деформації в порівнянні зі смугою 12 мм.

Однак можна відзначити і той факт, що величина навантажень при розрізанні смуги товщиною 3 мм, більш ніж в 2 рази нижча, ніж для смуги 12 мм. Перш за все, даний факт вказує на те, що в ряді випадків рекомендовані параметри налаштування ножиць не є раціональними з позиції їх навантаження.

Вочевидь, що застосування СЕ моделей буде сприяти розширенню уявлення про процес поздовжнього розрізання смуг на багатодискових ножицях і дозволить підвищити наукову обґрунтованість при прийнятті проектно-конструкторських і технологічних рішень.

ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 5

1. Встановлено, що в процесі обрізання кромки товстих листів на дискових ножицях, незважаючи на те, що в холодному стані співвідношення моментів між верхнім і нижнім ножами в сталому режимі становить 0,4...0,45, а в гарячому – 0,6...0,65, швидкість листа в ножах змінюється однаково в діапазоні 0,9...0,95 окружної швидкості диска, як в холодному та і в гарячому стані.

2. Результати математичного моделювання процесів розрізання за принципу перекочування ножа дозволили встановити, що при визначенні граничної товщини розрізуваного металу на ножицях, необхідно мати уточнені математичні моде-

лі розрахунку відносного проникнення до сколювання ε_H , оскільки від нього залежить розмір осередку різання, а відповідно й значення сили розрізання.

3. Встановлено, за результатами математичного моделювання поздовжнього розрізання тонких листів і смуг багатодисковими ножицями, що в умовах максимальної кількості осередків розділення більш ефективною є схема попарного встановлення ножів з відгином відрізуваних смуг, оскільки не потребує додаткових енерговитрат на скручування смуги в поперечній площині, котрі зростають зі зменшенням її товщини, бо збільшуються кут повороту і максимально можлива кількість смуг на виході.

РОЗДІЛ 6

РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ПРОЦЕСІВ РОЗДІЛЕННЯ ЛИСТОВОГО І СОРТОВОГО МЕТАЛОПРОКАТУ

6.1 Результати експериментальних досліджень процесів поперечного розрізання листового металопрокату

6.1.1 Поперечне розрізання паралельними ножами

Експериментальні дослідження процесу поперечного розрізання паралельними ножами вирішували задачу оцінювання адекватності розроблених СЕ моделей шляхом співставлення та оцінки ступеня збіжності кривих сили розрізання, отриманих експериментально та за результатами математичного моделювання.

Для цього в рамках договорів про співпрацю між ДДМА (м. Краматорськ, Україна), ДонДТУ (м. Алчевськ, Україна) і ПрАТ «НКМЗ» (м. Краматорськ, Україна) було проведено ряд експериментів на наступному експериментальному обладнанні (див. підрозділ 2.3) :

– лабораторні кривошипно-шатунні ножиці з паралельним розташуванням супортів в лабораторії кафедри «Машини металургійного комплексу» Донбаського державного технічного університету (м. Алчевськ);

– лабораторна установка прес-ножиць кафедри «Механіки та пластичного формування» Донбаської державної машинобудівної академії (м. Краматорськ);

– лабораторна установка кафедри «Автоматизовані металургійні машини та обладнання» Донбаської державної машинобудівної академії (м. Краматорськ).

Характеристика експериментальних зразків і умов реалізації процесу представлені в таблиці 6.1.

Таблиця 6.1 – Характеристика експериментальних зразків і умов реалізації експерименту

№ п/п	Марка матеріалу	$\sigma_{0,2}$, МПа	σ_b , МПа	δ	Переріз h×b, мм	Швидкість ножа, мм/с	Обладнання
1	Сплав алюмінієвий АА6066-Т6	360	395	0,18	10×10	30	Кафедра «ММК і ПМ» ДонДТУ (м. Алчевськ)
2	Сталь 28Х3СНМВФА (СП28; ЭП326А) після прокатки	860	1000	0,09	8,2×40	30	
3	Сталь 28Х3СНМВФА (СП28; ЭП326А) термозміцнена	1170	1500	0,08	8,2×30,8	30	
4	ВСт2кп	310	397	0,22	4,9×46,5	0,6	Кафедра «Мі ПФ» ДММА (м. Краматорськ)
5	Сталь 20пс	351	413	0,14	4×46	0,6	
6	Сталь 20пс	277	399	0,11	3×45	0,6	
7	Сплав алюмінієвий Д16Т (АА2024-Т3)	346	454	0,15	2×41	0,6	Кафедра «АММ і О» ДДМА (м. Краматорськ)
8	ВСт2кп	310	397	0,22	4,9×6,5	70	
9	Сталь 20пс	351	413	0,14	4×8,6	70	
10	Сталь 20пс	277	399	0,11	3×17	70	Кафедра «АММ і О» ДДМА (м. Краматорськ)
11	Сплав алюмінієвий Д16Т (АА2024-Т3)	346	454	0,15	2×22	70	
12	ВСт2кп	202	385	0,34	1×26	70	

Механічні властивості досліджуваних зразків, а також їх хімічний склад визначали в лабораторних умовах ПрАТ «НКМЗ».

На рис. 6.1 представлені експериментальні залежності сили розрізання в функції часу, отримані на кожній з трьох використовуваних установок відповідно до умов реалізації експерименту (див. табл. 6.1).

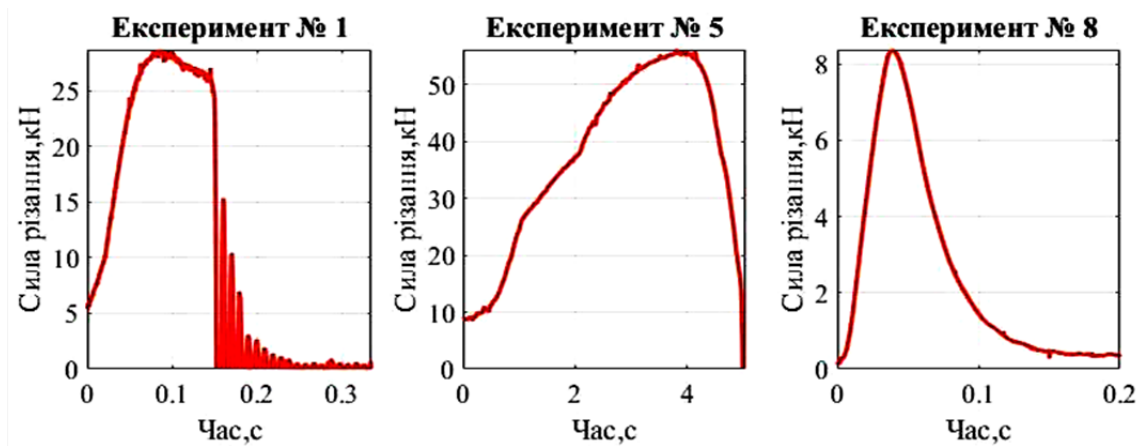


Рисунок 6.1 – Експериментальних залежності сили розрізання в функції часу, отримані на кожній з трьох використовуваних установок відповідно до умов реалізації експерименту (див. табл. 6.1)

Слід звернути увагу на характер кривих сили розрізання і вказати, що залежності мають дещо різну поведінку, що пов'язано з конструктивними особливостями установок, на яких проводились дослідження (див. підрозділ 2.3).

Так в першому випадку (див. рис. 6.1, «Експеримент №1») розрізання здійснювали на кривошипно-шатунних ножицях з електромеханічним приводом, і отримана залежність сили розрізання є типовою. А саме, простежується досить тривала за часом прямолінійна ділянка, на якій відбувається пружна деформація станини ножиць практично без проникнення ножів в метал, котрий також пружно деформується. При цьому на початку даної ділянки спостерігається деяка нелінійність, пов'язана з вибиранням зазорів в з'єднаннях ножиць після «замикання» системи через розрізуваний метал. Потім починається процес вмивання ножів в смугу аж до досягнення максимуму сили, після чого накопичені в площині зрізу пошкодження послаблюють залишковий переріз, і починається процес сколювання.

У другому випадку (див. рис. 6.1, «Експеримент №5») процес розрізання був реалізований на гідравлічному пресі в прес-ножицях. При цьому поведінка отриманої залежності сили практично повністю збігається з розглянутою вище, тільки з більш вираженою ділянкою вибору зазорів, що пояснюється невисокою швидкістю розрізання і меншим опором розрізанню матеріалу зразка.

У третьому випадку (див. рис. 6.1, «Експеримент №8») розділення зразків здійснювали на установці кривошипно-шатуних ножиць, в приводній лінії яких мають місце дві ремінні передачі.

Таким чином, поведінка кривої дещо відрізняється від двох попередніх, перш за все тим, що на ній не спостерігається ділянки з вибором зазорів в з'єднаннях, а на ділянці після максимуму сили поведінку кривої також нетипово. При цьому аналогічна картина спостерігалася для всіх розрізуваних зразків з деяким згладжуванням кривої в області піку навантаження при збільшенні товщини.

З урахуванням усього сказаного і з огляду на досить високу сталу швидкість руху ножа (70 мм/с) виконвали відеозапис процесу розділення за допомогою цифрового фотоапарата Canon PowerShot A630 з частотою 30 кадрів в секунду. На рис. 6.2 представлені окремі кадри одного з таких записів із зазначенням їх номерів.

З представлених кадрів відеозапису (див. рис. 6.2) видно, що з моменту контакту (кадр 1) і до початку проникнення ножів в метал (кадр 7) пройшло не менше 0,2 с, тобто весь цей час візуально помітного руху не відбувається. Отже, в даний проміжок часу швидкість зближення ножів практично близька до 0. Вочевидь, що на даному часовому відрізку має місце прослизання ремня по шківах з поступовим наростанням сили тиску на заготовку, при цьому вибираються всі зазори і пружно деформується станина. Починаючи з кадру 8 візуально вже можна помітити, що процес проникнення почався, оскільки відрізувана частина почала нахилитися. На наступному кадрі 9 нахил відрізуваної частини збільшився, а на кадрі 10 можна бачити тріщину, що утворилася в місці зрізу. В кінцевому рахунку, на кадрі 11, відрізувана частина повністю відокремлена від заготовки.



Кадр №1 (0,000 с)



Кадр №7 (0,200 с)



Кадр №8 (0,233 с)



Кадр №9 (0,267 с)



Кадр №10 (0,300 с)



Кадр №11 (0,333 с)

Рисунок 6.2 – Кадри відеозапису процесу розділення заготовки товщиною 4,9 мм із сталі ВСт2кп (див. табл. 6.1, поз. 8) на установці кривошипно-шатунних ножиць, в приводний лінії яких мають місце дві ремінні передачі

Таким чином, адекватне моделювання МСЕ процесу розрізання паралельними ножами з досить високими значеннями коефіцієнта кореляції можливе тільки при врахуванні особливостей роботи обладнання, а саме:

- жорсткість станини ножиць;
- кінематика руху ножів.

Без врахування цих факторів не можливо отримати реальну залежність опору розрізанню від ступеня відносного проникнення ножів в метал у вигляді адекватному для її використання при розрахунку інших процесів розділення.

Тож при експериментальних дослідженнях процесів розділення з паралельними ножами необхідно застосовувати датчики переміщення (див. підрозділ 2.3), здатні давати інформацію про фактичну відстань між ножами і відповідно про фактичний ступінь проникнення ножів в метал.

На рис. 6.3 продемонстровано вплив жорсткості станини ножиць на поведінку сили розрізання для зразків 1,2,3 (див. табл. 6.1).

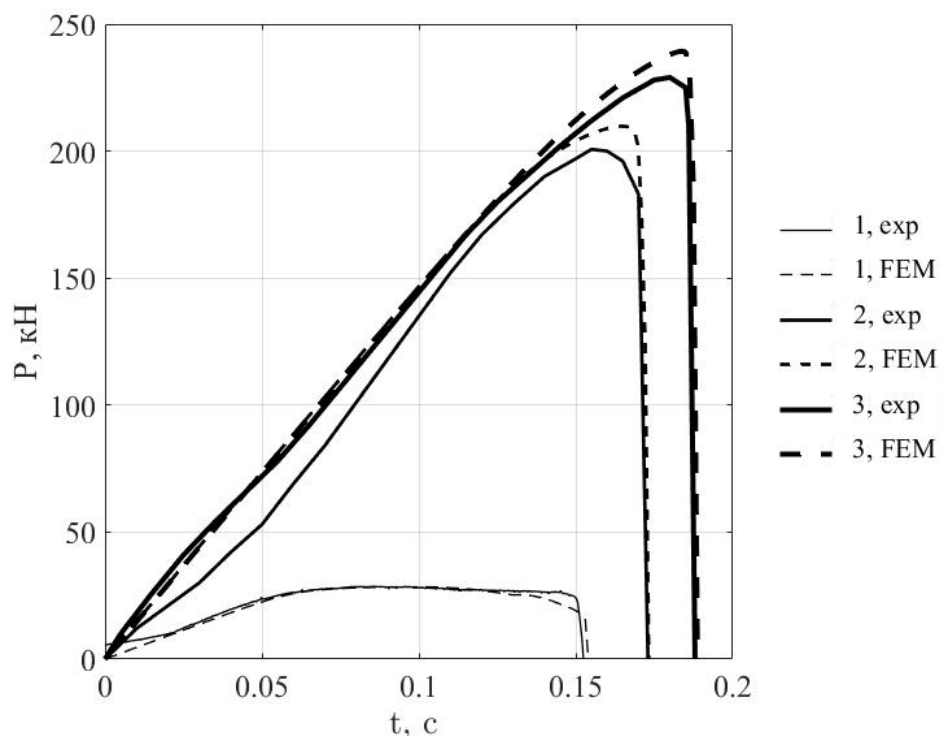


Рисунок 6.3 – Порівняння експериментальних залежностей (exp) сили розрізання P в часі t з моделюванням МСЕ (FEM) при розрізанні зразків 1,2,3 відповідно до даних таблиці 6.1.

Так при розрізанні зразка 1 (див. рис. 6.3), з метою підвищення чутливості аналого-цифрового перетворювача, встановлювали месдозу жорсткістю меншою в ≈ 4 рази по відношенню до жорсткості месدوزи при розрізанні зразків 2 і 3. Послідовне встановлення месدوزи в ланцюг жорсткості ножиць, призводило до зменшення еквівалентної жорсткості, про що свідчить кути нахилу ділянок сил розрізання на етапі вмінання. Зокрема при меншому значенні границі міцності матеріалу кут нахилу для зразка 1 більш пологий, тоді як для зразків 2 і 3, що мають різні значення границі міцності матеріалу кут нахилу практично співпадає.

Крім того це вказує, що на цій ділянці фактично не відбувається розрізання, тобто має місце лише пружна деформація розрізуваного металу і проникнення ножів в метал ще не починалося. Цей факт необхідно враховувати при визначенні кривих «опір розрізанню»- «відносне проникнення ножів» для підвищення точності розрахунку енергосилових параметрів процесів розрізання на ножицях інших конструкцій.

Коефіцієнти кореляції між експериментальними і розрахованими МСЕ кривими, а також максимальна похибка симуляції, що представлені в таблиці 6.2 високе узгодження експериментальних даних з результатами моделювання МСЕ.

Таблиця 6.2 – Кореляція R між експериментальними і за результатами симуляцій МСЕ кривими сили розрізання та максимальна похибка симуляції δP

№ п/п	Марка матеріалу	R	
1	Сплав алюмінієвий АА6066-Т6	0,874...0,960	0,96%
2	Сталь 28Х3СНМВФА (СП28; ЭП326А) після прокатки	0,952...0,994	-6,51%
3	Сталь 28Х3СНМВФА (СП28; ЭП326А) термозміцнена	0,977...0,998	-6,92%
4	ВСт2кп	0,950...0,952	6,10%
5	Сталь 20пс	0,908...0,960	5,96%

Продовження таблиці 6.2

№ п/п	Марка матеріалу	R	$\delta P = \frac{P_{експ} - P_{МСЕ}}{P_{експ}} 100\%$
6	Сталь 20пс	0,931...0,949	5,00%
7	Сплав алюмінієвий Д16Т (АА2024-Т3)	0,886...0,961	-5,08%
8	ВСт2кп	0,944...0,972	-4,10%
9	Сталь 20пс	0,913...0,974	-3,41%
10	Сталь 20пс	0,956...0,974	1,83%
11	Сплав алюмінієвий Д16Т (АА2024-Т3)	0,970...0,979	-4,97%
12	ВСт2кп	0,977...0,982	-4,80%

6.1.2 Поперечне розрізання похилими (гільйотинних) ножами

Експериментальні дослідження процесу розрізання похилими ножами були спрямовані на оцінку достовірності розроблених СЕ моделей з можливістю подальшого вивчення на даних моделях особливостей протікання та розширення уявлення про процеси, що відбуваються в металі при розрізанні похилим ножом.

В рамках даного дослідження проводили розрізання похилими ножами на трьох експериментальних установках (див. підрозділ 2.3):

– лабораторні кривошипно-шатунні ножиці з паралельним розташуванням супортів в лабораторії кафедри «Машини металургійного комплексу» Донбаського державного технічного університету (м. Алчевськ), в яких передбачена можливість нахилу верхнього ножа;

– лабораторна установка прес-ножиць кафедри «Механіки та пластичного формування» Донбаської державної машинобудівної академії (м. Краматорськ);

– лабораторна установка гільйотинних ножиць кафедри «Автоматизовані металургійні машини та обладнання» Донбаської державної машинобудівної академії (м. Краматорськ).

Вихідні дані реалізації експериментів представлені в табл. 6.3.

Таблиця 6.3 – Характеристика експериментальних зразків і умов реалізації експерименту з розрізання похилими (гільйотинними) ножами

№ п/п	Марка матеріалу	$\sigma_{0,2}$, МПа	σ_b , МПа	δ	Переріз h×b, мм	Швидкість ножа, мм/с	Кут нахилу ножа, °	Обладнання
1	Сталь 28Х3СНМВФА (СП28; ЭП326А) після прокатки	860	1000	0,09	8,2×40	30	3, 6, 9	Кафедра «ММК і ПМ» ДонДТУ (м. Алчевськ)
2	Сталь 28Х3СНМВФА (СП28; ЭП326А) термозміцнена	1170	1500	0,08	8,2×30,8	30		
3	ВСт2кп	310	397	0,22	4,9×190	0,6		
4	Сталь 20пс	351	413	0,14	4×190	0,6		
5	Сталь 20пс	277	399	0,11	3×190	0,6	1, 3	Кафедра «М і ПФ» ДДМА (м. Краматорськ)
6	Сплав алюмінієвий Д16Т (АА2024-Т3)	346	454	0,15	2×190	0,6		
7	Сплав алюмінієвий Д16Т (АА2024-Т3)	346	454	0,15	2×21,8	1,22		Кафедра «АММ і О» ДДМА (м. Краматорськ)
8	ВСт2кп	202	385	0,34	1×26,2	1,22	5	

Як приклад на рис. 6.4 представлені експериментальні залежності сили розрізання в часі при розрізанні сталі 28Х3СНМВФА (СП28; Е816А) в стані після прокатки, при кутах нахилу ножа 3, 6 і 9°. Як можна бачити з рис. 6.4 сталій процес спостерігається тільки у випадках нахилу ножа 6 і 9°, що пояснюється малою шириною заготовок, оскільки вона була обмежена з метою виключення перевантаження ножиць.

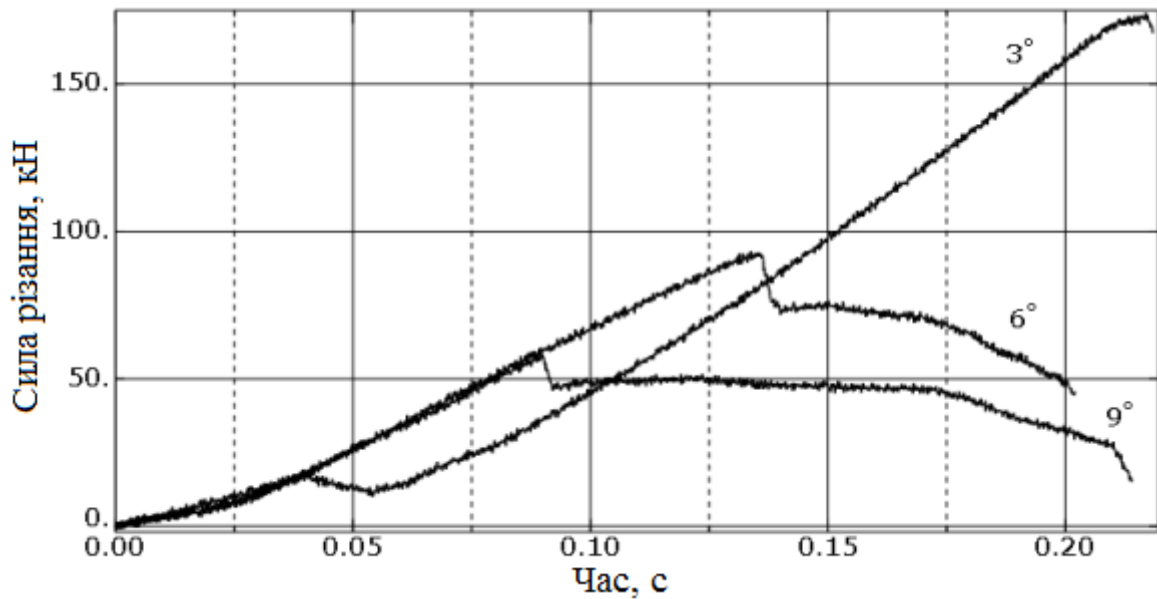


Рисунок 6.4 – Експериментальні залежності сили розрізання, отримані при розрізанні сталі 28Х3СНМВФА (СП28; Е816А) в стані після прокатки при різних кутах нахилу ножів

Також для прикладу на рис. 6.5 представлені експериментальні залежності сили розрізання в часі при розрізанні сталі ВСт2кп при куті 5° і різній ширині відрізуваної полоси (кромки).

З рис. 6.5 можна бачити, що збільшення ширини відрізуваної полоси призводить к зростанню сили розрізання до 10%, що пояснюється зростанням витрат необхідних на її відгинання. Причому це зростання поступово приходить до свого максимуму, оскільки осередок відгинання має обмеження в розмірі. Крім того, слід зазначити, що як і в попередньому випадку на початковому етапі процесу має місце сплеск по відношенню до сталого стану. Величина даного сплеску коливається в межах 15...25% по відношенню до сталого стану.

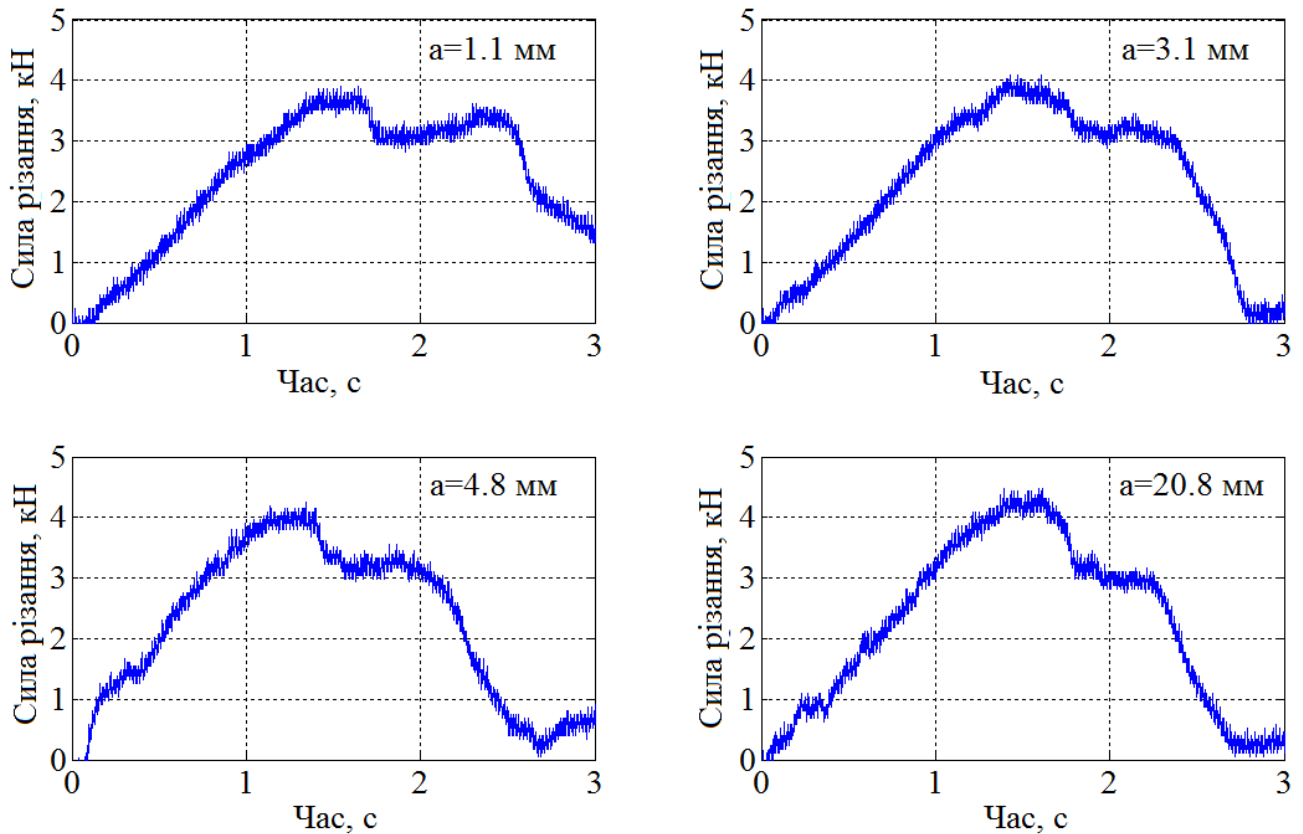


Рисунок 6.5 – Експериментальні залежності сили розрізання, отримані при розрізанні сталі ВСт2кп при куті нахилу ножа 5° і різній ширині відрізуваної полоси

Аналогічні ефекти були отримані при розрізанні на гідравлічних пресножицях, як з гільйотинним, так і з шевронним (результати наведені нижче в п. 6.1.3), ножем.

Порівняльний аналіз сили розрізання отриманої експериментально і в симуляціях МСЕ показав, що коефіцієнт кореляції в даних випадках склав $0,854...0,976$.

В якості порівняння на рис. 6.6 наведені експериментальна і за результатами симуляції МСЕ залежність сили розрізання на прикладі розрізання заготовки з алюмінієвого сплаву Д16Т (AA2024-T3) (див. табл. 6.3) при куті нахилу ножа 5° і ширині відрізуваної кромки 4 мм. Як можна бачити обидві залежності досить добре узгоджуються, а коефіцієнт кореляції в даному випадку склав $0,897$.

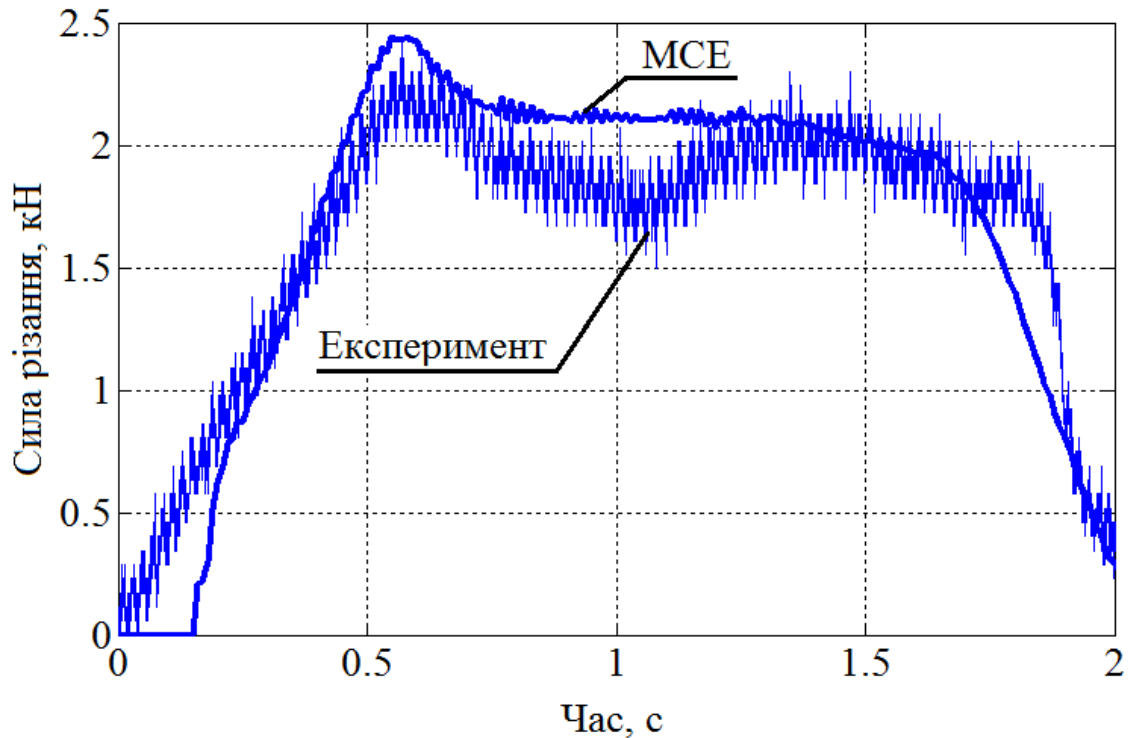


Рисунок 6.6 – Порівняння експериментальних даних і результатів моделювання МСЕ на прикладі розрізання заготовки з алюмінієвого сплаву Д16Т (AA2024-T3) (див. табл. 6.3) при куті нахилу ножа 5° і ширині відрізуваної кромки 4 мм

На рис. 6.7 проілюстровано порівняння експериментальних даних і результатів симуляції МСЕ за максимальним значенням сили розрізання в залежності від ширини відрізуваної кромки на прикладі розрізання заготовок (див. табл. 6.3) з алюмінієвого сплаву Д16Т (AA2024-T3) і сталі ВСт2кп при куті нахилу ножа 5° .

Як можна бачити, результати моделювання МСЕ (на рис. 6.7 показані суцільною лінією) досить добре відтворюють результати натурних експериментів. Зокрема коефіцієнт кореляції для сталі ВСт2кп склав 0,9384, а для алюмінієвого сплаву Д16Т (AA2024-T3) 0,9545.

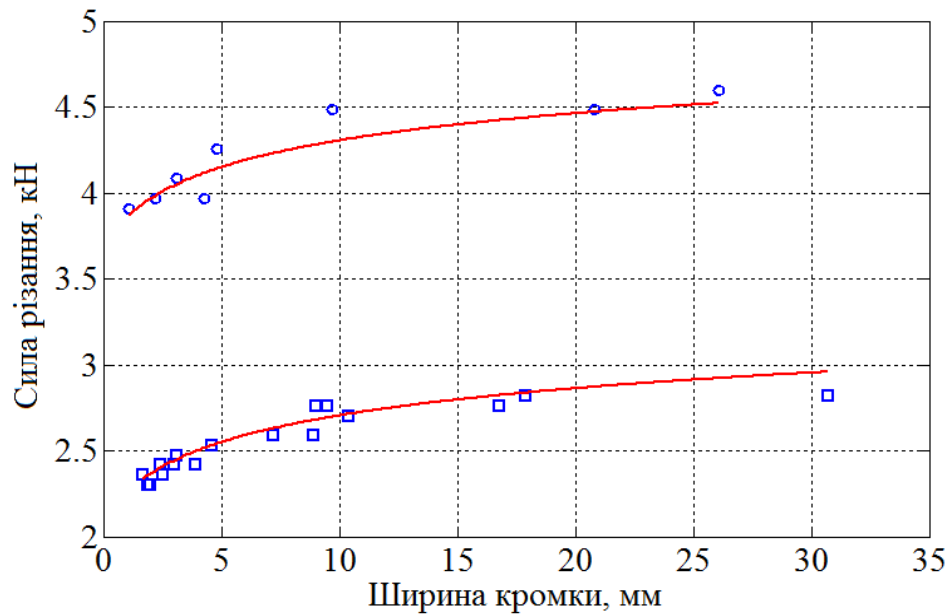


Рисунок 6.7 – Порівняння експериментальних даних і результатів моделювання МСЕ за максимальним значенням сили розрізання в залежності від ширини відрізуваної полоси на прикладі розрізання заготовок (див. табл. 6.3) з алюмінієвого сплаву Д16Т (АА2024-Т3) (□) і сталі ВСт2кп (о) при куті нахилу ножа 5°

6.1.3 Поперечне розрізання шевронними ножами

Як зазначалося в пункті 4.2.1 практика застосування шевронного ножа показала наявність дефекту в вигляді «галочки» (або «будиночок»), який формується на відрізуваній частині, що розташована під шевронним ножем (див. рис. 4.19).

Для вивчення даного явища були розроблені СЕ моделі і отримані теоретичні рішення, спрямовані на зниження даного дефекту, а для оцінки достовірності та ефективності даних рішень були виконані експериментальні дослідження.

Експериментальні дослідження проводилися в рамках договору про співпрацю між Донбаською державною машинобудівною академією (м. Краматорськ, Україна) і ПрАТ "НКМЗ" (м. Краматорськ, Україна) [382].

В якості експериментальної установки використовували лабораторні пресножиці поперечного розрізання листового металопрокату кафедри «Механіки та

пластичного формування» ДДМА (див. підрозділ 2.3). Реалізація процесу розрізання прес-ножицями здійснювалася на гідравлічному пресі кафедри.

В якості досліджуваних зразків використовували пластини товщиною 3, 4 і 5 мм, шириною 380 мм. Хімічний склад і механічні властивості розрізуваних зразків представлені в таблиці 6.4.

Таблиця 6.4 – Хімічний склад и механічні Властивості розрізуваних зразків

Товщина пластини, h, мм	Хімічний склад, %								Механічні властивості		
	C	Mn	Si	Cr	Ni	Cu	P	S	$\sigma_{0,2}$, МПа	σ_b , МПа	δ_5 , %
3	0,20	0,53	0,11	0,05	0,02	0,02	0,030	0,027	277	399	11
4	0,18	0,53	0,11	0,05	0,03	0,06	0,021	0,024	351	413	14
5	0,13	0,3	0,2	0,03	0,02	0,03	0,012	0,019	310	397	22

В ході реалізації експерименту від пластин відрізали смуги шириною 22 мм при швидкості руху супорта 0,6 мм/с, використовуючи ножі двох типів (рис. 6.8).

Ножі I типу виконували з нахилом різальних кромek ножа на кут 3° без заокруглення і з заокругленням 200, 400 і 800 мм, а також з нахилом різальних кромek ножа на кут 1° без заокруглення. Ножі II типу виконували з нахилом різальних кромek ножа на кут 3° без заокруглення і з заокругленням 100 і 400 мм, а також з нахилом 1° без заокруглення.

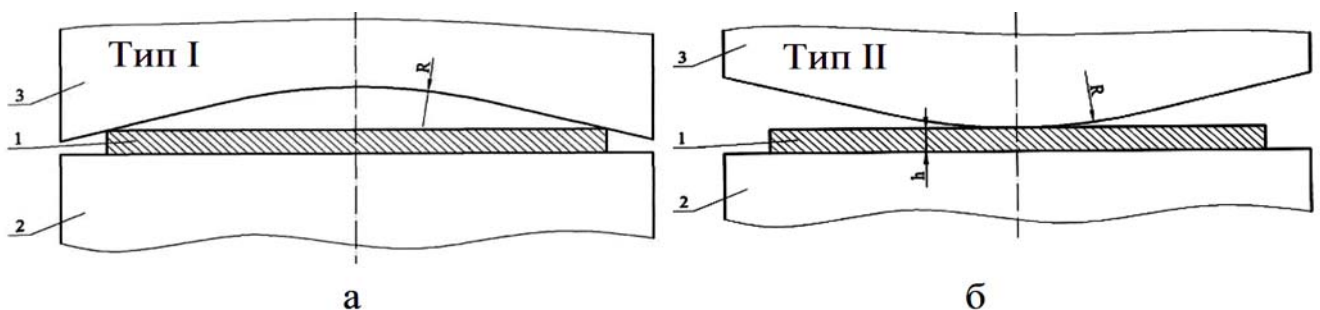


Рисунок 6.8 – Конфігурації виконання ножів при реалізації експерименту

В результаті проведення експерименту отримували результуючі залежності сили розрізання шляхом складання показань двох паралельно встановлених месдоз, а геометрію відрізуваних смуг отримували шляхом сканування профілю по поверхні зрізу. На рис. 6.9, на прикладі пластин товщиною 5 мм порізаних ножами I і II типів з кутом нахилу різальних кромок 3° без заокруглення представлені залежності сили розрізання (рис. 6.9, а), а також загальний вигляд відрізаних смуг (рис. 6.9, б) і їх скановані профілі (рис. 6.9, в).

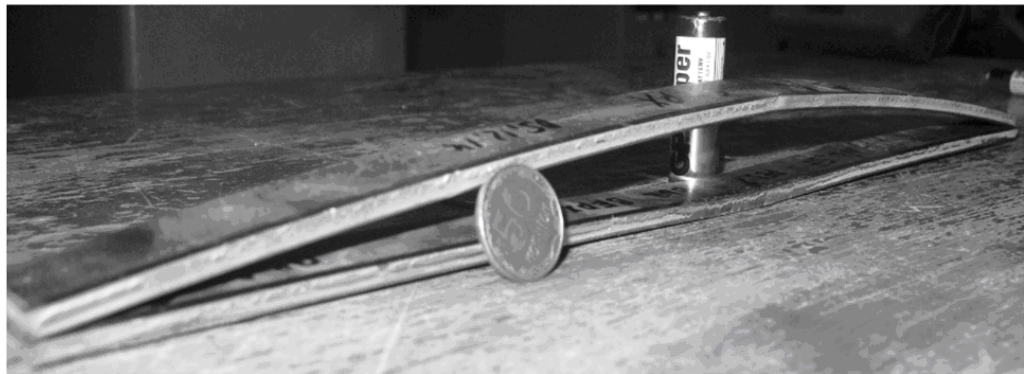
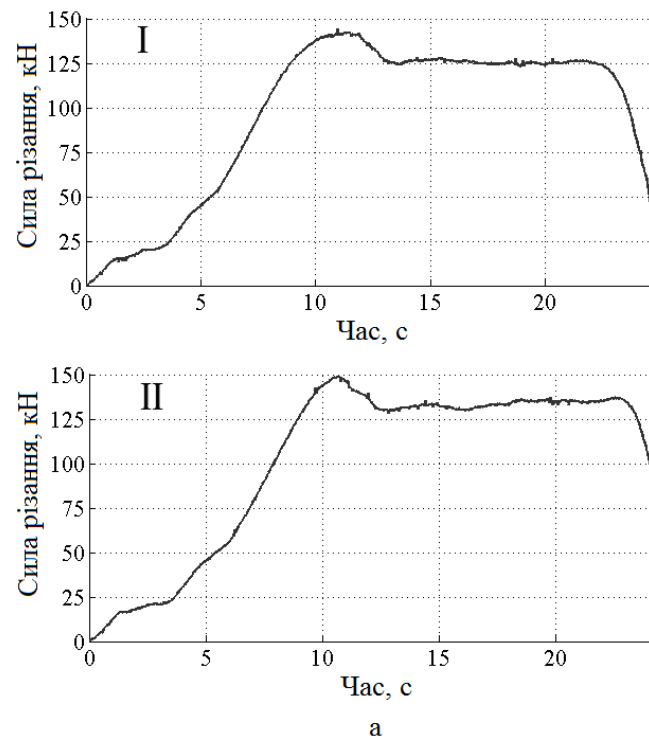
З зображень (див. рис. 6.9, б і в), можна бачити, що застосування шевронного ножа II-го типу, дозволяє істотно (з 19,8 мм до 2,4 мм) знизити залишкову деформацію (прогин) смуги (Y) після розрізання.

Проте, як впливає з графіків сили розрізання (рис. 6.9, а), має місце деяке її збільшення (до 10%) при використанні шевронного ножа II-го типу, але це не є критичним з точки зору навантаження на ножиці, хоча і потребує врахування при розрахунках навантажень на ножиці за умови застосування ножів цієї конструкції.

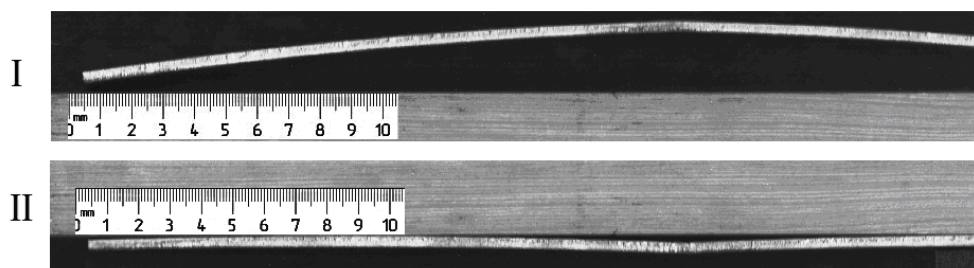
При цьому слід зазначити, що майже таку саму величину залишкової деформації можна отримати, якщо використовувати ножі класичної форми (тип I без заокруглення) з нахилом різальних кромок ножа на кут 1° , проте сила розрізання при цьому зростає в 2...2,5 рази. Більш того, при використанні ножів типу II з нахилом різальних кромок 1° , було отримано майже 2-х кратне зниження залишкової деформації при близькому значенні сили розрізання до ножа I-го типу.

Вплив радіуса заокруглення в вершині сходження різальних кромок ножа, на співвідношення максимальної сили розрізання F_{\max} до сталого стану F_{ss} , а також відношення залишкової деформації смуги Y до товщини листа h представлені на рис. 6.10.

Аналізуючи залежності, представлені на рис. 6.10, можна констатувати, що для ножів обох типів при збільшенні радіуса заокруглення зростає максимальне значення сили розрізання, при цьому її відношення до сили сталого стану практично не залежить від типу ножа.



б



в

Рисунок 6.9 – Залежності сили розрізання (а), а також загальний вигляд відрізаних смуг (б) і їх скановані профілі (в) на прикладі пластин товщиною 5 мм порізаних ножами I і II типів з кутом нахилу різальних крамок 3° без заокруглення

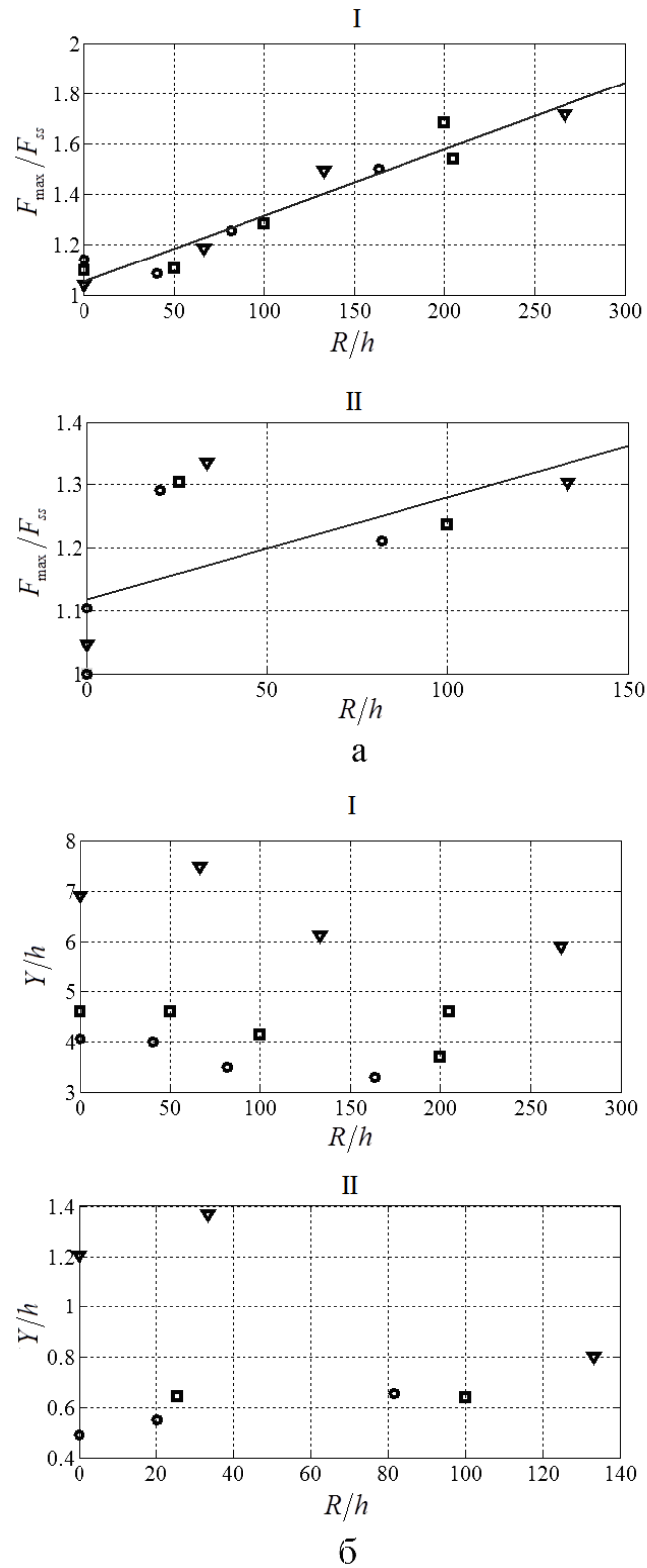


Рисунок 6.10 – Вплив відношення радіусу R заокруглення в вершині сходження різальних краєк до товщини листа h , для ножів I і II типу, на співвідношення максимальної сили розрізання F_{\max} до сталого стану F_{ss} (а), а також відношення залишкової деформації смуги Y до товщини листа h (б), при розрізанні листів товщиною 3 (▽), 4(□) і 5(о) мм

У той же час із збільшенням радіуса заокруглення для І-го типу ножа можна спостерігати зниження залишкової деформації смуги, проте з урахуванням зростання максимальної сили, абсолютна величина прогину залишається незрівнянно більшою по відношенню до ІІ-го типу ножа. Окрім того, досить складно з представлених експериментальних даних для ІІ-го типу ножа дати оцінку впливу радіуса заокруглення на залишкову деформацію смуги, що цілком зрозуміло, оскільки в п. 4.2.1 на базі теоретичних досліджень було встановлено, що залишкова деформація в набагато більше залежить від ширини листа і границі міцності розрізуваного матеріалу (в умовах даного експерименту ширина розрізуваних листів була взята однаковою, а границя міцності мала малий розкид для істотного впливу).

Узагальнюючи отримані результати можна зробити наступні висновки:

- шевронний ніж з увігнутим (класичним) розташуванням похилих поверхонь ножа при наявності заокруглення профілю в вершині їхнього сходження сприяє зменшенню залишкової деформації, проте ефективність такого рішення досить мала, оскільки супроводжується майже 100% збільшенням максимальної сили розрізання при зниженні залишкової деформації лише до 25%;

- шевронний ніж з вигнутим (модифікованим) розташуванням його похилих поверхонь з можливим заокругленням профілю в вершині їхнього сходження є більш ефективним, оскільки за інших рівних умов в порівнянні з класичною конструкцією ножа дозволяє знизити залишкову деформацію на 60...85%, при одночасному зростанні максимальної сили розрізання не більше 10...15%;

- ефективно зниження залишкової деформації досягається за рахунок різних показників напруженого стану η , оскільки при використанні ножів І типу розрізання листа відбувається від його країв до центру тобто відрізувана частина за рахунок сил тертя наче стискається з боків, а при ІІ типі ножів – розтягується, бо розрізання відбувається від центру до країв. Таким чином, маємо $\eta_I < \eta_{II}$, а відповідно до діаграми пластичності (див. рис. 3.6) отримаємо $\bar{\epsilon}_{fI}^{pl} > \bar{\epsilon}_{fII}^{pl}$, тобто для руйнування потрібна більша пластична деформація.

6.2 Результати експериментальних досліджень процесів поперечного розрізання сортового металопрокату

6.2.1 Результати лабораторних експериментальних досліджень гарячого розділення квадратної і круглої заготовок паралельними і фасонними ножами

Для оцінки адекватності розроблених СЕ моделей процесів гарячого розділення квадратної (див. підрозділ 4.1.2) і круглої заготовок, що характеризують розподіл сили розрізання і формоутворення в гарячому стані, була проведена серія лабораторних дослідів на експериментальних установках (див. підрозділ 2.3):

- кривошипно-шатунні ножиці кафедри «Автоматизовані металургійні машини та обладнання» ДДМА (м. Краматорськ)
- кривошипно-шатунні ножиці з паралельним розташуванням супортів кафедри «Машини металургійного комплексу» ДонДТУ (м. Алчевськ).

В умовах кафедри «Автоматизовані металургійні машини та обладнання» ДДМА враховуючи робочий діапазон температур при розділенні квадратних заготовок, в якості матеріалу використовували сплави свинця з сурмою [383, 384].

В ході проведення експерименту різали зразки квадратного перерізу 8×8 і $10,2 \times 10,2$ мм двома способами (див. рис. 2.12, г): в першому випадку розрізання проводилося паралельними ножами; у другому – різали фасонними трикутними ножами.

Результати вимірювання експериментальних сил розрізання квадратних заготовок для паралельних і фасонних ножів представлені на рис 6.11.

Крім того, з метою розширення уявлення про формоутворення площині зрізу проводили розрізання заготовок круглого поперечного перерізу. Діаметр круглої заготовки – $\varnothing 11,6$ мм був обраний рівним площі перерізу квадратної заготовки $10,2 \times 10,2$ мм.

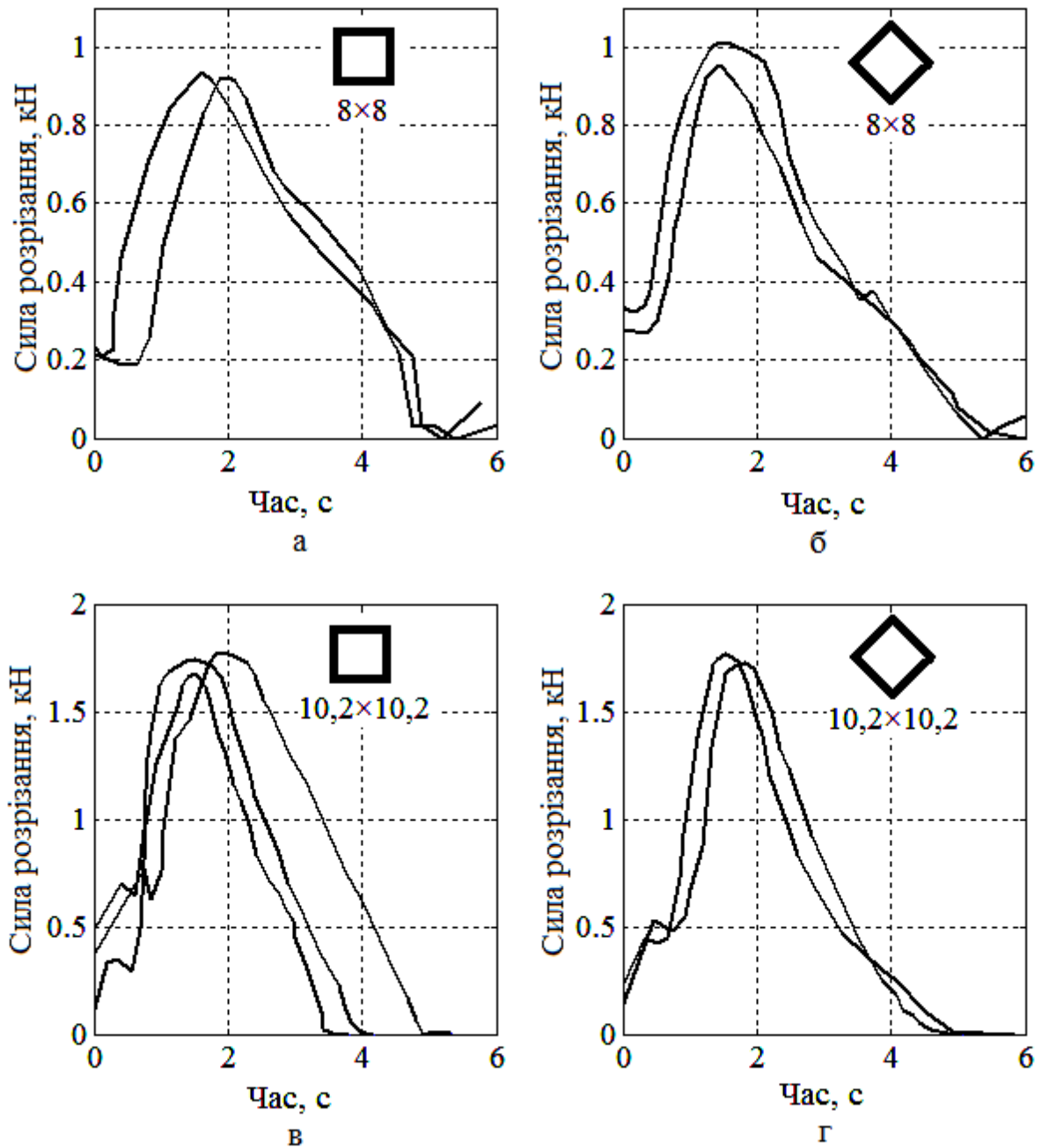


Рисунок 6.11 – Осцилограми вимірювання сили розрізання паралельними (а, в) і фасонними-кутовими (б, г) ножами квадратних заготовок з поперечним перерізом 8×8 (а, б) і $10,2 \times 10,2$ мм (в, г)

Результати вимірювання експериментальних сил розрізання заготовок круглого поперечного перерізу – $\varnothing 7,8$ і $\varnothing 11,6$ мм фасонними (дуговими) ножами представлені на рис. 6.12.

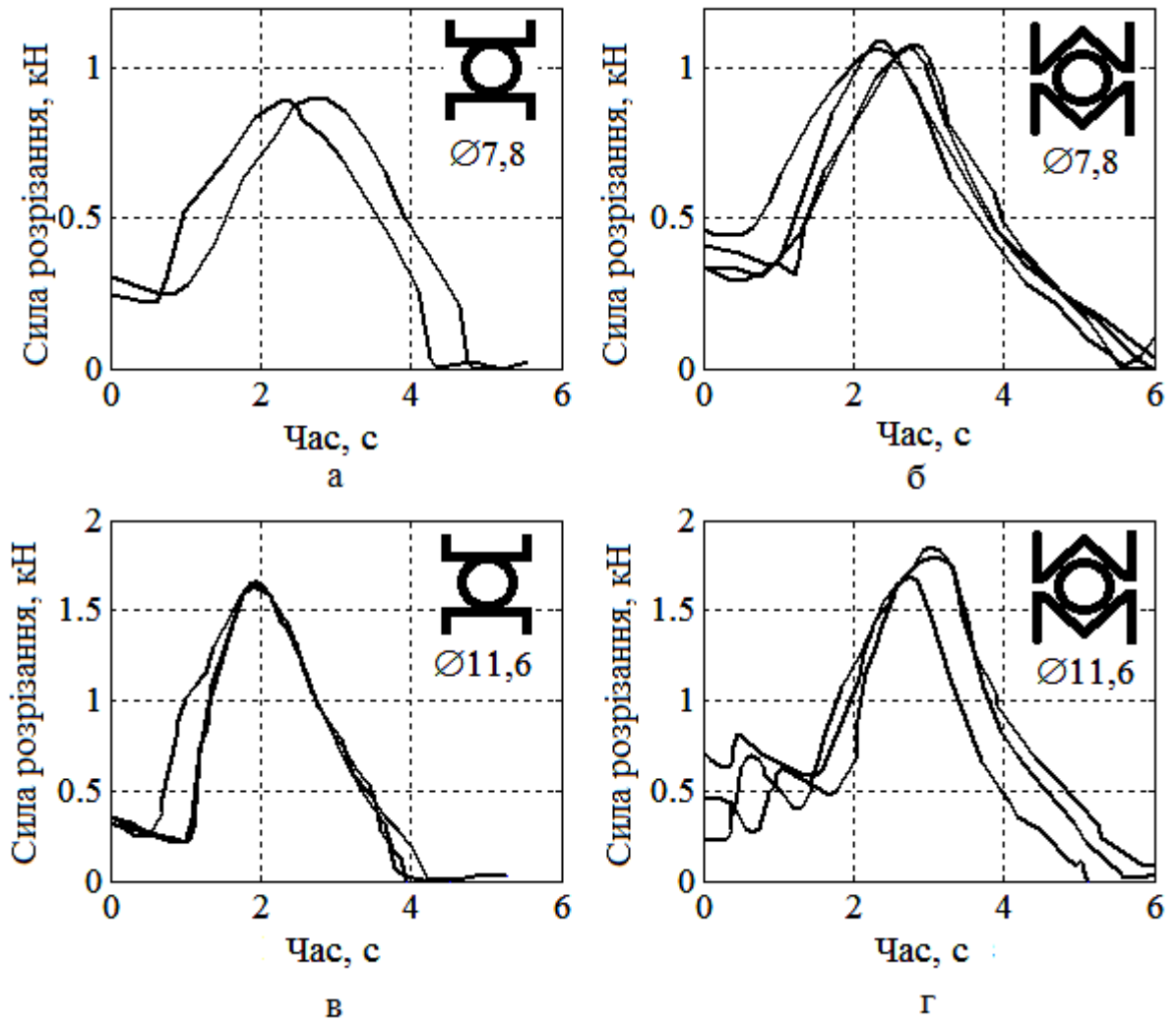


Рисунок 6.12 – Осцилограми вимірювання сили розрізання паралельними (а, в) і фасонними-кутовими (б, г) ножами круглих заготовок $\varnothing 7,8$ (а, б) і $\varnothing 11,6$ (в, г) мм

Щодо питання формоутворення на рис. 6.13 представлені скановані зображення поверхні зрізу квадратної $10,2 \times 10,2$ мм і круглої $\varnothing 11,6$ мм заготовки.

При дослідженнях в умовах кафедри «Машини металургійного комплексу» ДонДТУ використовували квадратні експериментальні зразки зі сплаву свинця з сурмою 12×12 мм і сталеві 10×10 мм зі сталей А36 і 28Х3СНМВФА.

Розрізання сталевих зразків здійснювали при температурі 800°C з попереднім нагріванням в електричній муфельній печі. Контроль температури в камері печі був реалізований за допомогою хромель-алюмелевої термопари.

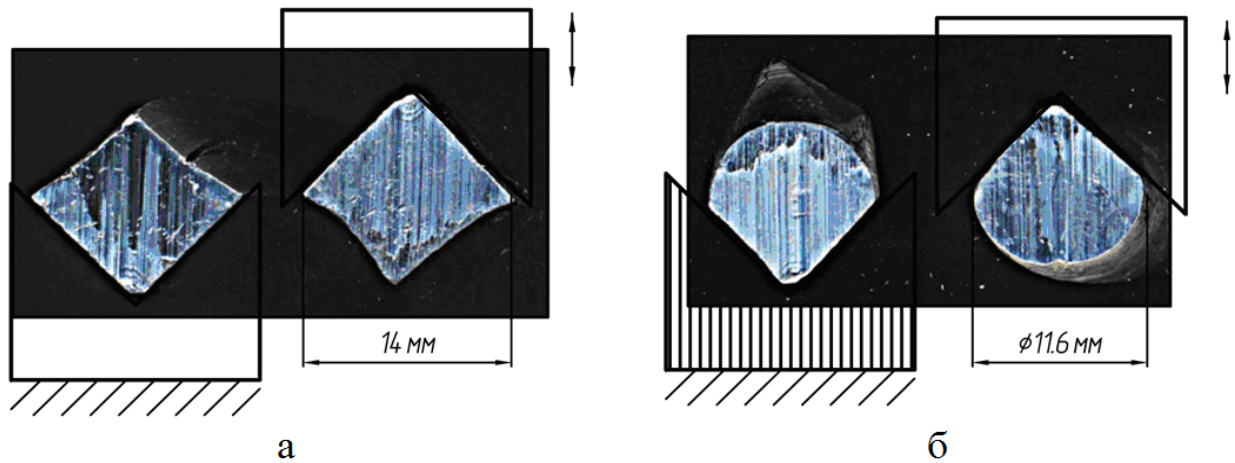


Рисунок 6.13 – Скановані зображення поверхні зрізу квадратної (а) і круглої (б) заготовки після розділення фасонними ножами

Експериментальні залежності сили розрізання представлені на рис. 6.14.

Коефіцієнт кореляції експериментальних даних з результатами симуляцій МСЕ становив понад 0,88.

Отримані в результаті залежності сил розрізання показують, що при застосуванні фасонних ножів в порівнянні з паралельними ножами максимальне значення сил розрізання збільшується на 3...1%, тоді як час здійснення процесу зменшується на 10...30%. Отже загальна кількість затрачуваної роботи на розділення зменшується. Опосередковано, про це також свідчить кінцева форма поверхні зрізу, оскільки вона зазнає меншого спотворення початкової форми, а відповідно і менших енерговитрат при розділенні, з цим пов'язаних.

6.2.2 Результати лабораторних експериментальних досліджень холодного розділення квадратних, круглих і фасонних заготовок

З метою розширення уявлень про процес холодного розділення профільованого металопрокату і оцінки відповідних СЕ математичних моделей (див. розділ 4), проводили експериментальні дослідження процесу холодного розрізання фасонних профілів з алюмінієвого сплаву АА6066-Т6.

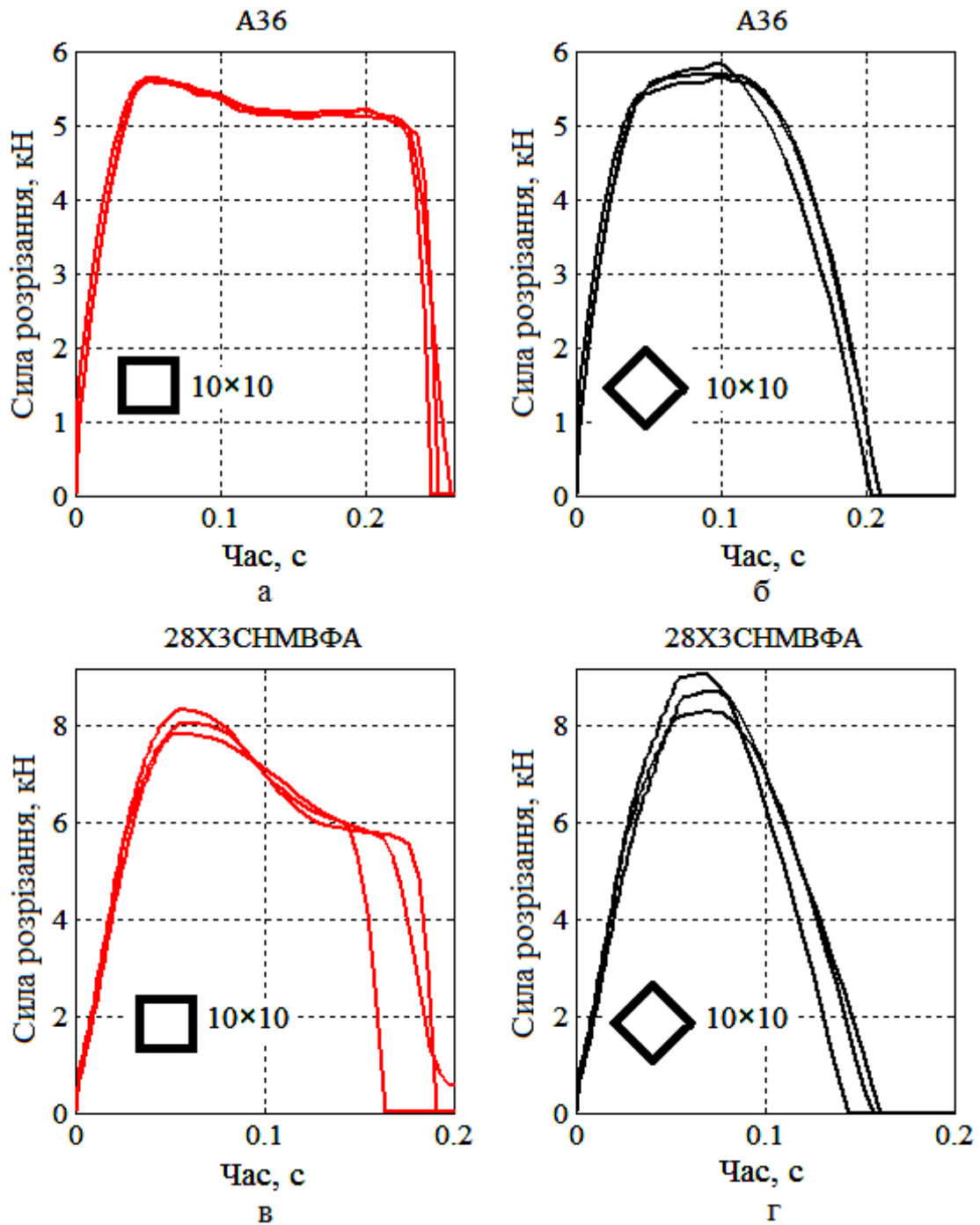


Рисунок 6.14 – Експериментальні залежності сили розривання квадратних зразків 10×10 мм зі сталей А36 (а, б) і 28Х3СНМВФА (в, г) при температурі 800°C паралельними (а, в) і кутовими (б, г) ножами

Матеріал мав наступні механічні властивості: $\sigma_{0,2} = 360$ МПа, $\sigma_b = 395$ МПа, $\delta = 0,18$. Форма профілів і їх геометричні розміри представлені в таблиці 6.5.

Таблиця 6.5 – Форма профілів розрізуваних на ножицях, і їх геометричні розміри

Профіль	Номінальний розмір, мм					Площа перерізу, мм ²
	Висота	Діаметр	Ширина	Товщина		
				стінки	полиці	
Квадрат	10	–	10	–	–	100
Круг	–	12	–	–	–	113,097
Швелер	10	–	20	1,75	1,75	63,875
Кутикрівнобокий	25	–	25	1,9	1,9	91,39

Розрізання фасонних профілів в холодному стані здійснювали на лабораторній установці кривошипно-шатунних ножиць (див. підрозділ 2.3) з паралельним розташуванням супортів кафедри «Машини металургійного комплексу» ДонДТУ (м. Алчевськ). Для розрізання зазначених заготовок були виготовлені спеціальні профільовані ножі (див. рис. 2.2).

В ході дослідження фіксували величину сили розрізання (рис. 6.15) і переміщення ножів в функції часу, що дозволило отримати залежність сили розрізання від відносного зсуву ножів по відношенню до найбільшого початкового перерізу.

В цілому результати експериментальних досліджень досить добре узгоджуються з розробленими СЕ моделями. Зокрема коефіцієнт кореляції між експериментальними кривими і отриманими при симуляціях МСЕ склав $R=0,856\dots 0,978$.

З метою оцінювання адекватності формоутворення розроблених СЕ моделей, здійснювали процес розділення круглого профілю ножами різної форми.

Також аналізували поверхню зрізу з метою оцінки впливу умов деформації на відносне проникнення до сколювання і отримання додаткової інформації, що дозволяє уточнити цей параметр і підвищити точність вироблюваних розрахунків енергосилових параметрів процесів розділення фасонних профілів на ножицях.

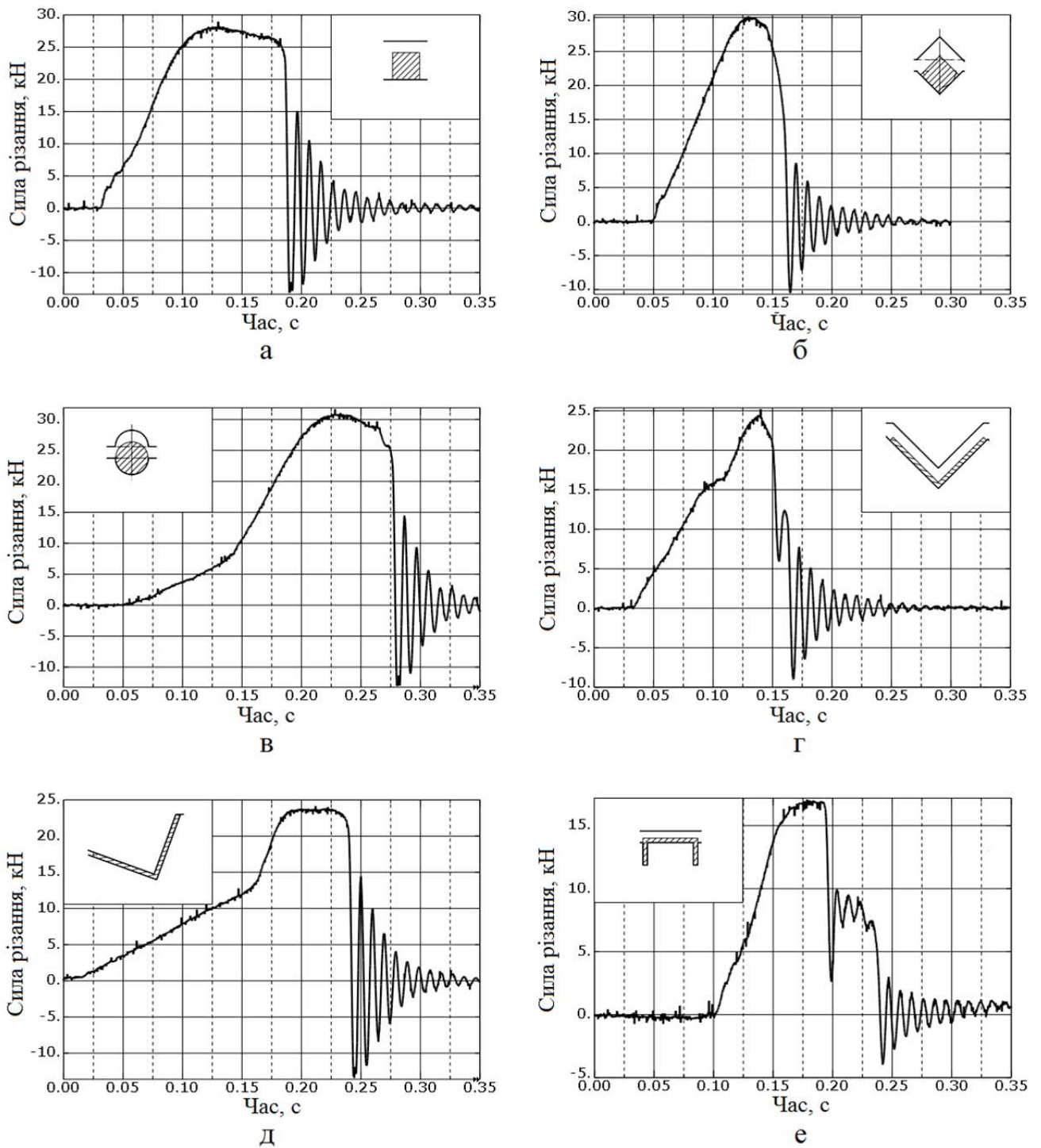


Рисунок 6.15 – Типові осцилограми сили розрізання в часі при розділенні квадрату паралельними (а) і фасонними кутовими (б) ножами, кола фасонними ножами (в), рівнобокого кутика розташованого симетрично в V-подібному положенні (г) і повернутого відносно осі симетрії на 25° (д), а також швелера (е)

Слід вказати, що ступінь проникнення до сколювання залежить від товщини розрізаного перерізу металу [266] та НДС в осередку розрізання, про що свідчать залежності сили розрізання квадратної заготовки паралельними (див. рис. 6.15, а) і кутовими (див. рис. 6.15, б) ножами, оскільки при розділенні заготовки на кут максимальна висота збільшується в 1,41 рази, проте тривалість операції скорочується майже на 20%, при незначному (до 5%) зростанні сили розрізання.

З метою вивчення даного явища, був проведений аналіз зрізів різних заготовок розрізаних ножами різної конфігурації.

На рис. 6.16 представлені типові перерізи, отриманих після розділення квадратних заготовок (10×10 мм) паралельними і фасонними (по діагоналі) ножами, а на рис. 6.17 – зображення перерізів круглих заготовок (Ø12 мм) після розділення фасонними дуговими, паралельними і фасонними кутовими ножами.

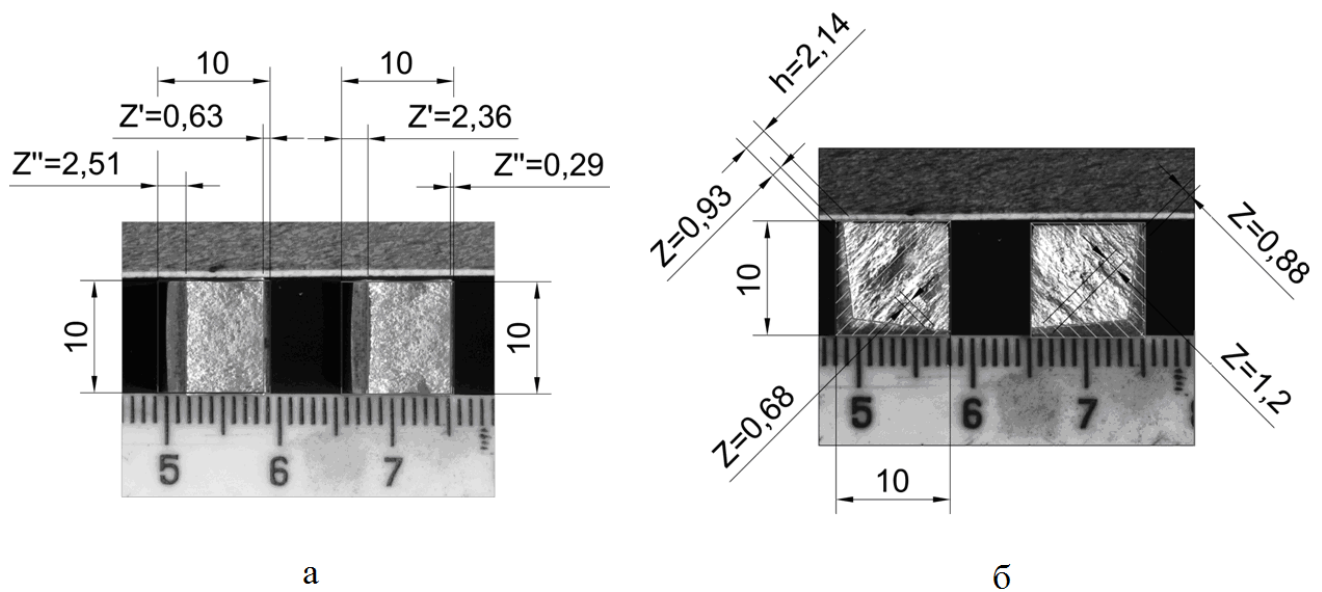


Рисунок 6.16 – Зображення перерізів заготовок (квадрат 10×10 мм) після розділення паралельними (а) ножами (розгорнуті на 90°) і фасонними (б) ножами із зазначенням абсолютної величини вминання $z = z' + z''$

На поверхні зрізу можна виділити зони: вминання (зміна форми вихідного перерізу), власне зрізу (затемнена зона на фото зрізу) і сколювання (світліша час-

тина). При цьому (див. рис. 6.16, б та 6.17), величина вмивання ножів в метал при зміні вихідної висоти перерізу також змінюється.

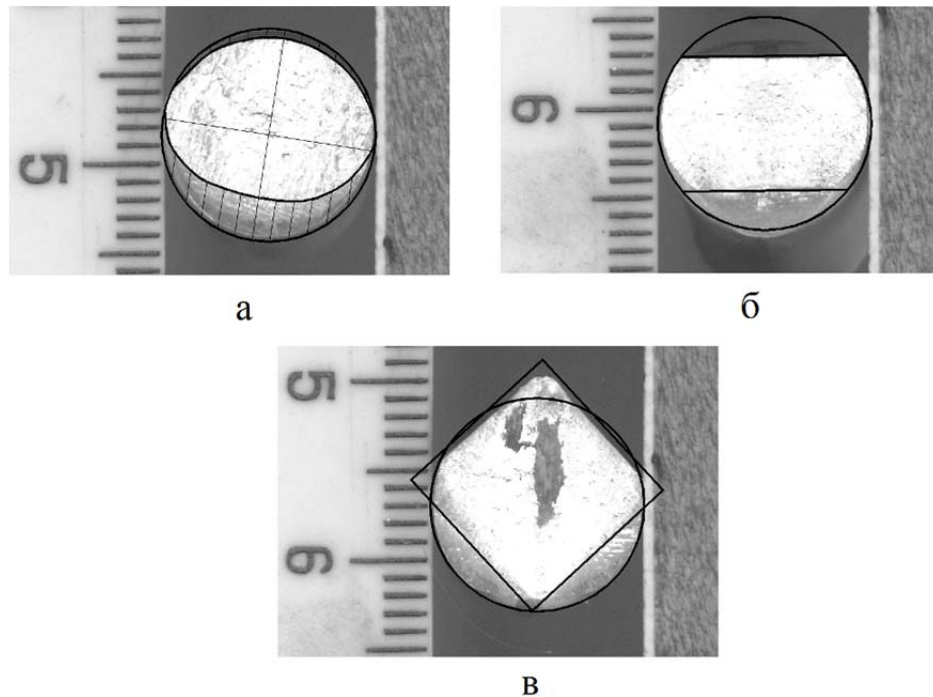


Рисунок 6.17 – Зображення перерізів круглих заготовок ($\varnothing 12$ мм) після розділення фасонними дуговими (а), паралельними (б) і фасонними кутовими (в) ножами

Крім того, величина вмивання менша величини відносного проникнення до сколювання, коли відбувалося повне розділення заготовки на дві частини. Вочевидь, що після проходження зони вмивання в металі зароджується тріщина, яка протягом певного проміжку часу зростає, а повне розділення відбувається згодом.

При визначенні на різних за висотою ділянках відносної величини проникнення до сколювання аналізували зрізи (див. рис. 6.16, б і 6.17, а), котрі мають різну висоту по перерізу заготовок.

На рис. 6.18 представлені відповідні експериментальні значення відносного проникнення до сколювання по перерізу заготовок при розділенні квадратної заготовки паралельними і кутовими ножами, а також круглої заготовки дуговими ножами.

Як можна бачити з представлених розподілів має місце чітка тенденція до збільшення відносного проникнення до сколювання при зменшенні висоти вихідного перерізу.

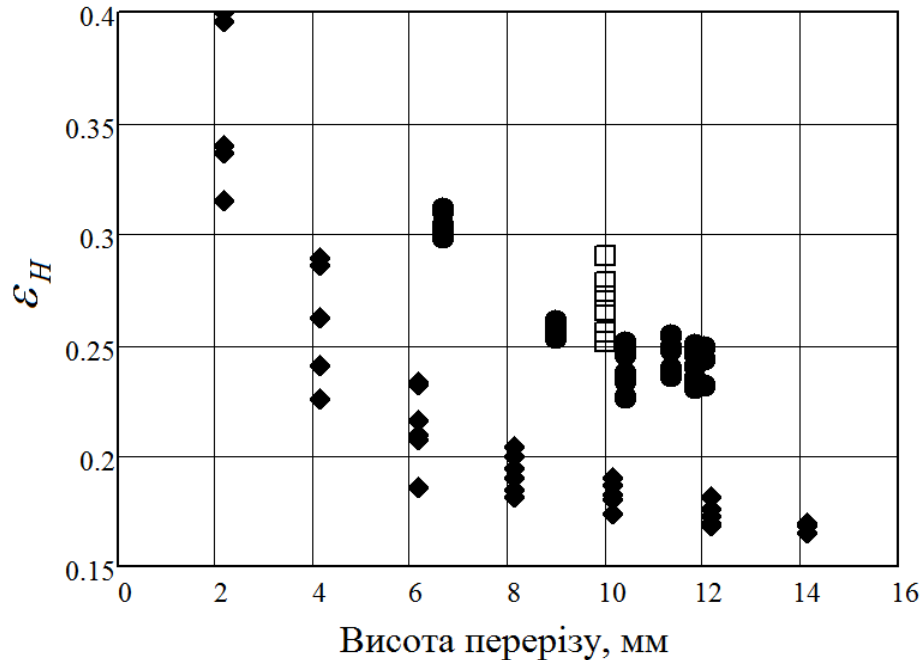


Рисунок 6.18 – Експериментальні значення відносного проникнення до сколювання по перерізу заготовок при розділенні квадратної заготовки паралельними (□) і кутовими (◆) ножами, а також круглої (●) заготовки дуговими ножами

При цьому, в кожному з трьох представлених випадків, величина відносного проникнення до сколювання при рівних висотах вихідного перерізу може відрізнятися.

Так, наприклад, при початковій висоті перерізу 10 мм (див. рис. 6.18) найбільше значення відносного проникнення до сколювання має місце при розділенні квадратної заготовки паралельними ножами, а при розділенні круглої заготовки дуговими ножами величина стає трохи нижчою, і, нарешті, ще менше значення відносного проникнення до сколювання спостерігається при розділенні квадратної заготовки кутовими ножами.

Вочевидь, поясненням можуть служити відмінності в НДС відповідного перерізу заготовки, зокрема обумовлені кутом нахилу твірної ножа до горизонталі. Так при розрізанні паралельними ножами кут складає 0° , при розрізанні кола дуговим ножом при зазначеній висоті перерізу кут становить $33,57^\circ$, а при розрізанні квадрата кутовими ножами – 45° . Крім того, в першому і останньому випадках кут постійний по всьому перерізу, а для круга – змінний по ширині перерізу.

На додаток до сказаного на рис. 6.19 представлені фото поверхонь зрізу при розділенні кутика рівнобокого в симетричному (рис. 6.19, а) і повернутому (б) відносно осі на 25° положеннях, а також швелера.

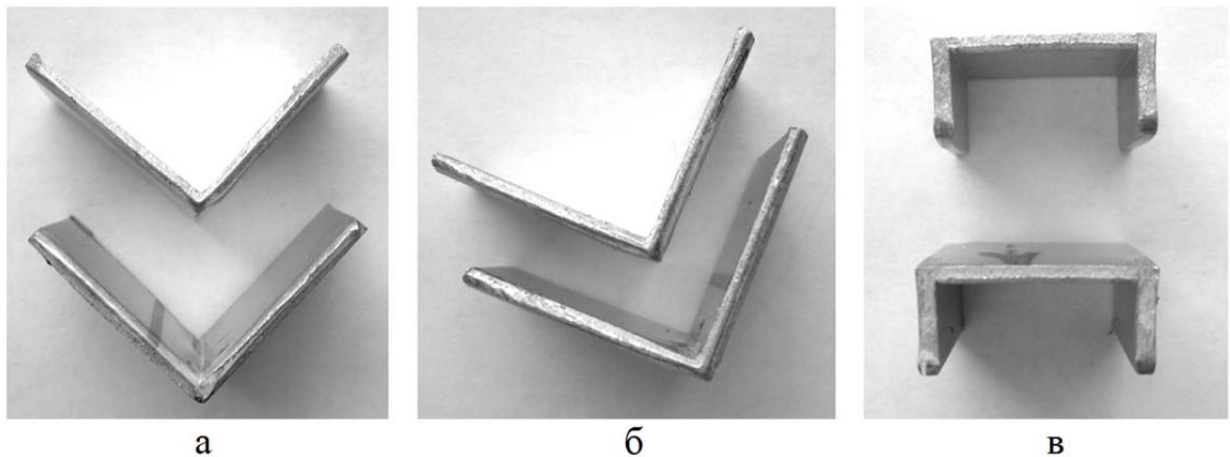


Рисунок 6.19 – Зображення поверхні зрізу при симетричному (а) розділенні і при повороті на 25° відносно осі (б) рівнобокого кутика, а також швелера (в)

Представлені зображення, а також експериментальні залежності сили розрізання (див. рис. 6.15) підтверджують вплив взаємного розташування різальних кромки на відносне проникнення до сколювання.

Узагальнюючи отримані результати, можна стверджувати, що результати експериментальних досліджень в значній мірі узгоджуються з розробленими СЕ математичними моделями, які в свою чергу можуть бути використані для подальшого аналізу і розробки практичних рекомендацій, спрямованих на вдосконалення методик розрахунку, а також технічних і технологічних аспектів реалізації процесу.

6.3 Результати експериментальних досліджень процесів поздовжнього розрізання листового металопрокату

6.3.1 Дослідження кінематичних і енергосилових параметрів процесу поздовжнього розрізання дисковими ножами в гарячому стані

Дане дослідження мало на меті оцінку адекватності розроблених СЕ математичних моделей і підтвердження їх основних результатів і положень.

Процес поздовжнього розрізання товстих листів дисковими ножами здійснюється як в гарячому, так і в холодному станах на ножицях однакової конструкції і основні кінематичні та енергосилові параметри справедливі в обох випадках.

Для експериментальних досліджень процесу гарячого розрізання [385] використовували однопарні дискові ножиці (див. підрозділ 2.3) кафедри «Машини металургійного комплексу» ДонДТУ (м. Алчевськ). На яких різали пластини товщиною 8, 10 і 12 мм зі сплаву свинця з сурмою. При цьому фіксували (рис. 6.20) моменти розрізання на верхньому і нижньому ножах, а також переміщення пластини в часі.

Швидкість руху пластини визначали шляхом диференціювання функції переміщення по часу методом центральних скінченних різниць [349].

Потім визначали співвідношення моментів верхнього M_1 і нижнього M_2 ножів та будували залежність швидкості руху пластини від нього. Аналіз отриманих результатів показав, що зі збільшенням співвідношення моменту верхнього ножа до нижнього спостерігається зниження швидкості руху пластин, що добре узгоджується з результатами СЕ чисельного моделювання процесу розрізання товстих листів дисковими ножами (див. підрозділ 5.1) та свідчить про збільшення сили зовнішнього опору, як це було показано в роботі [276].

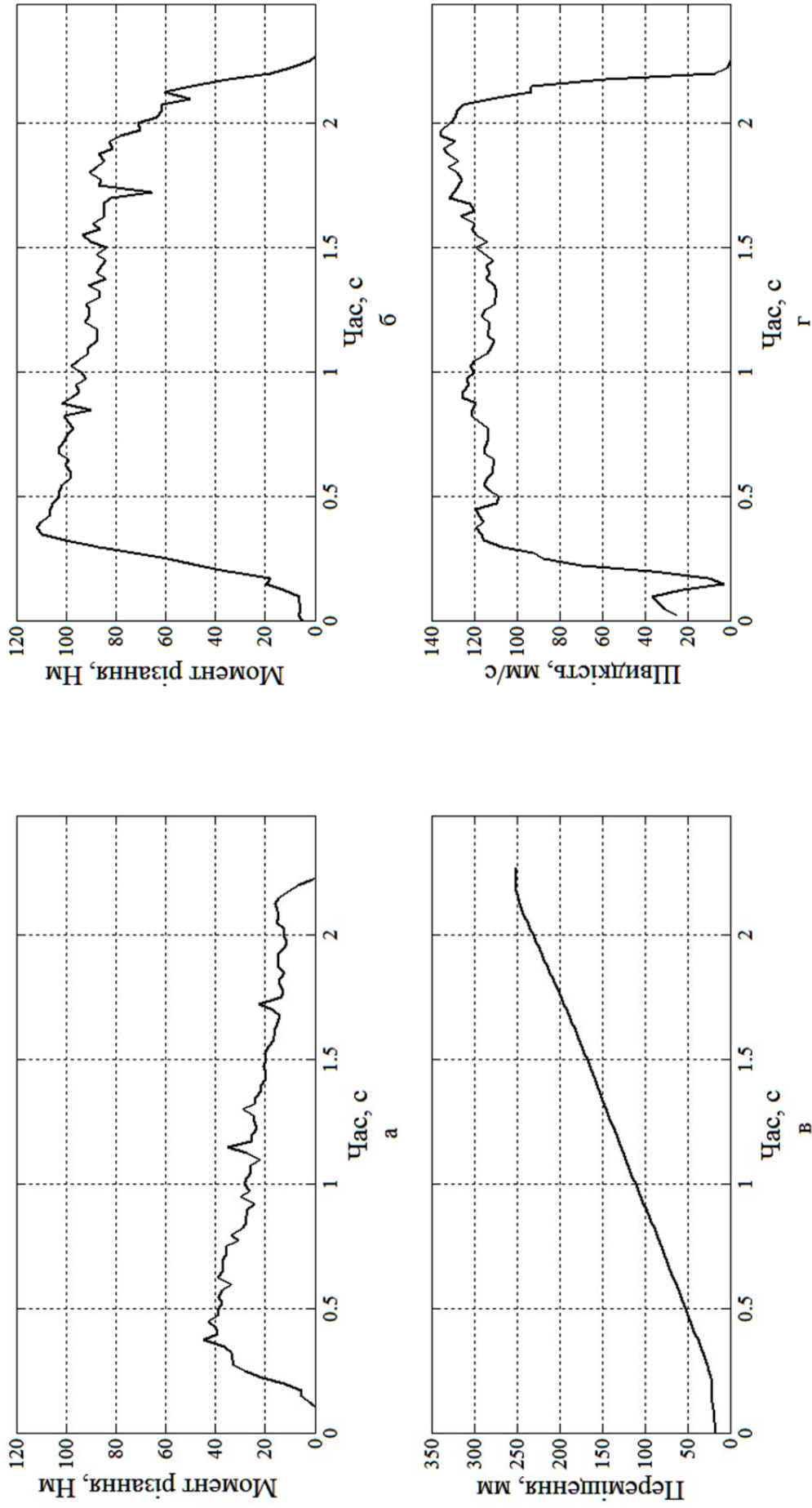


Рисунок 6.20 Експериментальні розподіли значень моменту розрізання на верхньому (а) і нижньому ножі (б), а також переміщення (в) і швидкості руху пластини (г) на прикладі розрізання пластини товщиною 10 мм

Крім того, в практиці експлуатації дискових ножиць при розрізанні товстолистових розкатів в гарячому стані технологічні можливості ножиць можуть бути розширені за рахунок застосування технології гарячого розрізання [276], проте гранична товщина розрізуваних розкатів при цьому становить 40 мм.

Обмеження товщини, перш за все, пов'язано з навантаженнями на вже існуючу конструкцію ножиць, але при розробці ножиць нової конструкції виникає питання здатності дисків втягувати розкати більшої товщини при обмеженому діаметрі дисків.

У зв'язку з цим було проведено ряд спроб по визначенню гранично можливої товщини розкатів, які можуть бути порізаними на дискових ножицях. При цьому використовували заготовки зі сплаву свинця з сурмою різної товщини.

В ході дослідження було визначено, що основним стримуючим фактором у розширенні товщини розрізуваних розкатів є умови його подавання в дискові ножі. При цьому, встановлено, що рівень подавального рольганга має виключати можливість округлості верхнього ножа першою контактувати з розкатом, оскільки тоді відбувається його нахил, за рахунок тиску з боку верхнього ножа, що, суттєво погіршує, а за певних умов, виключає можливість нормального захоплювання розкату дисками.

У зв'язку зі сказаним, при дослідженні гранично допустимої товщини за умови захоплювання дисковими ножами, в конструкції лабораторних однопарних дискових ножиць був демонтований подавальний стіл (див. підрозділ 2.3).

Подавання заготовок в ножі здійснювалося вручну, а з огляду на малий розмір заготовок і заходи техніки безпеки, заготовки попередньо кріпилися до подавальної рукоятки, як показано на рис. 6.21, а. Процес захоплювання і власне розрізання фіксувався на відеозапис. На прикладі заготовок товщиною 20 мм на рис. 6.21, б-д представлені кадри такої відеозапису.

У реальній конструкції дискових ножиць [276] гранична товщина розкатів при розрізанні в гарячому стані становить 40 мм при діаметрі дисків 960...1000 мм.



а



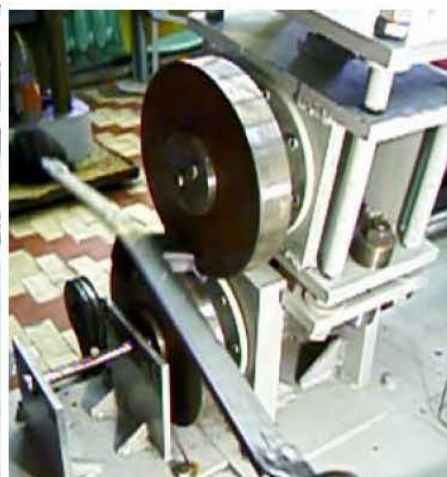
б



в



г



д

Рисунок 6.21 – Ручне пристосування для подавання заготовок в ножі (а) в ході дослідження граничної товщини захоплення дисковими ножами, а також кадри відеозапису перед початком процесу (б), в момент пуску установки в роботу (в), в момент захоплення заготовки товщиною 20 мм дисками (г) і під час розрізання (д)

З огляду на те, що в лабораторній установці використовували ножі діаметром 250 мм, то максимальна товщина пластин, з урахуванням масштабного фактору, мала б становити 10 мм. Однак, як було показано вище, при цьому діаметрі дисків різали пластини товщиною 12 мм, а гранична товщина склала 22 мм.

Таким чином, можна стверджувати, що технологічно можливо розширити діапазон товщини розрізуваних розкатів на дискових ножицях за рахунок внесення конструктивних змін в систему подавання розкатів в ножі та врахування зростання навантаження на вузли ножиць.

6.3.2 Дослідження кінематичних і енергосилових параметрів процесу поздовжнього розрізання дисковими ножами в холодному стані

Поздовжнє розрізання товстих листів і смуг на дискових ножицях в холодному стані, як правило, реалізується на ножицях аналогічної конструкції, що і при гарячому розрізанні. Головною відмінністю реалізації процесу є налаштування ножиць, а саме відстань між дисками в радіальному напрямку вздовж лінії, що проходить через центри дисків. Як правило, при реалізації процесу в гарячому стані диски в радіальному напрямку мають зазор, а в холодному стані диски встановлюють з перекриттям.

В рамках даного дослідження ставилося завдання аналогічне, розглянутому вище (див. п. 6.3.1). При цьому використовували лабораторну установку дискових ножиць, створену на базі дрібносортового стану 100 (див. підрозділ 2.3) кафедри «Автоматизовані металургійні машини та обладнання» ДДМА (м. Краматорськ).

Реалізація процесу здійснювалася дисковими ножами діаметром 155 мм з кутовою швидкістю $0,538 \text{ с}^{-1}$. При цьому різали смуги з алюмінієвого сплаву Д16Т (AA2024-T3) товщиною 2 мм і сталі ВСт2кп товщиною 1 мм.

Були реалізовані дві схеми розділення:

- 1) аналог процесу обрізання кромки товстих листів і смуг;
- 2) процес розпуску смуг на смуги меншої ширини.

У першому випадку реалізацію процесу здійснювали зі «зваленим» на 9° верхнім ножом за рухом розкату, для цього в лабораторну установку встановили подавальний стіл з відповідним кутом нахилу по відношенню до площини, що проходить через центри дисків (див. підрозділ 2.3). Як приклад на рис. 6.22 представлені залежності параметрів, контрольованих в ході реалізації процесу.

Крім того, з метою отримання даних про вплив сили зовнішнього опору на кінематичні та енергосилові параметри процесу під час реалізації експерименту, створювали силу зовнішнього опору, котра зростала лінійно переміщенню заготовки (рис. 6.23). Цю силу створювали шляхом кріплення до смуг пружин, які мають достатню величину ходу та відповідну жорсткість.

Швидкість руху смуги розраховували, використовуючи чисельне диференціювання функції переміщення в часі методом скінченних різниць, через центральні скінченні різниці.

Експериментальна реалізація даного процесу повністю підтвердила основні тенденції, а саме:

- момент на верхньому ножі завжди менший моменту на нижньому ножі;
- при збільшенні сили зовнішнього опору сила розрізання збільшується до 10% при досягненні силою зовнішнього опору критичного значення, при якому смуга вже не втягується ножами;
- при зростанні сили зовнішнього опору момент на нижньому ножі збільшується до 10%, тоді як момент на верхньому ножі може зростати в 2...3 рази і при критичних значеннях сили зовнішнього опору практично вирівнюється з моментом на верхньому ножі;
- після досягнення силою зовнішнього опору значень 30...40% її критичного значення, подальше її зростання призводить до поступового зниження швидкості руху смуги аж до повної зупинки.

У другому випадку, при моделюванні процесу розпуску смуг на більш вузькі спосіб реалізації відрізнявся напрямком подачі смуги в ножі, а саме її подавали в горизонтальній площині перпендикулярно площині, що проходить через осі обертання дисків.

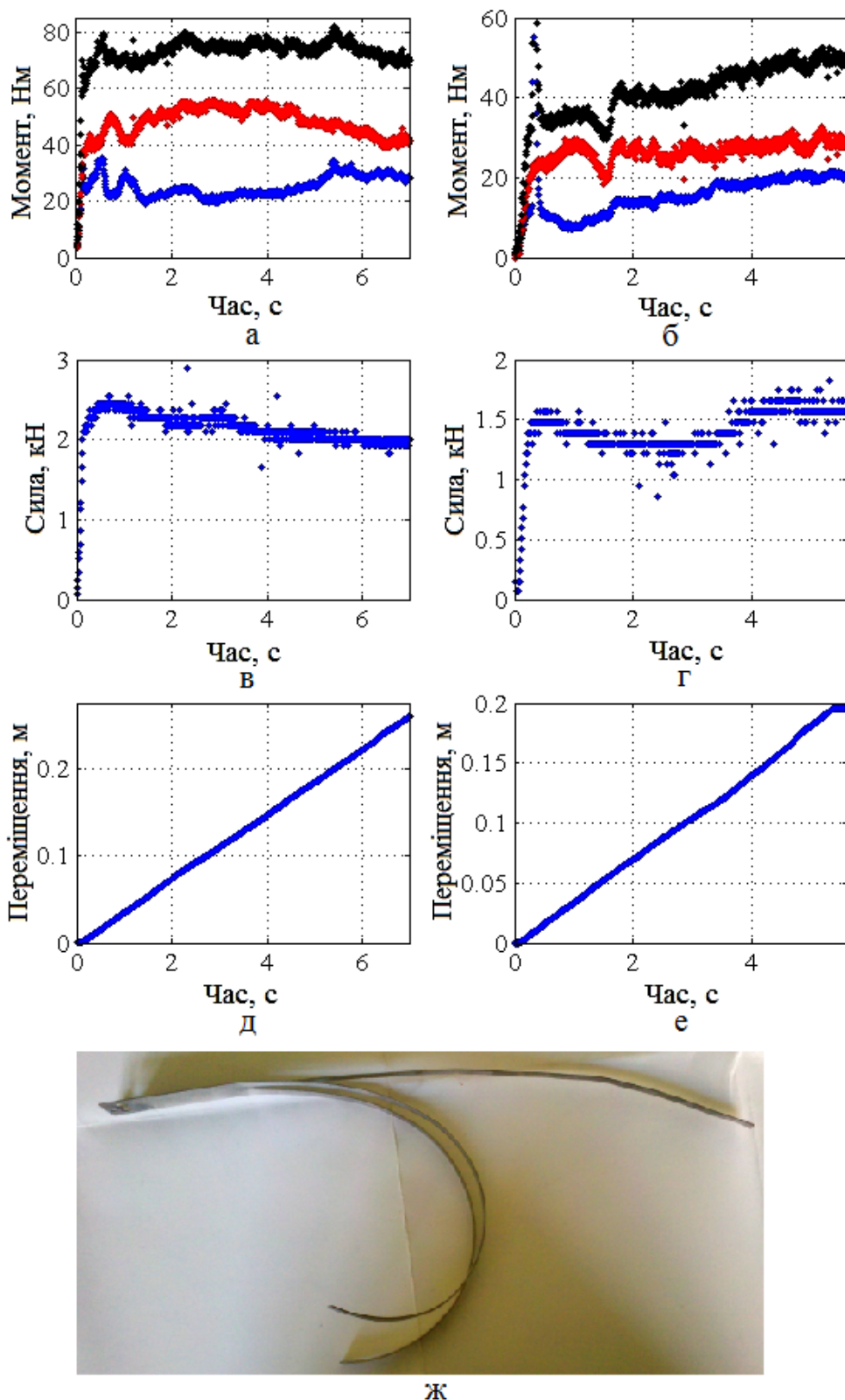


Рисунок 6.22 – Залежності моменту (а, б) і сили розрізання (в, г), а також переміщення (д, е) заготовки під час реалізації процесу поздовжнього розрізання дисковими ножами зі «зваленим» на 9° верхнім ножем заготовок з алюмінієвого сплаву Д16Т (AA2024-T3) товщиною 2 мм (а, в, д) і сталі ВСт2кп товщиною 1 мм (б, г, е) та вигляд смуги з алюмінієвого сплаву Д16Т після розрізання (ж)

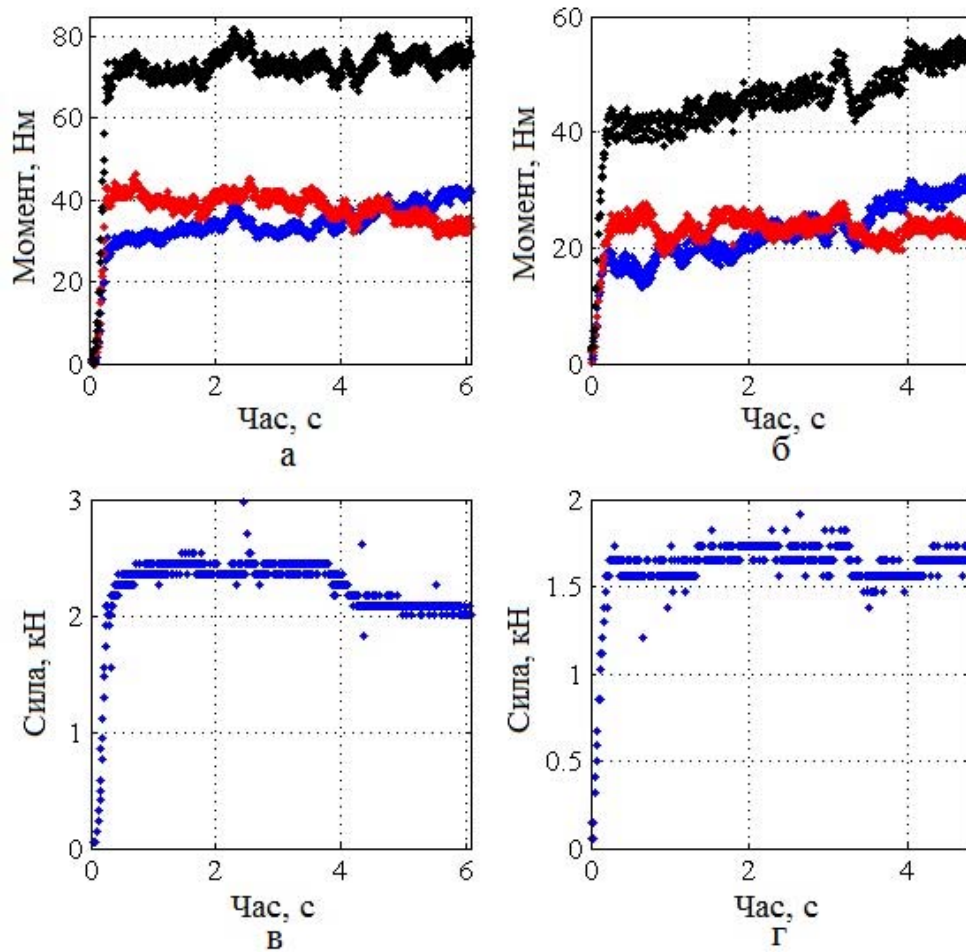


Рисунок 6.23 – Залежності моменту (а, б) і сили розрізання (в, г) під час реалізації процесу поздовжньої розпуску смуг дисковими ножами заготовок з алюмінієвого сплаву Д16Т (AA2024-T3) товщиною 2 мм (а, в) і сталі ВСт2кп товщиною 1 мм (б, г)

Слід зазначити, що при розрізанні тих же зразків, що і в першому випадку, результуючі силові параметри – сила і сумарний момент розрізання залишалися на тому ж рівні, а моменти між верхнім і нижнім диском розподілялися більш рівномірно з поперемінним перевищенням одного над іншим, як показано на рис. 6.23 (а, б).

Узагальнюючи результати, слід зазначити, що експериментальні дані з високим ступенем узгоджуються з даними отриманими в ході СЕ моделювання процесів холодного розрізання листів дисковими ножами. Даний факт вказує на доцільність використання СЕ моделей при аналізі процесів розрізання дисковими но-

жами і розробці практичних рекомендацій спрямованих на удосконалення обладнання і методів розрахунку з більш високим ступенем наукової обґрунтованості при прийнятті проектно-конструкторських і технологічних рішень.

6.3.3 Фізичне моделювання процесу розрізання з перекочуванням дугового ножа

З огляду на складність і громіздкість конструкції ножиць з перекочуванням дугового ножа, при проведенні експериментальних досліджень використовували установку однопарних дискових ножиць (див. підрозділ 2.3) кафедри «Машини металургійного комплексу» ДонДТУ (м.Алчевськ), в якій демонтували нижній ніж і подавальний стіл, а замість них встановили блок з плоским рухомим ножем.

Ефект розрізання з перекочуванням дугового ножа на даній установці досягався за рахунок одночасного обертання верхнього диска і лінійного руху плоского рухомого ножа з окружною швидкістю диска.

З огляду на геометричні розміри установки, при діаметрі диска 250 мм, для отримання максимально близьких умов до розрізання з перекочуванням дугового ножа, було вирішено різати смуги товщиною 1 мм, оскільки співвідношення між товщиною і радіусом становить 1:125. У той же час, при поздовжньому розрізанні бічних кромки на ЗКОН (див. підрозділ 4.2) мінімальне співвідношення для товщини 50 мм становить 1: 200. Однак, оскільки основна мета експериментального дослідження полягає в оцінці адекватності результатів СЕ моделювання, то головним завданням було зіставити результати симуляції і експериментальні дані.

В ході лабораторного фізичного моделювання процесу розрізання з перекочуванням дугового ножа застосовували величину перекриття ножів 0,5 мм і 0,1 мм, що відповідає кутам розрізання $8,885^\circ$ і $7,607^\circ$.

За результатами експериментального розрізання з перекочуванням дугового ножа були отримані залежності моменту розрізання на дисковому ножі, а також форма відрізаних кромки. Для порівняння на рис. 6.24 представлені залежності моменту розрізання та форми відрізаної кромки.

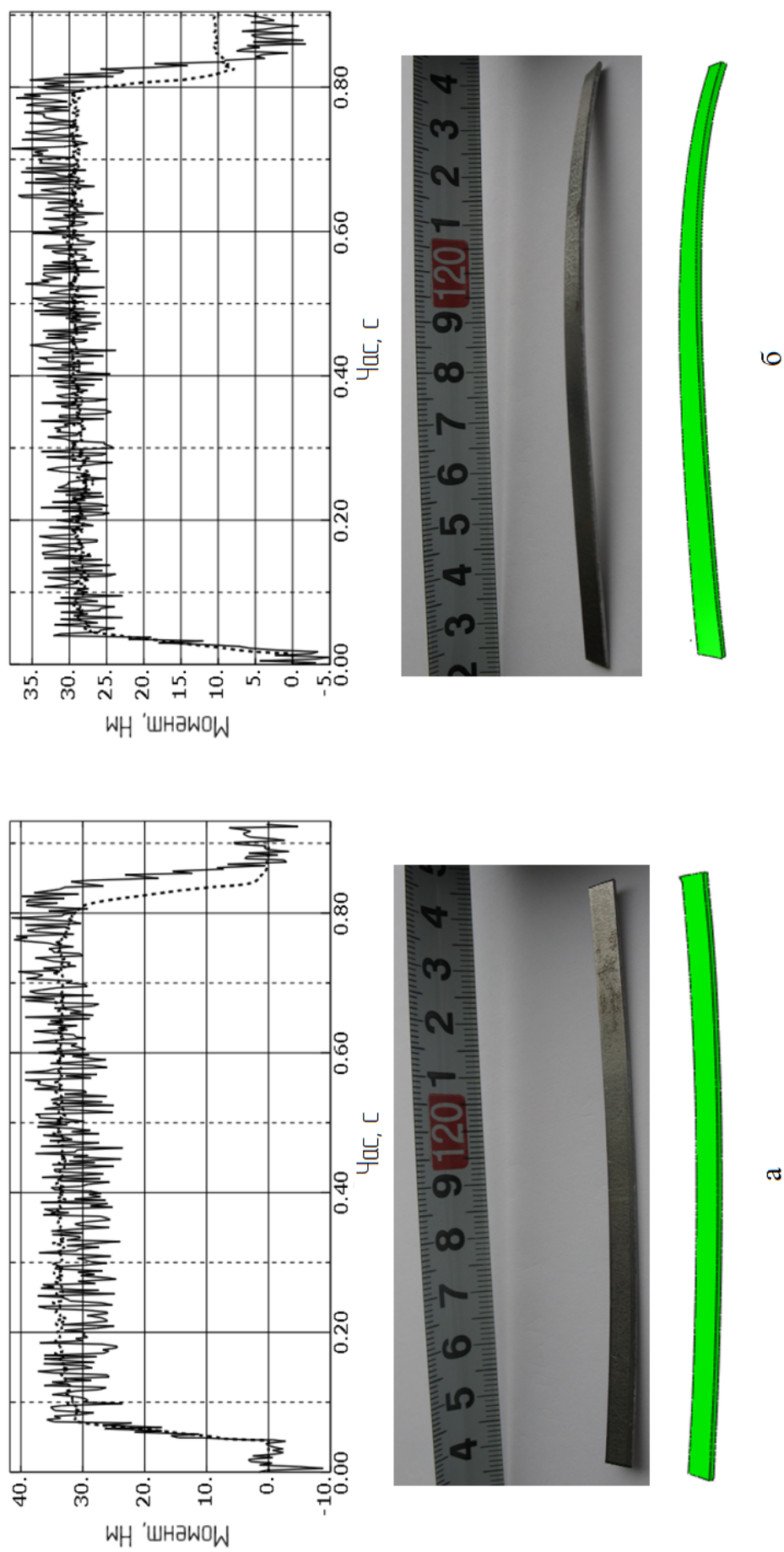


Рисунок 6.24 –Залежності моменту розрізання на верхньому ножі за результатами експерименту і SE моделювання, а також форма відрізаної кромки за результатами фізичного і математичного моделювання при перекритті ножів 0,1 (а) і 0,5 (б)

Представлені результати вказують на досить високий ступінь збіжності результатів СЕ моделювання та експериментальних даних, що в свою чергу дозволяє стверджувати, що СЕ можуть бути використані при аналізі і розробці рекомендацій процесів розрізання дуговими ножами на ножицях з перекочуванням дугового ножа.

6.4 Результати експериментального досліджень стійкості інструменту при розрізанні високоміцних сталей

В рамках даного дослідження [386] вирішувались дві задачі:

- оцінювання стійкості ножів при розрізанні високоміцних сталей
- оцінювання впливу ступеня зносу на величину сили розрізання.

Для досягнення зазначеної мети проводили експериментальні дослідження на установці лабораторних кривошипно-шатунних ножиць з паралельним розташуванням супортів кафедри "Машини металургійного комплексу і прикладна механіка" ДонДТУ (м. Алчевськ).

При проведенні експериментів встановлювали ножі виготовлені зі сталі 6XB2C в двох варіантах термообробки, які дозволили забезпечити твердість 56 и 60 HRC відповідно. В якості розрізуваного матеріалу використовували смуги товщиною 8 мм, виготовлені зі сталі конструкційної високоміцної високолегованої 28X3CHMBFA (СП28; ЕП326А) в двох станах – після прокатки з границею міцності $\sigma_b = 1000$ МПа і термозміцненому – $\sigma_b = 1500$ МПа.

В процесі проведення дослідження з дискретним кроком по числу різань контролювали зміну зовнішнього вигляду різальних кромek ножів, а також силу розрізання.

За зовнішнім виглядом різальної кромки ножа визначавши площу її зношення. Для цього робили зняття гіпсових відбитків шляхом заповнення спеціальної металевої форми гіпсовим розчином, яку відповідно прикладали до ножа и фіксували там до 10 хв. Отриманий гіпсовий зліпок висушували и обробляли на шліфувальному папері з подальшим скануванням на сканері. Отримані скановані

зображення оброблювали графоаналітичним методом, визначаючи площу зношування. В якості прикладу на рис. 6.25 представлені скановані зображення різальних кромок верхнього и нижнього ножів після 2400 різань, а на рис. 6.26 величина зношування різальних кромок ножів від кількості різань, при розрізанні матеріалу з $\sigma_b = 1500$ МПа, ножами зі сталі 6XB2C з міцністю 60 HRC.

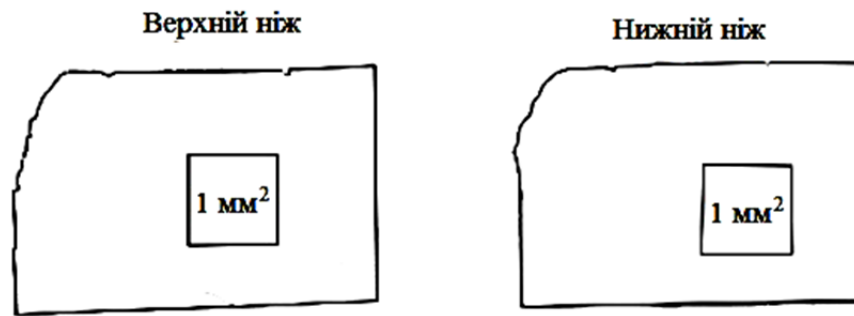


Рисунок 6.25 – Скановані зображення різальних кромок верхнього і нижнього ножів після 2400 різань, при розрізанні матеріалу з $\sigma_b = 1500$ МПа, ножами зі сталі 6XB2C з міцністю 60 HRC (для оцінки розмірів на ножах представлений квадрат розміром 1×1 мм)

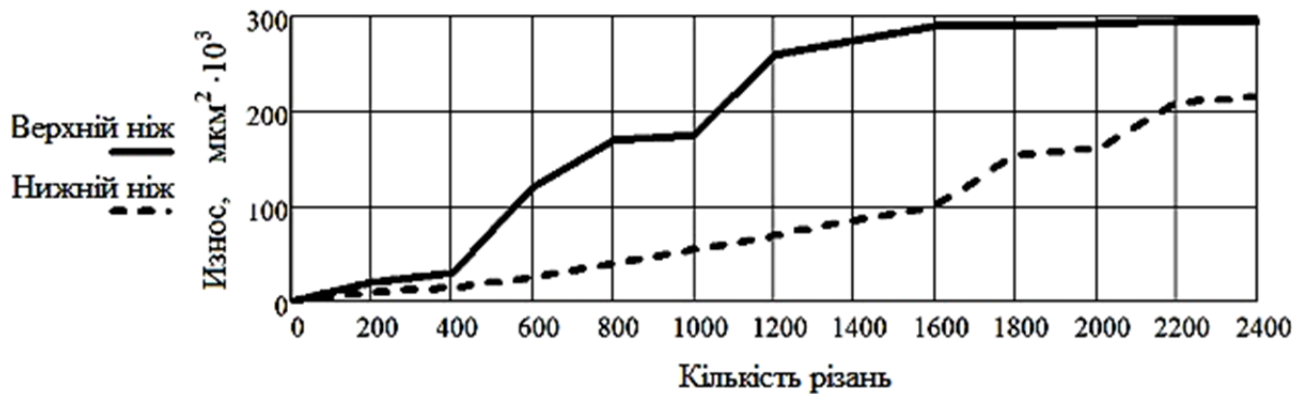


Рисунок 6.26 – Величина зношування різальних кромок верхнього і нижнього ножів від кількості різань, при розрізанні матеріалу з $\sigma_b = 1500$ МПа, ножами зі сталі 6XB2C з міцністю 60 HRC

В ході дослідження було встановлено, що стійкість ножів з твердістю 56 HRC приблизно в 2,5...3,5 рази нижче, ніж ножів з твердістю 60 HRC.

Загалом зношування ножів призводить до притуплення різальної кромки та збільшення бічного зазору між ножами. При цьому, в умовах проведення експерименту, максимально допустима величина зношення різальних кромок ножів, при якій на поверхні зрізу утворюються задирки для верхнього ножа становить $0,3 \text{ мм}^2$, для нижнього – $0,22 \text{ мм}^2$. Величина сили розрізання, по відношенню до розрізання ножами з гострими кромками для паралельних ножів не перевищила 1,25, а для похилих ножів 1,42.

Таким чином, можна стверджувати, що при проектуванні ножиць з паралельними або похилими ножами, при розрахунку максимального навантаження на ножиці слід використовувати відповідні значення коефіцієнтів, що враховують збільшення сили розрізання через зношення різальних кромок і збільшення бічного зазору, оскільки при розділенні більш «м'яких» сталей величина максимальної сили розрізання буде нижче, ніж при розділенні високоміцних.

ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 6

1. Експериментальні дослідження процесу поперечного розрізання паралельними ножами, шляхом співставлення кривих сили розрізання з результатами математичного моделювання, показали коефіцієнти кореляції $0,874 \dots 0,994$, а похибку менше 7% та підтвердили, що їх характер залежить від конструкції ножиць, оскільки послідовне встановлення месдоз в ланцюг жорсткості ножиць призводить до зменшення еквівалентної жорсткості, про що свідчить кут нахилу ділянки сили розрізання на етапі вмінання, коли не відбувається розрізання, що необхідно враховувати при визначенні кривих «опір розрізанню»-«відносне проникнення ножів» для підвищення точності розрахунку енергосилових параметрів процесів розрізання на ножицях інших конструкцій.

2. В ході експериментальних досліджень процесу розрізання похилими ножами, з урахуванням різної довжині відрізуваної частини від площини зрізу, було підтверджено достовірність розроблених скінченно-елементних моделей з коефіцієнтом кореляція сили розрізання в межах $0,854 \dots 0,976$.

3. Результати експериментальних досліджень процесу поперечного розрізання шевронними ножами показали, що застосування шевронного ножа з вигнутим (модифікованим) розташуванням похилих поверхонь ножа та заокругленням їх в вершині сходження дозволяє знизити залишкову деформацію на 60...85%, при одночасному зростанні максимальної сили розрізання не більше 10...15%.

4. Експериментальна оцінка адекватності скінченно-елементних моделей, стосовно енергосилових параметрів і формоутворення поверхонь зрізу при реалізації процесів гарячого розділення квадратної і круглої заготовок зі свинцю та сталей А36 і 28Х3СНМВФА при температурі 800°C показала коефіцієнт кореляції експериментальних даних з результатами симуляцій МСЕ понад 0,88.

5. Аналіз експериментально отриманих поверхонь зрізу профілів різної форми та умов реалізації процесу розділення дозволив встановити, що відносно проникнення ножів до сколювання збільшується при зменшенні висоти вихідного перерізу та кута нахилу твірної ножа до горизонталі.

6. Експериментальні дослідження підтвердили адекватність розроблених математичних моделей процесів поздовжнього розрізання листового металопрокату дисковими ножами та з перекочуванням дугового ножа. Зокрема в умовах сталого процесу розрізання дисковими ножами швидкість листа змінюється в діапазоні 0,9...0,95 окружної швидкості диска, а сам цей факт підтверджує можливість суміщення процесів розрізання і правлення при розробці технологічних схем виробництва товстих листів.

7. Експериментально встановлено, що величина зношення різальних кромek ножів, при якій досягається низький рівень якості поверхні зрізу через утворення задирок, через зношення різальних кромek і, як наслідок, збільшення бічного зазору, призводить до збільшення сили розрізання на паралельних ножах в 1,25, а на похилих ножах в 1,42 рази і саме ці значення необхідно застосовувати при розрахунку максимального навантаження на ножиці.

РОЗДІЛ 7

АВТОМАТИЗОВАНЕ ПРОЕКТУВАННЯ ТА РОЗРОБКА ПРАКТИЧНИХ РЕКОМЕНДАЦІЙ ЩОДО ВДОСКОНАЛЕННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИХ РЕЖИМІВ ТА ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ РЕАЛІЗАЦІЇ ПРОЦЕСІВ ПОПЕРЕЧНОГО І ПОЗДОВЖНЬОГО РОЗРІЗАННЯ ЛИСТОВОГО І СОРТОВОГО МЕТАЛОПРОКАТУ

7.1 Аналіз впливу технологічних режимів процесів поперечного і поздовжнього розрізання листового і сортового металопрокату на енергосилові параметри і основні показники якості

7.1.1 Методика розрахунку сили гарячого розрізання паралельними ножами

Обробка результатів математичного моделювання і експериментальних даних процесів розрізання паралельними ножами з використанням методів математичної статистики та аналізу результатів, згідно розробленого алгоритму отримання та обробки даних моделювання (див. підрозділ 3.6), дозволила встановити ряд залежностей, які розширюють уявлення про процеси розділення на ножицях з паралельними ножами, та отримати алгоритм розрахунку сили гарячого розрізання паралельними ножами [387, 388].

Спираючись на результати, отримані вище (див. п. 4.1.2), величина опору деформації при розрізанні σ_p на будь-якому етапі проникнення при заданій товщині заготовки, температурі і швидкості розрізання може бути визначена з наступного рівняння:

$$\sigma_p = k_n \sigma_u, \quad (7.1)$$

де $k_n = 0,53$ – коефіцієнт адаптації, що враховує зміну напруженого стану при переході до розрізання;

σ_u – дійсний опір деформації визначений згідно методики Андреюка-Тюленєва [343].

При цьому встановлено, що ступінь пластичної деформації в перерізі залежить від відносної глибини проникнення ножів в метал і описується наступною залежністю:

$$\bar{\varepsilon} = \bar{\varepsilon}_{\max} \frac{e^{k_r \frac{\varepsilon}{\varepsilon_n}} - 1}{e^{k_r} - 1} \cdot \left(2 - \frac{\varepsilon}{\varepsilon_n} \right)^{\frac{1}{2}}, \quad (7.2)$$

де $\bar{\varepsilon}_{\max}$ – максимальний ступінь пластичної деформації в осередку розрізання, при повному розділенні;

ε_n – відносне проникнення до сколювання.

k_r – коефіцієнт, що визначає характер розвитку ступеню пластичної деформації в ході розрізання:

$$k_r = 3 \left(\frac{\bar{\varepsilon}_{\max}}{\bar{\varepsilon}_{\lim}} \right)^{\frac{1}{3}}, \quad (7.3)$$

де $\bar{\varepsilon}_{\lim} = \frac{10}{\sqrt{3}} = 5,77$ – граничний ступінь пластичної деформації, який має місце при відносному проникненні до сколювання рівному $\varepsilon_n = 1$. Величина граничного ступеня пластичної деформації була отримана в результаті моделювання МСЕ за умови відсутності руйнування в осередку розрізання.

За результатами моделювання було встановлено, що максимальний ступінь пластичної деформації в осередку розрізання, при повному розділенні становить:

$$\bar{\varepsilon}_{\max} = \bar{\varepsilon}_{\lim} \varepsilon_h^{\bar{\varepsilon}_{\lim}/3}. \quad (7.4)$$

Для визначення швидкості деформації $\dot{\varepsilon}$ в процесі розрізання з відомою швидкістю руху ножа треба відносно проникнення ножів в метал представити у вигляді:

$$\varepsilon = vt/h, \quad (7.5)$$

де v – швидкість руху ножа;

t – час руху ножа;

h – товщина розрізуваного листа.

З урахуванням (7.5) вираз (7.2) набуде вигляду функції часу:

$$\bar{\varepsilon} = \bar{\varepsilon}_{\max} \frac{e^{k_r \frac{vt}{h \varepsilon_h}} - 1}{e^{k_r} - 1} \cdot \left(2 - \frac{vt}{h \varepsilon_h} \right)^{\frac{1}{2}}. \quad (7.6)$$

В результаті диференціювання рівняння (7.6) за часом, після нескладних перетворень отримаємо:

$$\dot{\varepsilon} = \frac{\bar{\varepsilon}_{\max} v}{h \varepsilon_h (e^{k_r} - 1)} \left[k_r e^{k_r \frac{vt}{h \varepsilon_h}} \left(2 - \frac{vt}{h \varepsilon_h} \right)^{\frac{1}{2}} - \frac{1}{2} \left(e^{k_r \frac{vt}{h \varepsilon_h}} - 1 \right) \left(2 - \frac{vt}{h \varepsilon_h} \right)^{-\frac{1}{2}} \right]. \quad (7.7)$$

Використовуючи, співвідношення (7.5), остаточно швидкість деформації $\dot{\varepsilon}$ можна представити як функцію відносного проникнення ножів в метал:

$$\dot{\bar{\varepsilon}} = \frac{\bar{\varepsilon}_{\max} \nu}{h \varepsilon_H (e^{k_r} - 1)} \left[k_r e^{k_r \frac{\varepsilon}{\varepsilon_H}} \left(2 - \frac{\varepsilon}{\varepsilon_H} \right)^{\frac{1}{2}} - \frac{1}{2} \left(e^{k_r \frac{\varepsilon}{\varepsilon_H}} - 1 \right) \left(2 - \frac{\varepsilon}{\varepsilon_H} \right)^{-\frac{1}{2}} \right]. \quad (7.8)$$

Оскільки процес розрізання супроводжується деформаційним нагріванням в осередку розрізання, що, як було показано вище, також впливає на опір розрізання, була отримана, шляхом обробки результатів моделювання МСЕ, емпірична залежність температури в осередку розрізання від ступеня деформації:

$$\theta = \theta_H + \left(\frac{\bar{\varepsilon}}{\bar{\varepsilon}_{\max}} \right)^{1 - \frac{3}{2\sqrt{2}} \left(\frac{\bar{\varepsilon}_{\max}}{\bar{\varepsilon}_{\text{lim}}} \right) \left(\frac{\bar{\varepsilon}}{\bar{\varepsilon}_{\max}} \right)^{\sqrt{2}}} \Delta\theta, \quad (7.9)$$

де θ_H – температура заготовки перед розрізанням;

$\Delta\theta$ – приріст температури в осередку деформації к моменту руйнування.

Величину приросту температури в осередку деформації на момент руйнування можна визначити з лінійного рівняння регресії:

$$\Delta\theta = b_0 + \sum b_i x_i + \sum b_{ij} x_i x_j + \sum b_{ijk} x_i x_j x_k + \sum b_{ijklm} x_i x_j x_k x_m + b_{ijkln} x_i x_j x_k x_m x_n, \quad (7.10)$$

де $x_1 = t_H = \frac{h \varepsilon_H}{\nu}$ – параметр, що враховує час деформації до руйнування, с;

$x_2 = \ln(\sigma_{p0})$ – параметр, що враховує величину початкового опору деформації при розрізанні (σ_{p0} визначається з рівняння (7.1) при ступеню пластичної деформації $\bar{\varepsilon}_0 = 10^{-3}$, швидкості деформації (рівняння (7.8)) і температурі θ_H);

$x_3 = \ln(\bar{\varepsilon}_{\max})$ – параметр, що враховує ступінь пластичної деформації в момент руйнування;

$x_4 = \ln(\dot{\bar{\varepsilon}}_{\max})$ – параметр, що враховує швидкість пластичної деформації в момент руйнування;

$x_5 = e^f$ – параметр, що враховує вплив тертя (де f – коефіцієнт тертя при сталому процесі в залежності від температури), величина коефіцієнта тертя визначається із відомої [389] аналітичної залежності коефіцієнта тертя від температури при сталому процесі;

$b_0, b_i, b_{ij}, b_{ijk}, b_{ijkl}, b_{ijklm}$ – коефіцієнти, значення яких, при відповідних комбінаціях параметрів наведені в таблиці 7.1.

Таблиця 7.1 – Значення коефіцієнтів до рівняння (7.10)

Коеф.	значення	Коеф.	значення	Коеф.	значення	Коеф.	значення
b_0	31727	b_{14}	33180	b_{123}	-370	b_{245}	-989
b_1	-50081	b_{15}	31833	b_{124}	-7866	b_{345}	-5012
b_2	-7732	b_{23}	10525	b_{125}	-7062	b_{1234}	1126
b_3	-41781	b_{24}	1536	b_{134}	-5966	b_{1235}	116
b_4	-6240	b_{25}	5032	b_{135}	-3169	b_{1245}	5116
b_5	-20627	b_{34}	7636	b_{145}	-21505	b_{1345}	3724
b_{12}	11089	b_{35}	27470	b_{234}	-1934	b_{2345}	1272
b_{13}	5773	b_{45}	4016	b_{235}	-6924	b_{1234}	-704

Істинний опір розрізанню, що характеризує відношення сили розрізання до залишкової площі розрізуваного перерізу, може бути отримано з наступного співвідношення:

$$\tau_u = k_\theta k_s \sigma_p \left[\frac{1}{\sqrt{3}} + \bar{\varepsilon} \frac{\bar{\varepsilon}_{\max} \sqrt{\varepsilon_H}}{32} \right] \cdot \left[1 - \frac{e^{-8\bar{\varepsilon}}}{2 + \sqrt{2}} \right], \quad (7.11)$$

де k_θ – коефіцієнт, що враховує вплив початкової температури на співвідношення між опором деформації і істинним опором зрізу:

$$k_\theta = 1 + \ln \left(\left[\frac{1000}{\theta_n} \right]^{1/4} \right); \quad (7.12)$$

k_s – коефіцієнт, що враховує ослаблення залишкового перерізу, за рахунок накопичення пошкоджень в матеріалі:

$$k_s = 1 - (1 - \varepsilon_n) \frac{e^{A_c \frac{\varepsilon}{\varepsilon_n}} - 1}{e^{A_c} - 1}, \quad (7.13)$$

де A_c – емпіричний показник інтенсивності накопичення пошкоджень, отриманий при обробці результатів скінченно-елементного моделювання, що визначається виразом:

$$A_c = 3(2,14 + \varepsilon_n - C), \quad (7.14)$$

де C – відсоток вмісту вуглецю в розрізаному матеріалі.

Залежність питомого опору розрізанню, тобто відношення сили розрізання до площі вихідного перерізу розрізаного матеріалу, визначається через поточне значення відносного проникнення ε ножів в метал:

$$\tau = \tau_u (1 - \varepsilon). \quad (7.15)$$

Остаточно, залежність сили розрізання можна отримати:

$$P = k_3 \tau F, \quad (7.16)$$

де F – площа розрізуваного перерізу;

k_3 – коефіцієнт, що враховує збільшення сили розрізання при затупленні ножів та збільшенні бокового зазору між ножами в процесі тривалої експлуатації (див. підрозділ 6.4).

Програмна реалізація рішення алгоритму (7.1)–(7.15) здійснювалася в середовищі системи автоматизації математичних розрахунків MathLab.

Порівняння експериментальних даних максимального значення питомого опору з розрахунковими значеннями за моделлю (7.1)–(7.15) відповідно до таблиці 3.5 представлені в таблиці 7.2 і на рис. 7.1. В отриманих результатах розбіжність між експериментальними і розрахунковими даними менша за 10%.

Таблиця 7.2 – Порівняння експериментальних і розрахункових даних

Марка сталі	$\theta_n, ^\circ\text{C}$	Максимальне значення питомого опору розрізанню, $H / \text{мм}^2$		Відхилення, %
		експеримент	модель	
сталь 20	650	134,4	130,2	-3,107
	760	86,3	85,0	-1,485
	970	47,1	43,2	-8,302
сталь 45	660	142,2	138,6	-2,535
	760	89,3	94,4	+5,798
	980	44,1	47,5	+7,687
ШХ10	670	147,2	152,1	+3,376
	780	94,2	102,6	+8,979
	1090	37,3	39,3	+5,479
сталь 75	700	130,5	127,4	-2,351
	860	72,6	75,0	-0,717
	1020	47,1	45,9	-2,398

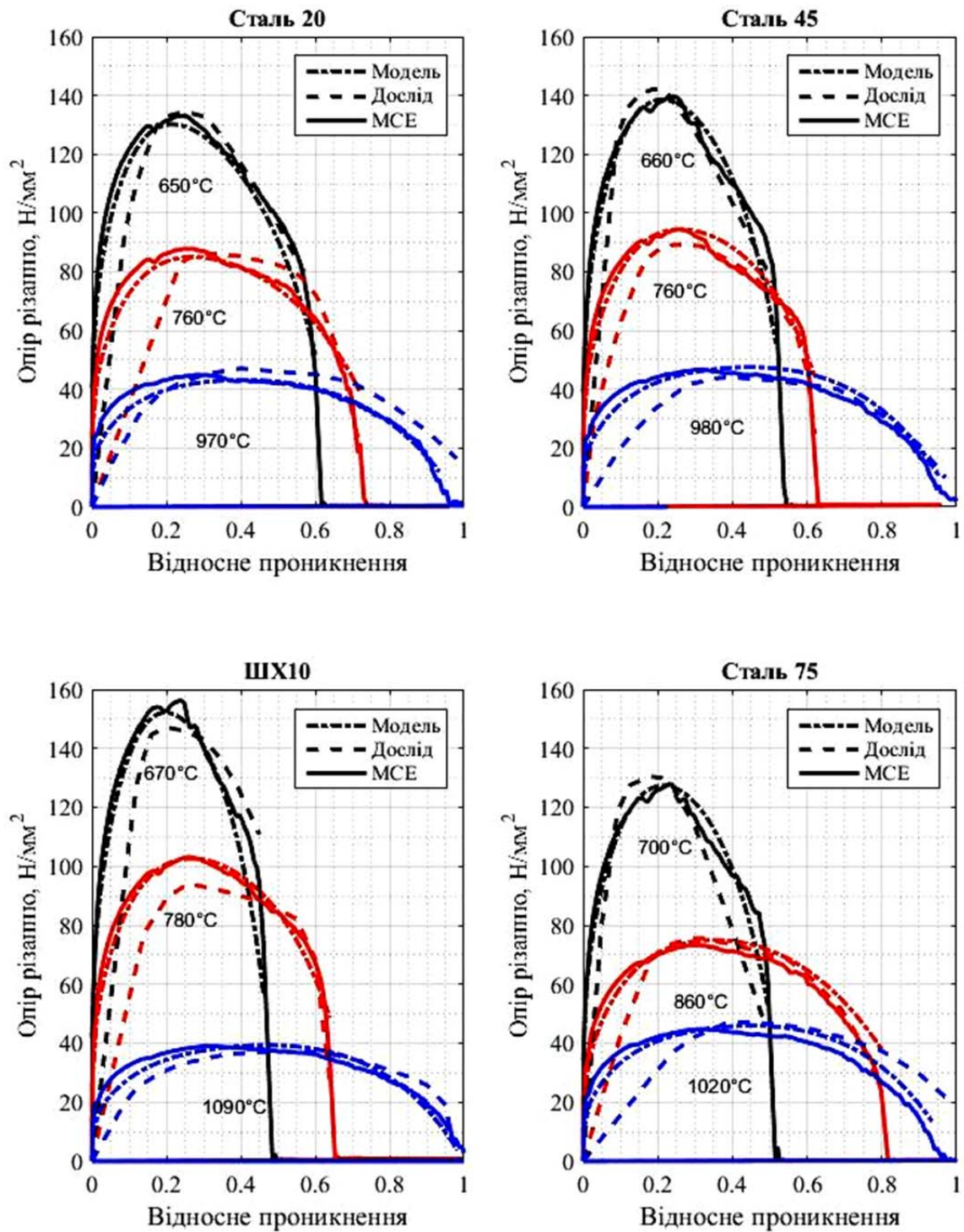


Рисунок 7.1 – Залежності питомого опору розрізанню за результатами досліджень [13], MCE симуляцій і за моделлю для умов відповідно з таблицею 3.5

На рис. 7.2–7.5 представлені залежності питомого опору розрізанню в порівнянні з результатами моделювання МСЕ з розрахунковими значеннями за моделлю (7.1)–(7.15) для різних умов реалізації процесу.

При цьому варіювали хімічний склад між мінімальним і максимальним вмістом елементів (див. рис. 7.2), швидкість руху ножа 25...500 мм/с (див. рис. 7.3 і 7.4), товщину розрізуваних заготовок 10...50 мм (див. рис. 7.5). Представлені залежності демонструють, що запропонована математична модель з досить високим ступенем збіжності узгоджується з МСЕ. Величина відхилення по максимальній силі розрізання в модельованому діапазоні параметрів не перевищила 6,5%.

Узагальнюючи отримані результати можна стверджувати, що основними перевагами розробленого методу розрахунку в порівнянні з відомими є наступне:

- розширено уявлення про причинно-наслідкові зв'язки процесу розрізання гарячого металопрокату на ножицях з паралельними ножами;
- враховано вплив температури і хімічного складу сталі, а також швидкості руху ножа на величину сили розрізання;
- залежності сили розрізання від відносного проникнення дають високу ступінь збіжності з експериментальними даними.

Дана методика розрахунку дозволяє перейти від усереднених інтегральних показників до локальних характеристик питомого опору розрізання, при розрахунку сили розрізання будь-яких процесів розділення металопрокату на ножицях.

Крім того, даний підхід сприятиме розвитку методів автоматизованого проектування розділових операцій в прокатному виробництві. Зокрема, при розрахунку енергосилових параметрів процесів розрізання на ножицях це дозволить уточнити величину сили розрізання, особливо, за рахунок врахування реальної форми різальних інструментів.

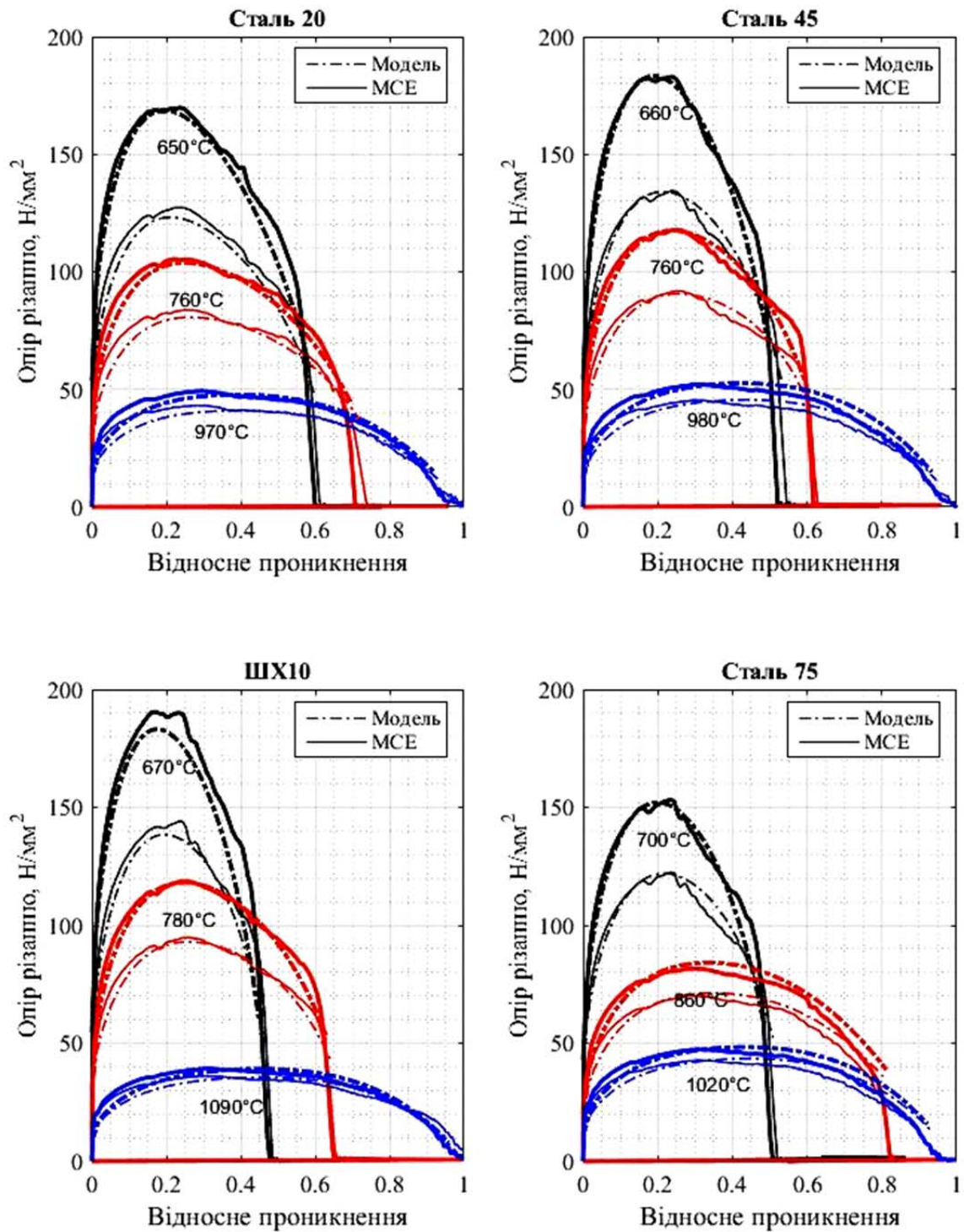


Рисунок 7.2 – Криві питомого опору за результатами МСЕ симуляцій і за моделлю для умов згідно таблиці 4.2 при мінімальному (тонкі лінії) і максимальному (товсті лінії) можливому вмісті хімічних елементів

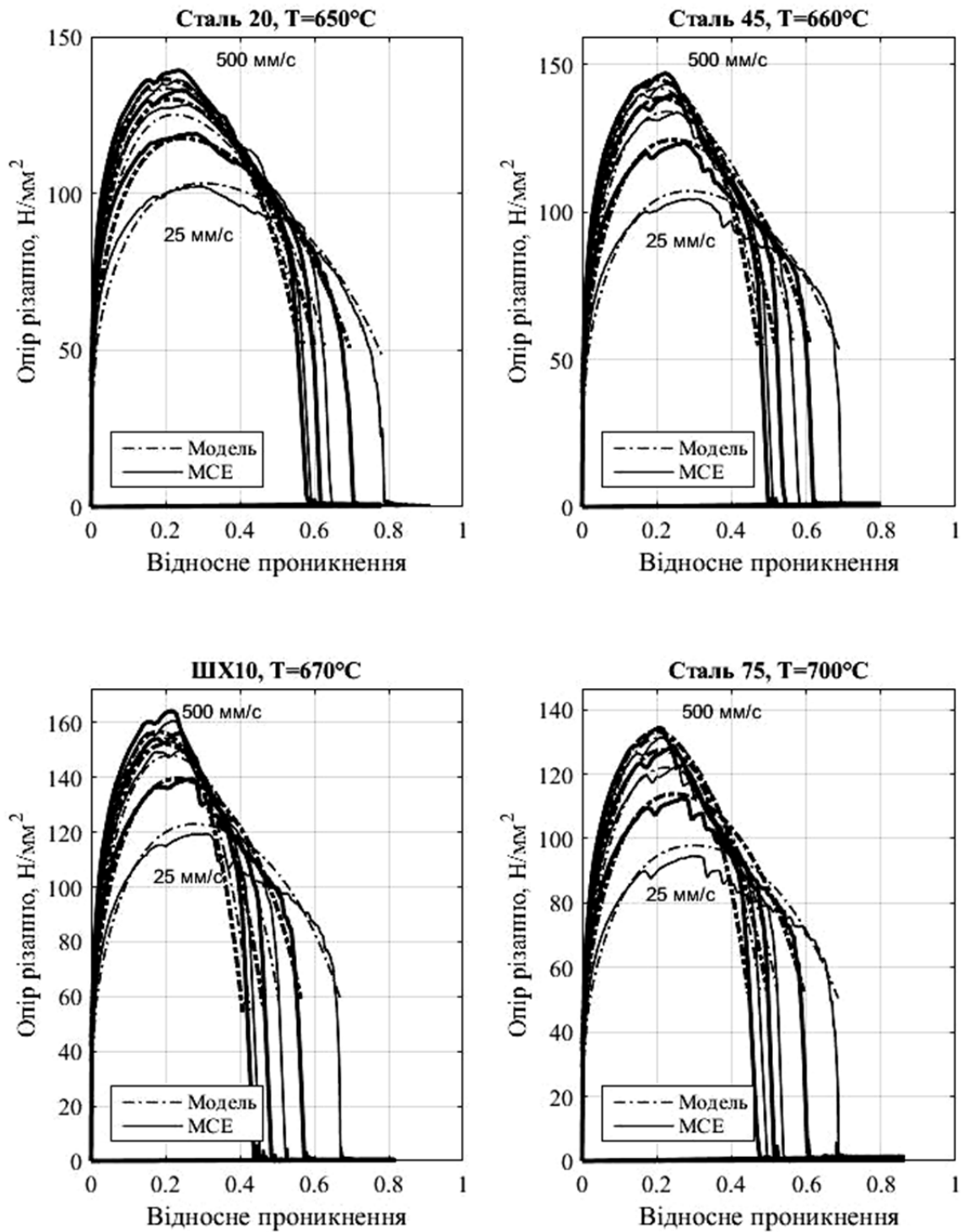


Рисунок 7.3 – Криві питомого опору за результатами МСЕ симуляцій і за моделлю для умов відповідно з таблицею 3.5 (при мінімальних значеннях температури) з різною швидкістю руху ножа (на графіках від низу до верху 25, 100, 200, 300, 400, 500 мм/с)

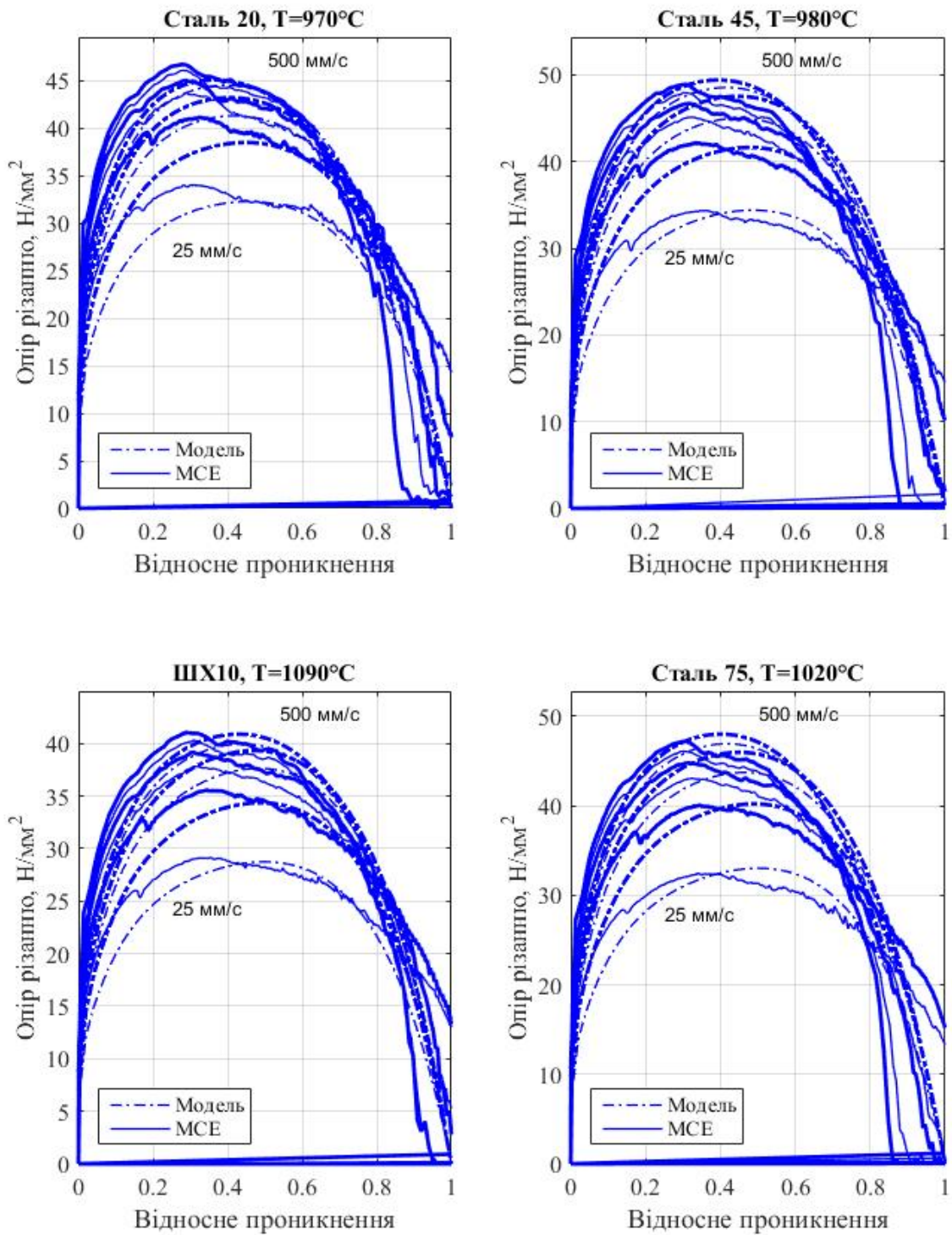


Рисунок 7.4 – Криві питомого опору за результатами МСЕ симуляцій і за моделлю для умов відповідно таблиці 3.5 (для максимальних значень температур) з різною швидкістю руху ножа (на графіках від низу до верху 25, 100, 200, 300, 400, 500 мм/с)

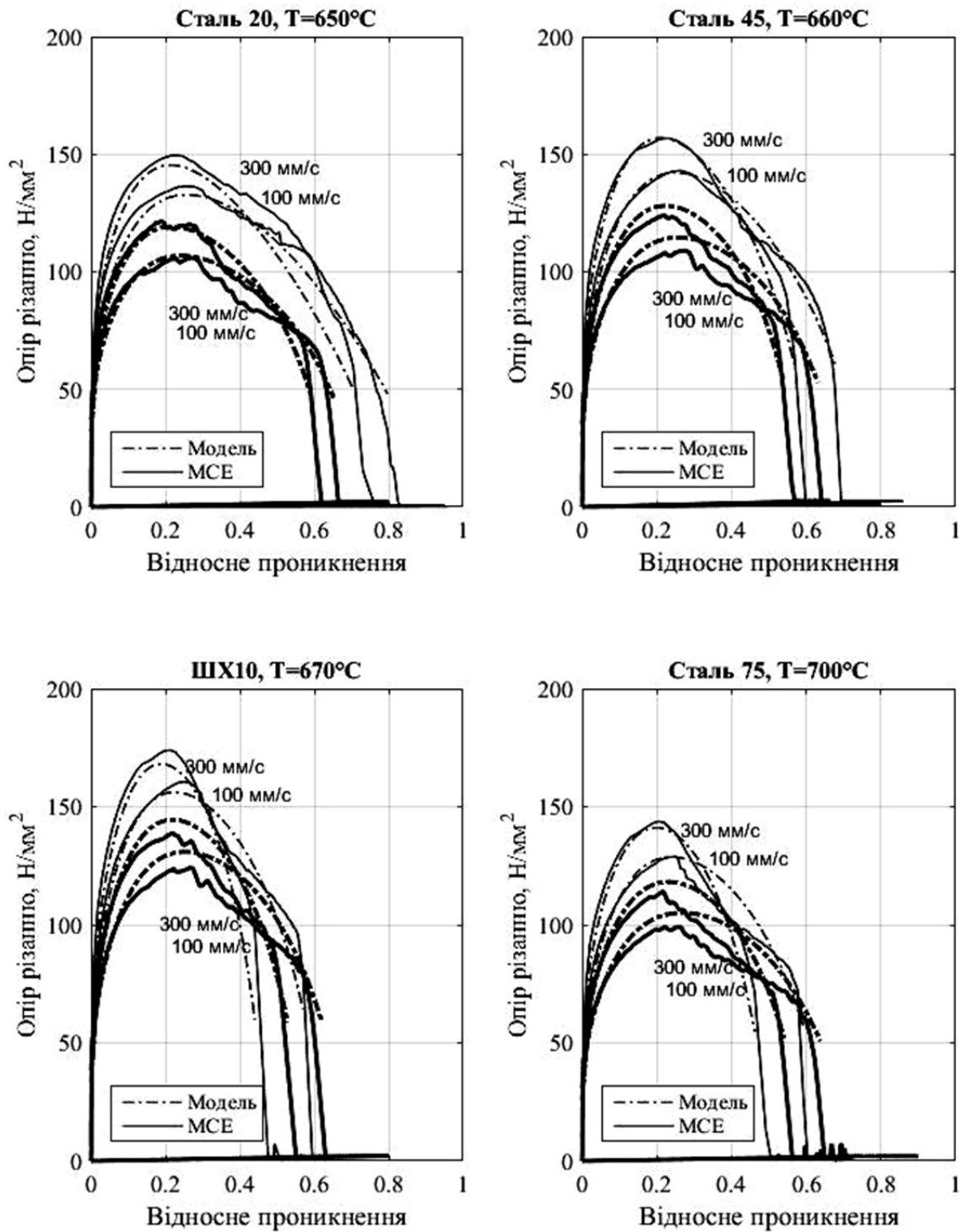


Рисунок 7.5 – Криві питомого опору за результатами МСЕ симуляцій і за моделлю для умов відповідно таблицею 3.5 (при мінімальних значеннях температур) з різною швидкістю руху ножа для товщини $h=50$ мм (товсті лінії) і $h=10$ мм (тонкі лінії)

7.1.2 Методика розрахунку відносного проникнення до сколювання при холодному розрізанні паралельними ножами

З огляду на високу ступінь збіжність результатів симуляцій МСЕ з експериментальними даними [390], для отримання моделі розрахунку відносного проникнення до сколювання при холодному розрізанні паралельними ножами було вирішено скористатися плануванням експерименту [391] на базі розробленої СЕ моделі (див. п. 4.1.1).

Як впливає з проведених досліджень (див. підрозділ 6.2) на відносне проникнення до сколювання впливають п'ять основних факторів, однак використання всіх факторів в їх абсолютних значеннях не представляється можливим, тому два з них використовували у вигляді співвідношень, наведених в табл. 7.3.

Таблиця 7.3 – Фактори планованого експерименту і їх граничні значення

№	Назва фактору	Позначення	Одиниця вимірювання	Межі областей факторів	
				min	max
1	Границя міцності при розтягуванні	σ_b	МПа	373	1500
2	Висота перерізу	h	мм	1	25
3	Відношення швидкості руху ножа до висоти перерізу	v/h	c^{-1}	0,122	70
4	Відносне подовження після розривання	δ		0,08	0,45
5	Відношення границі текучості до границі міцності матеріалу при розтягуванні	$\sigma_{0,2}/\sigma_b$		0,39	0,9115

За результатами СЕ симуляцій відповідно до умов повного факторного експерименту 2^5 , не було відзначено прямого лінійного зв'язку факторів з визначеним параметром. Тож надалі використовували лінеаризацію факторів шляхом застосування показників ступеня для кожного з них методом перебору. Як відомо [391], в

плануванні експерименту для спрощення запису умов експерименту і обробки експериментальних даних використовують кодовані значення факторів.

Для лінеаризації застосовували показники ступеня факторів (табл. 7.4), тож функція переходу до кодованих значень факторів мала вигляд:

$$x_i = f(X_i, n_i) = \frac{X_i^{n_i} - \left[\max(X_i^{n_i}) + \min(X_i^{n_i}) \right] / 2}{\left[\max(X_i^{n_i}) - \min(X_i^{n_i}) \right] / 2}, \quad (7.17)$$

де X_i – абсолютне значення фактору;

n_i – показник степені фактору.

Таблиця 7.4 – Параметри переходу до кодованих значень факторів

Фактор	σ_b	h	V/h	δ	$\sigma_{0,2}/\sigma_b$
Мінімальне значення	373	1	1	0,072	0,351
Максимальне значення	1128	25	20	0,54	0,887
Позначення ступеня	n_1	n_2	n_3	n_4	n_5
Показник ступеня	1,75	-0,5	-1,5	-0,5	-1
Кодований фактор	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5

Обробка результатів планованого експерименту дозволила отримати рівняння регресії для відносного проникнення до сколювання, як функцію 5-ти факторів. В досліджуваному діапазоні значень факторів мінімальне і максимальне значення відносного проникнення до сколювання склали відповідно 0,014 і 0,903, а в центрі плану 0,254.

Рівняння повної лінійної регресійної моделі відносного проникнення до сколювання при холодному розрізанні паралельними ножами, яке дозволяє оцінювати лінійні ефекти спільно з ефектами всіх можливих взаємодій має вигляд:

$$\varepsilon_n = b_0 + \sum b_i x_i + \sum b_{ij} x_i x_j + \sum b_{ijk} x_i x_j x_k + \sum b_{ijklm} x_i x_j x_k x_m + b_{ijklmn} x_i x_j x_k x_m x_n, \quad (7.18)$$

де $b_0, b_i, b_{ij}, b_{ijk}, b_{ijklm}, b_{ijklmn}$ – коефіцієнти, значення яких, при відповідних комбінаціях параметрів наведені в таблиці 7.5.

Таблиця 7.5 – Значення коефіцієнтів до рівняння (7.18)

Коеф.	Значення	Коеф.	Значення	Коеф.	Значення	Коеф.	Значення
b_0	0,254	b_{14}	0,0160	b_{123}	0,0147	b_{245}	-0,00861
b_1	-0,00225	b_{15}	-0,0476	b_{124}	0,00585	b_{345}	-0,00547
b_2	-0,0352	b_{23}	-0,0495	b_{125}	-0,0104	b_{1234}	-0,0146
b_3	-0,0305	b_{24}	0,0546	b_{134}	-0,00301	b_{1235}	0,0299
b_4	-0,184	b_{25}	0,00985	b_{135}	0,0222	b_{1245}	0,0129
b_5	-0,0686	b_{34}	0,0516	b_{145}	0,0353	b_{1345}	-0,0216
b_{12}	-0,00954	b_{35}	0,00433	b_{234}	0,0642	b_{2345}	-0,0463
b_{13}	0,00131	b_{45}	0,0606	b_{235}	0,0509	b_{12345}	-0,0290

На рис. 7.6 представлені ефекти частинного впливу кожного з факторів на величину відносного проникнення до сколювання в центрі плану, коли кодовані значення інших факторів дорівнюють 0.

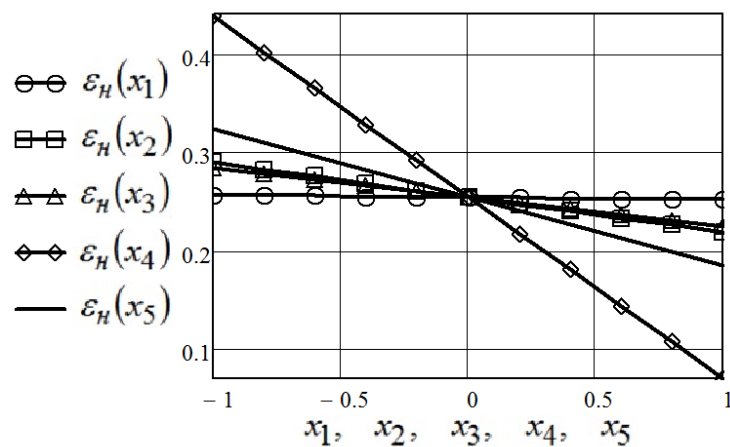


Рисунок 7.6 – Ефекти частинного впливу факторів на величину відносного проникнення до сколювання в центрі плану

В результаті порівняння розрахункових значень відносного проникнення до сколювання з експериментальними даними було відзначено, що відхилення від прогнозних показників знаходиться в межах $\pm 5\%$.

Аналіз залежностей представлених на рис. 7.6 показує, що на в центрі плану найменший вплив має границя міцності при розтягуванні, далі за рівнем впливу йдуть відношення швидкості руху ножа до висоти перерізу та висота перерізу, четвертим за значущістю є відношення границі текучості до границі міцності матеріалу при розтягуванні, а найбільший вплив має відносно подовження після розривання. Отже, можна стверджувати, що дана регресійна модель з розрахунку відносного проникнення до сколювання не протирічить класичним уявленням, проте дозволяє враховувати вплив додаткових факторів та їхньої сукупності, за рахунок чого підвищується точність розрахунку інтегральних значень енергосилових параметрів розрізання на ножицях.

7.2 Автоматизоване проектування і вдосконалення технологічних режимів процесів поперечного та поздовжнього розрізання металопрокату

7.2.1 Вплив налаштування шевронного ножа на якість поперечного розрізання листового металопрокату

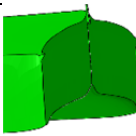
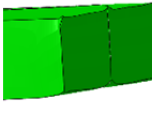
Зазвичай, технологія розрізання шевронними ножами має на увазі застосування ножів певної конструкції незалежно від товщини та механічних властивостей розрізуваних матеріалів. Проте, за наявності можливості переналаштування ножиць, шляхом заміни шевронного ножа або розробки механізму регулювання куту нахилу різальних поверхонь доцільно отримати автоматизовані засоби визначення сили розрізання та залишкової деформації листа.

З цією метою, шляхом застосування СЕ моделі (див. п. 4.2.1) були розглянуті [392] три умовні марки сталі з границею міцності 330, 530 і 1000 МПа і абсолютним проникненням до сколювання 0,4.

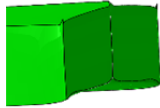
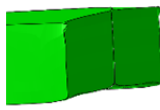
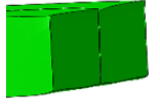
Для аналізу впливу, був розроблений план експерименту і отримані результати СЕ симуляції процесу розрізання шевронним ножем листів товщиною 25 мм і шириною 2000 мм. При цьому варіювали два параметри: границя міцності матеріалу $\sigma_b = 330 \dots 1000$ МПа і кут нахилу ножів $\alpha = 1 \dots 3^\circ$.

За результатами моделювання [392] були отримані максимальні значення сили розрізання P , а також максимальні величини залишкової деформації Δ по ширині листа розрізуваного шевронним ножем, які представлені в таблиці 7.6.

Таблиця 7.6 – Результати моделювання методом скінченних елементів процесу розрізання шевронними ножами

№	Змінні параметри		Контрольовані параметри		
	Нахил ножів α , градус	Границя міцності матеріалу σ_b , МПа	Сила розрізання P , МН	Профіль відрізаного торця	Залишкова деформація (максимальне відхилення від площинності) Δ , мм
1	3°	330	1,58		14,71
2	2°	330	2,16		3,92
3	1°	330	4,1		0,88
4	3°	530	2,36		11,22
5	2°	530	3,28		3,30
6	1°	530	6,52		0,53

Продовження таблиці 7.6

№	Змінні параметри		Контрольовані параметри		
	Нахил ножів α , градус	Границя міцності матеріалу σ_b , МПа	Сила розрізання P , МН	Профіль відрізаного торця	Залишкова деформація (максимальне відхилення від площинності) Δ , мм
7	3°	1000	3,8		4,70
8	2°	1000	5,42		2,54
9	1°	1000	11,06		0,43

Подальша обробка результатів дозволила отримати два рівняння регресії в залежності від кута нахилу ножа α і границі міцності матеріалу σ_b для:

– максимальної сили розрізання:

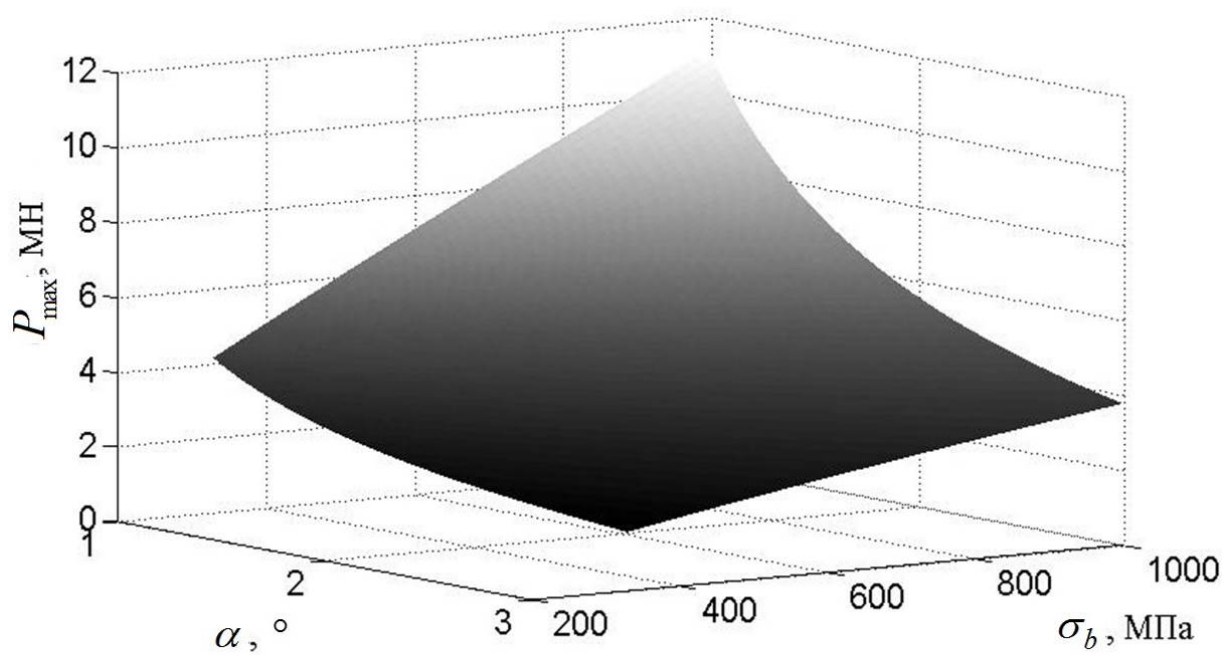
$$P = \frac{0,0234\sigma_b^{0,892}}{\alpha^{0,093\ln(\sigma_b)+0,34}}; \quad (7.19)$$

– максимального відхилення від площинності (на 1 м ширини листа):

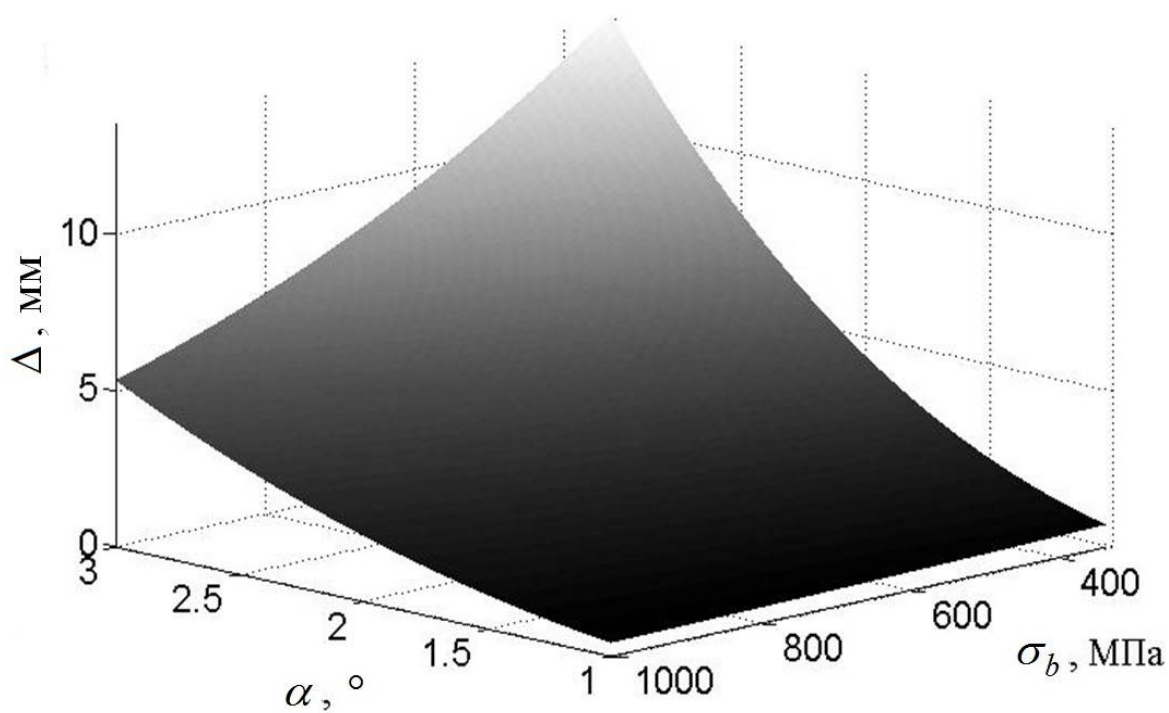
$$\Delta = e^{[2,86\ln(\alpha)-0,000761\sigma_b-0,000576\sigma_b\ln(\alpha)-0,0728]}. \quad (7.20)$$

Графічно залежності (7.20) і (7.21) представлені на рисунку 7.7.

Основний висновок, який можна зробити за отриманими даними – чим «м'якше» розрізувана сталь, тим більше залишкова деформація Δ і більш яскраво виражений дефект, однак сила розрізання для цих марок значно менше.



а



б

Рисунок 7.7 – Графічне представлення залежностей: а – максимальної сили розрізання P_{\max} (рівняння (7.21)); б – максимального відхилення Δ від площинності (рівняння (7.20))

З огляду на той факт, що сортамент розрізуваних товщин листів становить 5...25 мм, можна стверджувати, що в переважній більшості випадків навантаження на ножиці значно менше розрахункового. Тобто для істотного зниження, а можливо і повного усунення даного дефекту необхідно передбачити в конструкції ножиць механізм регулювання кута нахилу шевронних ножів.

При цьому мінімальним кутом нахилу можна вважати 1° , оскільки, як можна бачити з отриманих даних (рис. 7.7 б), в цьому випадку дефект практично відсутній для будь-якої з розглянутих сталей.

Вочевидь, що в разі регулювання кута нахилу ножів необхідно виходити з необхідності зниження дефекту при одночасному недопущенні перевантаження ножиць.

З огляду на, що величина сили розрізання прямо пропорційна товщині металу розрізуваного листа, використовуючи вираз (7.19) можна запропонувати наступне рівняння для визначення кута нахилу ножа:

$$\alpha_{\min} = \begin{cases} \left[\frac{9,36 \cdot 10^{-4} h \sigma_b^{0,892}}{P_{\max}} \right]^{\frac{1}{0,093 \ln(\sigma_b) + 0,34}} & \text{при } P_{\max} < 9,36 \cdot 10^{-4} h \sigma_b^{0,892}; \\ 1^\circ & \text{при } P_{\max} \geq 9,36 \cdot 10^{-4} h \sigma_b^{0,892}, \end{cases} \quad (7.21)$$

де P_{\max} – максимально допустиме значення сили розрізання для ножиць, що конструюються або удосконалюються.

7.2.2 Удосконалення інструменту для розділення квадратної заготовки фасонним ножом в гарячому стані

Точність поперечного розрізання сортового прокату і допустима величина косини зрізу, а також методи контролю відхилення форми металопродукції в Україні, регламентуються рядом нормативних документів [393-396].

Якість розрізання сортової заготовки характеризується такими дефектами як задирки (або завал кромки) і зминання (затяжка) кінців розкату [397]. Очевидно,

що при оптимальному профілюванні ножів можна домогтися задоволення вимог до якості розрізання, знизити показники браку і підвищити вихід придатного металопрокату.

Отже якість поділу має задовольняти основним вимогам, що пред'являються до сортового прокату, зокрема [393]: забезпечувати задану точність по довжині; формувати прямий зріз; мінімізувати зминання (затяжку) кінців заготовки та явище задирок.

Крім того, з огляду на те, що квадратна заготовка на даних ножицях ріжеться по діагоналі, ще одним показником якості розрізання є ромбічність поверхні перерізу, яка проявляється у вигляді викривлення геометричної форми поперечного перерізу і відхиляється від вихідного квадрату за рахунок різниці діагоналей. Величина ромбічності має істотне значення для подальшої прокатки заготовок, оскільки від цього залежить їх самовстановлення в калібрі.

Визначення оптимальної форми профілювання фасонного ножа для поділу квадратної заготовки в гарячому стані можна виконувати шляхом математичного моделювання на базі методу скінченних елементів [398, 399].

Безпосередньо дослідження проводили в два етапи.

На першому етапі, шляхом використання тривимірної математичної моделі поперечного розділення на ножицях квадратних сортових заготовок в гарячому стані (див. п. 4.1.2), був реалізований повний факторний план 2^4 і отримані результати симуляцій процесу.

Рівні варіювання факторів при реалізації моделювання процесу розділення квадратної заготовки в гарячому стані профільованими ножами обирались відповідно до виробничих умов та наведені у табл. 7.7.

В результаті були отримані профілі форми торцевої поверхні заготовки після розділення, які підтверджують, що її формоутворення істотно залежить від конфігурації ножа та умов реалізації процесу.

При обробці отриманих результатів моделювання проводилися заміри геометричних параметрів торцевої поверхні після розрізання за схемою, що представлена на рис. 7.8.

Таблиця 7.7 – Рівні варіювання факторів при реалізації моделювання процесу поділу квадратної заготовки в гарячому стані профільованими ножами

№	Найменування параметру	Фактори	Одиниці вимірювання	Рівні варіювання	
				min	max
1	Температура	T	°C	800	1000
2	Розмір квадрату	h	мм	100	150
3	Кут розкриття ножів	α	градус	90	98
4	Ухил контактних поверхонь	β	градус	3	11

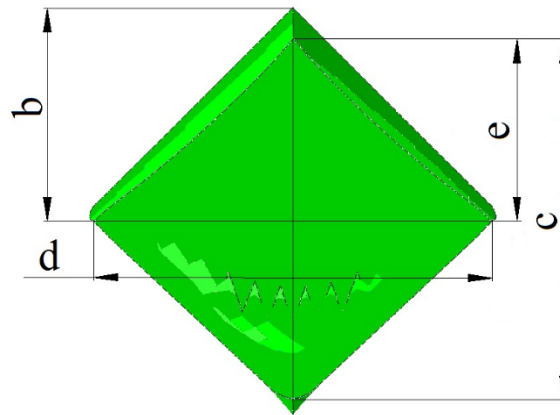


Рисунок 7.8 – Схема вимірів геометричних параметрів торцевої поверхні заготовки після розділення на ножицях

За результатами замірів були розраховані три відносних параметра форми, два з яких характеризують зминання і загин кінців заготовки k_b і k_e , а ще один – ромбічність k_d торцевої поверхні:

$$\begin{aligned}
 k_b &= b / (\sqrt{2}h), \\
 k_e &= e/c, \\
 k_d &= d/c,
 \end{aligned}
 \tag{7.22}$$

де $\sqrt{2}h$ – вихідна діагональ квадратної заготовки зі стороною h .

В ході обробки результатів для вказаних відносних параметрів були отримані лінійні регресійні рівняння як функція 4-х параметрів (див. табл. 7.7).

На другому етапі дослідження вирішували оптимізаційну задачу пошуку мінімуму цільової функції:

$$F(\alpha, \beta) = \max[k_d] = \max \begin{bmatrix} k_d(T_{\min}, h_{\min}, \alpha, \beta) \\ k_d(T_{\min}, h_{\max}, \alpha, \beta) \\ k_d(T_{\max}, h_{\min}, \alpha, \beta) \\ k_d(T_{\max}, h_{\max}, \alpha, \beta) \end{bmatrix}, \quad (7.23)$$

З накладанням обмежень:

$$\left\{ \begin{array}{l} \alpha_{\min} \leq \alpha \leq \alpha_{\max} \\ \beta_{\min} \leq \beta \leq \beta_{\max} \\ \max([k_e], [k_b]) \leq 0,5(1 + \Delta) \\ \min([k_e], [k_b]) \leq 0,5(1 - \Delta) \end{array} \right\}, \quad (7.24)$$

де Δ – граничне відхилення змінання і загину кінців (параметри k_b і k_e).

Для вирішення задачі пошуку оптимальних значень α та β використовували метод узагальненого приведенного градієнта, шляхом використання надбудови «Пошук рішення» в Excel [400].

За результатами планованого експерименту розмах значень відносних параметрів форми склав: $k_b = 0,458 \dots 0,541$; $k_e = 0,456 \dots 0,523$; $k_d = 1,091 \dots 1,182$.

Вирішення задачі оптимізації залежить від вимог, що висуваються до форми кінця заготовки після розрізання, насамперед від граничного відхилення Δ параметрів k_b і k_e . На рис. 7.9 представлені залежності значень кутів α (рис. 7.9, а) та β (рис. 7.9, б) профілювання ножів, а на рис. 7.10 залежності мінімальних і максимальних значень відносних параметрів форми k_d (рис. 7.10, а), k_b і k_e (рис. 7.10, б) від граничного відхилення Δ .

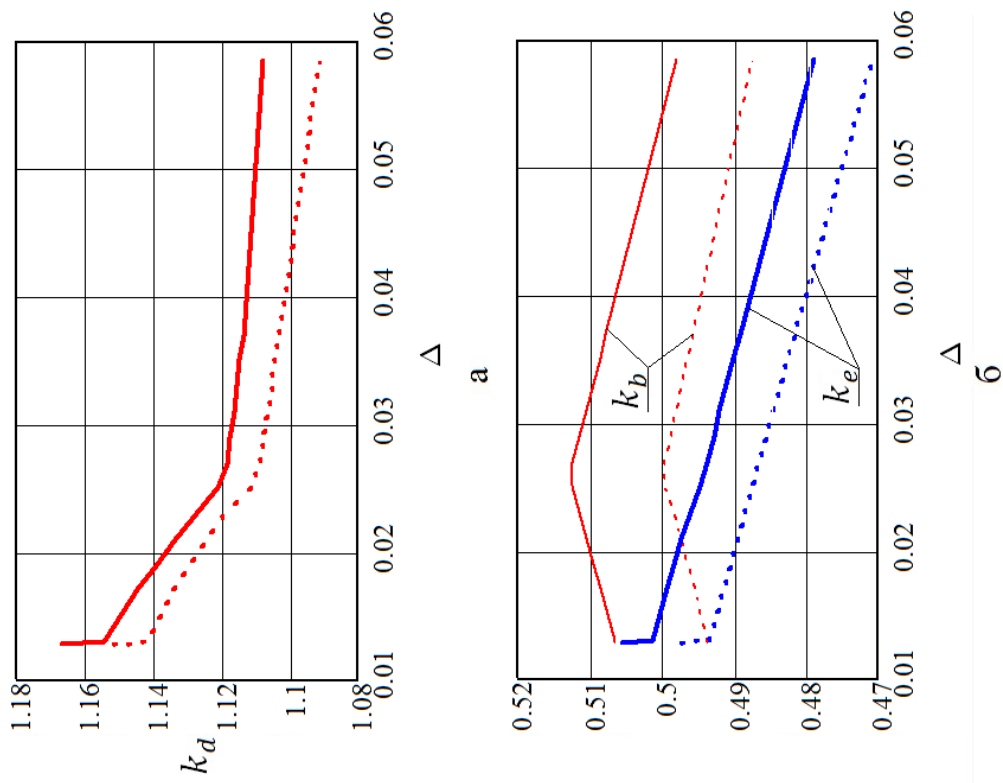


Рисунок 7.10 – Залежності мінімальних (---) і максимальних (—) значень відносних параметрів форми k_d (а), k_b і k_e (б) від граничного відхилення змінання і загину кінців Δ

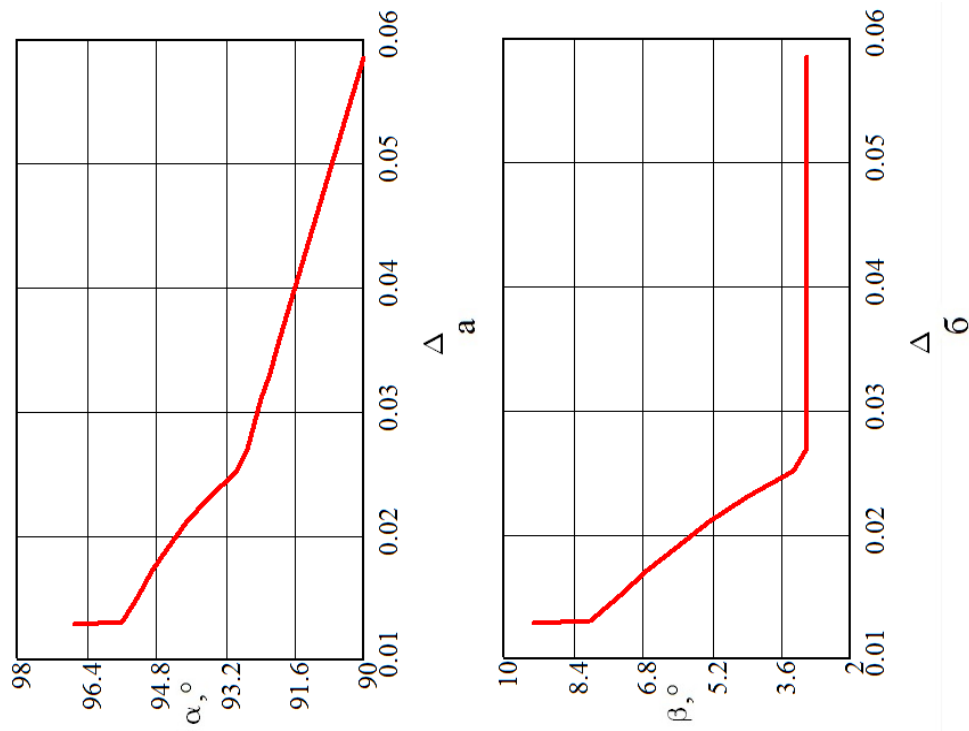


Рисунок 7.9 – Залежності оптимальних значень кутів α (а) та β (б) профілювання ножів від граничного відхилення змінання і загину кінців Δ

Як можна бачити з приведених графіків, в досліджуваному діапазоні параметрів (див. табл. 7.7), на оптимальне рішення має суттєвий вплив величина граничного відхилення зминання і загину кінців в межах $\Delta = 0,0128 \dots 0,0585$. При цьому подальше зменшення Δ не дозволяє знайти оптимального рішення, а подальше збільшення не має сенсу, оскільки кут розкриття ножів α та ухил контактних поверхонь β сягають своїх мінімальних значень.

Крім того, слід зазначити, що β приймає мінімальне значення вже при $\Delta = 0,0258$ (див. рис. 7.9, б), чим і пояснюються зміни в поведінці α (див. рис. 7.9, а), k_d (див. рис. 7.10, а) та k_b (див. рис. 7.10, б).

Також слід звернути увагу на різкий стрибок показників при зменшенні Δ з 0,0129 до 0,0128, що відповідає досягненню мінімально можливого значення Δ .

Вочевидь, за умови мінімізації граничного відхилення зминання і загину кінців та дотримання вказаного вище діапазону температур T та розмірів заготовок h , оптимальними слід вважати $\alpha = 95,58^\circ$ та $\beta = 8,04^\circ$. Проте, у разі, якщо вимоги до граничного відхилення Δ , можуть бути пом'якшені, або умови реалізації процесу змінені, то і оптимальні значення мають бути змінені відповідно.

7.2.3 Умова захоплювання листового прокату дисковими ножицями на початкових стадіях процесу розрізання

Для визначення граничної товщини розкату з умови захоплювання дисковими ножами розглянемо розрахункову схему [401-403], представлену на рисунку 7.11.

Виходячи з отриманої схеми, вочевидь, що захоплювання відбудеться за умови, коли сума сил втягування – горизонтальних проекцій F_{T1} , F_{T2} буде більше суми сил виштовхування – горизонтальних проекцій N_1 , N_2 тобто:

$$F_{T1} \cdot \cos(\alpha_1) + F_{T2} \cdot \cos(\alpha_2) > N_1 \cdot \sin(\alpha_1) + N_2 \cdot \sin(\alpha_2), \quad (7.25)$$

де α_1, α_2 – кутові координати точок захоплення відносно центру верхнього і нижнього ножа відповідно.

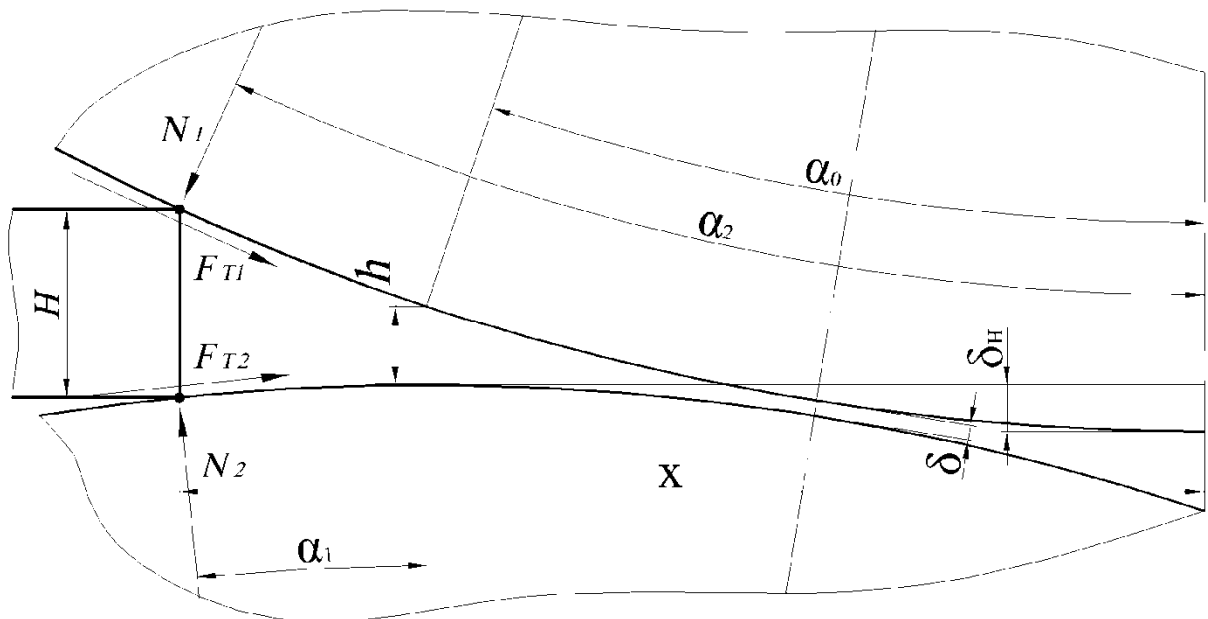


Рисунок 7.11 – Розрахункова схема осередка контакту ножів зі смугою при розрізанні дисковими ножицями з двома приводними ножами [401, 402]

Сили тертя F_{T1}, F_{T2} можна представити як:

$$F_{T1} = N_1 \cdot f_1, \quad (7.26)$$

$$F_{T2} = N_2 \cdot f_2, \quad (7.27)$$

де f_1, f_2 – коефіцієнти тертя між листом та верхнім і нижнім ножем відповідно, враховуючи, що обидва диска, як правило, виконуються з однакового матеріалу можна прийняти:

$$f_1 = f_2 = f'. \quad (7.28)$$

Виходячи з цього, N_2 можна представити таким чином:

$$N_2 = N_1 \cdot \cos(\alpha_1) + N_1 \cdot f' \cdot \sin(\alpha_1). \quad (7.29)$$

Підставивши вирази (7.26)–(7.29) в вираз (7.25) і скоротивши N_1 , Отримаємо наступне:

$$f' \cdot \cos(\alpha_1) - \sin(\alpha_1) + \frac{\cos(\alpha_1) + f' \cdot \sin(\alpha_1)}{\cos(\alpha_2) + f' \cdot \sin(\alpha_2)} \cdot [f' \cos(\alpha_2) - \sin(\alpha_2)] > 0 \quad (7.30)$$

Вирішивши нерівність (7.30) щодо f' отримаємо вираз, щодо умови захоплення ножами листа в процесі розрізання на дискових ножицях:

$$f' > \frac{1 - \cos(\alpha_1 + \alpha_2)}{\sin(\alpha_1 + \alpha_2)}. \quad (7.31)$$

При цьому слід розуміти, що f' – це якийсь усереднений коефіцієнт тертяковзання, який залежить не тільки від властивостей розрізуваного матеріалу, а й від кінематики реалізації процесу.

7.2.4 Взаємозв'язок кінематичних і енергосилових параметрів реалізації процесу поздовжнього розрізання дисковими ножами

Спираючись на результати моделювання МСЕ (див. розділ 5) процесу поздовжнього розрізання товстих листів дисковими ножами був розроблений алгоритм, що дозволяє уточнити розподіл навантаження між ножами, а також отримати зв'язок між енергосилових і кінематичними параметрами процесу.

З цією метою були отримані залежності силових і кінематичних параметрів, а саме моментів і сил на верхньому і нижньому ножах, а також лінійної швидкості листа, які були використані при подальшому аналізі та розробці алгоритму [404].

Слід зазначити, що при реалізації процесу розрізання товстих листів дисковими ножами момент на верхньому ножі завжди менше моменту на нижньому ножі [276], а їх величина і співвідношення істотно залежать, перш за все, від сили зовнішнього опору Q_f .

Це пояснюється тим, що на контакті між верхнім ножом і відрізуваною крошкою мають місце зони випередження і відставання, розмір яких залежить від сили зовнішнього опору Q_f , що повністю підтверджується результатами моделювання (див. рис. 5.6 і 5.7) і експериментальними даними роботи [276] і цього дослідження (див. підрозділ 6.3).

У зв'язку з цим, при розрахунку величин моментів на верхньому і нижньому ножі, слід використовувати поняття приведених значень коефіцієнтів тертя, які були визначені як:

$$f_1 = \frac{M_1}{R \cdot N_1} \text{ і } f_2 = \frac{M_2}{R \cdot N_2}, \quad (7.32)$$

де M_1 і M_2 – відповідно крутний момент на верхньому і нижньому ножі;

R – радіус диска ножа;

N_1 і N_2 – відповідно радіальні сили на верхньому і нижньому ножі.

Вочевидь, що потужність, котра витрачається на розрізання і рух (втягування) листа парою ножів можна визначити з наступного рівняння:

$$W_{\Sigma} = (M_1 + M_2) \frac{V_o}{R}, \quad (7.33)$$

де V_o – окружна швидкість ножа.

У той же час, розглядаючи лінійний рух листа в ножах сумарну потужність можна уявити, як суму:

$$W_{\Sigma} = W_a + W_s, \quad (7.34)$$

де W_a і W_s – відповідно потужність активних (втягування) сил і сил ковзання, спроектованих на горизонталь:

$$W_a = F_a V_l = (N_1 \cos(\gamma_1) f_1 + N_2 \cos(\gamma_2) f_2) V_l = (N_{1y} f_1 + N_{2y} f_2) V_l, \quad (7.35)$$

$$W_s = F_s V_l = N_2 \cos(\gamma_2) f_{ск} V_l = N_{2y} f_{ск} V_l, \quad (7.36)$$

де γ_1 і γ_2 – відповідно кути, що визначають напрямок радіальних сил на верхньому і нижньому ножі по відношенню до вертикальної осі диска;

N_{1y} і N_{2y} – відповідно вертикальні компоненти радіальних сил на верхньому і нижньому ножі;

$f_{ск}$ – коефіцієнт ковзання:

$$f_{ск} = \frac{V_o - V_l}{V_l} f_2 (a + bf + cf^2), \quad (7.37)$$

де f – коефіцієнт тертя між ножем і листом, який можна приймати рівним для умов прокатки [389];

a, b, c – коефіцієнти регресії, які за результатами моделювання, для діапазону коефіцієнта тертя $f = 0,3 \dots 0,55$, склали: $a = 2,76$; $b = -3,44$; $c = 4,69$.

Кути напрямку радіальних сил знаходять, як:

$$\gamma_1 = \arctg(N_{1x}/N_{1y}) \text{ і } \gamma_2 = \arctg(N_{2x}/N_{2y}), \quad (7.38)$$

де N_{1x} и N_{2x} – відповідно горизонтальні компоненти радіальних сил на верхньому і нижньому ножі.

При цьому величина зовнішнього опору визначається з умови рівноваги:

$$Q_f = N_{2x} - N_{1x}. \quad (7.39)$$

Остаточно, прирівнявши (7.33) і (7.34) з використанням (7.35) і (7.36), після нескладних перетворень отримаємо рівняння для швидкості руху листа:

$$V_n = \frac{N_1 f_1 + N_2 f_2 [1 - \cos(\gamma_2)(a + bf + cf^2)]}{N_1 f_1 \cos(\gamma_1) + N_2 f_2 \cos(\gamma_2) [1 - (a + bf + cf^2)]} V_o. \quad (7.40)$$

Програмна реалізація рішення здійснювалася в середовищі системи автоматизації математичних розрахунків Mathcad.

На рис. 7.12, в якості порівняння, представлені залежності швидкості руху листа за результатами моделювання МСЕ і з рівняння (7.40) з використанням розрахункових залежностей, отриманих при моделюванні МСЕ. Різниця між отриманими результатами не перевищила 3%.

Таким чином, можна стверджувати, що запропонований алгоритм розрахунку швидкості руху листа при розрізанні дисковими ножами може бути використаний при інженерних і проектно-конструкторських розрахунках процесу розрізання товстих листів дисковими ножами.

Крім того, слід зазначити, що отримані результати підтверджують, що швидкість розрізання листів дисковими ножами нижче окружної швидкості ножів і істотно залежить від сил зовнішнього опору. При цьому величина коефіцієнта тертя мало впливає на сталу швидкість листа, при відсутності сил зовнішнього опору,

яка в модельованих умовах складала $(0,9 \dots 0,95)V_0$, однак при наявності сил зовнішнього опору зі зменшенням коефіцієнта тертя швидкість листа знижується більш інтенсивніше.

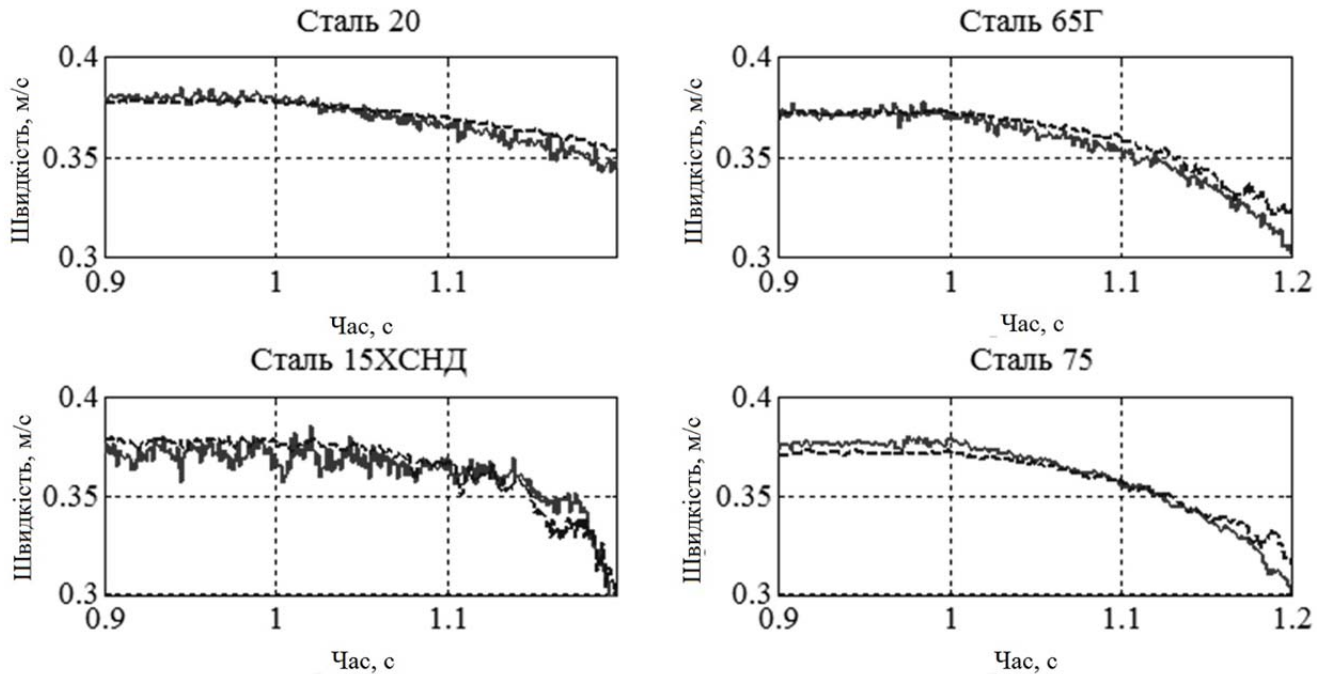


Рисунок 7.12 – Залежності швидкості руху листа за результатами моделювання МСЕ (—) і з рівняння (7.42) (---) для різних умов реалізації процесу

7.3 Проектування і вдосконалення конструкцій обладнання процесу поперечного розрізання листового металопрокату шевронними ножами

Як було показано в підрозділі 4.2, стосовно процесу поперечного розрізання листів шевронними ножами використання ножів з постійним (нерегульованим) кутом нахилу різальних кромek не дозволяє задовольнити вимоги до якості зрізу. При цьому граничні значення навантажень, що діють на ножиці, досягаються тільки в дуже обмеженій кількості випадків. У більшості випадків навантаження на ножиці істотно нижче.

Крім того, було відзначено (див. п. 7.2.1), що при зменшенні кута нахилу різальних кромок з 3° до 1° відбувається істотне поліпшення якості зрізу особливо для «м'яких» сталей.

Таким чином, вдосконалення процесу поперечного розрізання шевронним ножом представляється можливим шляхом розробки конструкції шевронного ножа з регульованим кутом похилих поверхонь.

Так на рис. 7.13 представлена принципова схема шевронного ножа з регульованим кутом нахилу різальних поверхонь і кінематична схема (для одного ножа в силу симетрії) механізму регулювання [405].

Слід зазначити, що в кінематичній схемі двокривошипного механізму обидва кривошипи є приводними.

Розглянемо кінематичний аналіз даного механізму. Для цього встановимо початок координат системи в точці $O(x_o, y_o)$, яка є вершиною сходження похилих ножів, а координати центрів кривошипів – $A(x_A, y_A)$ і $B(x_B, y_B)$.

Встановимо, що R_A – радіус кривошипа AC , тоді координати точки C , можна визначити:

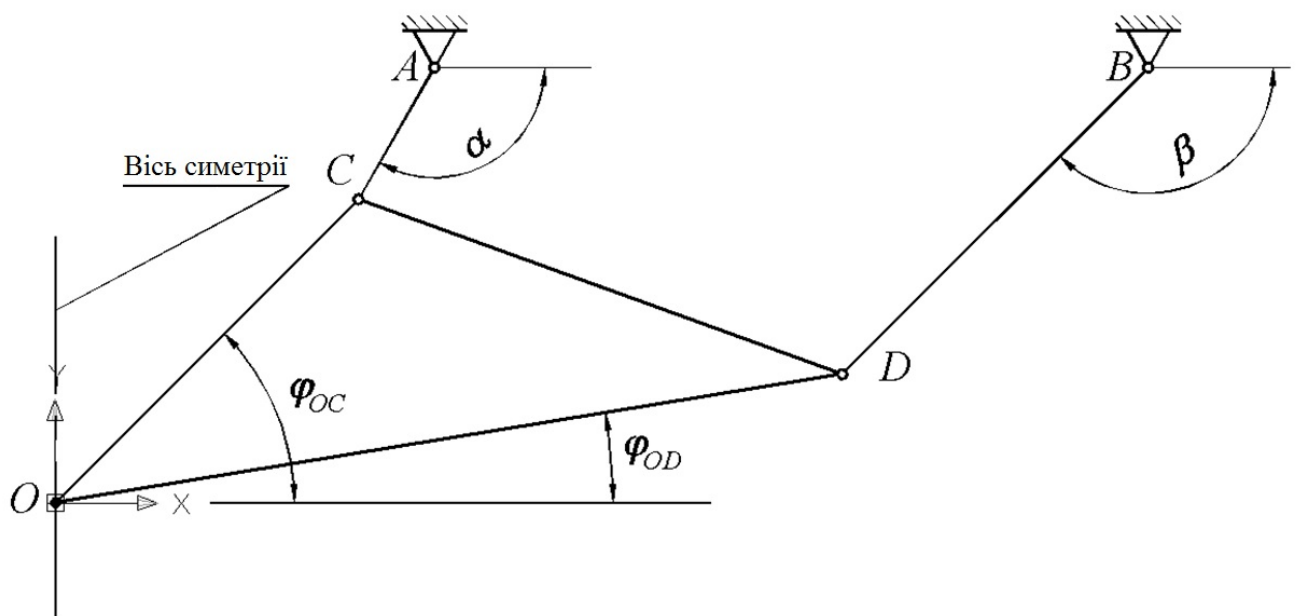
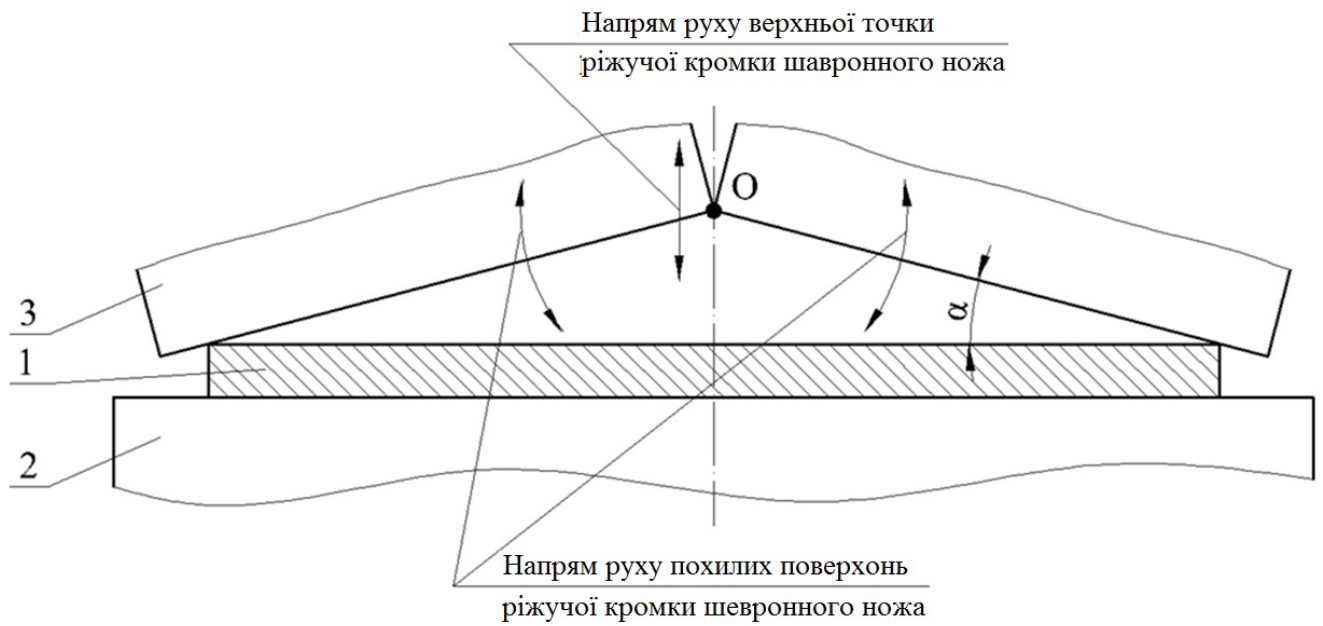
$$\begin{aligned} x_C &= x_A + R_A \cos(\alpha); \\ y_C &= y_A - R_A \sin(\alpha). \end{aligned} \quad (7.41)$$

При цьому кут між відрізком OC і горизонталлю складе:

$$\phi_{OC} = \arctan\left(\frac{y_C - y_o}{x_C - x_o}\right). \quad (7.42)$$

Відповідно довжину відрізка OC можна знайти:

$$L_{OC} = \sqrt{(x_C - x_o)^2 + (y_C - y_o)^2}. \quad (7.43)$$



б

Рисунок 7.13 – Принципова схема (а) шевронного ножа з регульованим кутом нахилу різальних поверхонь і кінематична схема (б) механізму регулювання

Якщо задати координати точки $D(x_D, y_D)$ в початковому положенні системи, то по аналогії з (7.42) і (7.43), можна знайти:

$$\phi_{OD} = \arctan\left(\frac{y_D - y_O}{x_D - x_O}\right), \quad (7.44)$$

$$L_{OD} = \sqrt{(x_D - x_O)^2 + (y_D - y_O)^2}. \quad (7.45)$$

Потім, поставивши величину приросту кута α , дотримуючись умови $x_O = const$, При незмінних значеннях L_{OC} і L_{OD} можна, використовуючи (7.41)–(7.45), визначити для кожного значення α відповідні координати точок C , D , O і кути φ_{OC} , φ_{OD} .

Точка D рухається по траєкторії дуже близькій до кола, визначивши її координати в трьох положеннях кута повороту α – початковому $D_s(x_{D_s}, y_{D_s})$, кінцевому $D_e(x_{D_e}, y_{D_e})$ і середньому $D_m(x_{D_m}, y_{D_m})$, можна знайти координати точки B і радіусу R_B другого кривошипа BD з рішення системи:

$$\begin{cases} (x_{D_s} - x_B)^2 + (y_{D_s} - y_B)^2 = R_B^2; \\ (x_{D_m} - x_B)^2 + (y_{D_m} - y_B)^2 = R_B^2; \\ (x_{D_e} - x_B)^2 + (y_{D_e} - y_B)^2 = R_B^2. \end{cases} \quad (7.46)$$

Кут повороту кривошипа B при цьому можна визначити, як:

$$\beta = \arctan\left(\frac{y_B - y_D}{x_D - x_B}\right) + \pi. \quad (7.47)$$

Необхідне передавальне число між кутами повороту кривошипів A і B ,
Можна визначити зі співвідношення:

$$U_{AB} = \frac{\beta_e - \beta_s}{\alpha_e - \alpha_s}, \quad (7.48)$$

де e і s – індекси відповідні кінцевому і початкового стану кривошипів.

Програмна реалізація рішення здійснювалася в середовищі системи автоматизації математичних розрахунків Mathcad.

У таблиці 7.8, в якості прикладу, наведені результати автоматизованого прорахунку для умов коли центри кривошипів мають координати A (300; 315) і B (845; 536), радіуси кривошипів $R_a = 25$ мм; $R_b = 199$ мм, міжосьова відстань між центрами кривошипів 588,1 мм, а необхідне передаточне число $U = 3,87$.

Таблиця 7.8 – Результати автоматизованого прорахунку кінематики механізму регулювання кута похилих поверхонь шевронного ножа

Кути повороту кривошипів		Кут нахилу ножів	Координати точки O (вершина сходження кромки)	
$\Delta\alpha, ^\circ$	$\Delta\beta, ^\circ$	$\gamma, ^\circ$	$x, \text{мм}$	$y, \text{мм}$
0	0	3,0	0,0228	0
5,9	1,52	2,5	0,0143	-2,236
11,98	3,09	2,0	0,0081	-4,163
18,3	4,74	1,5	0,0057	-5,757
25,03	6,48	1,0	-0,0093	-6,961

Конструктивне виконання шевронного ножа з регульованим кутом нахилу різальних кромки [406], може бути реалізоване у вигляді механізму представленого на рис. 7.14.

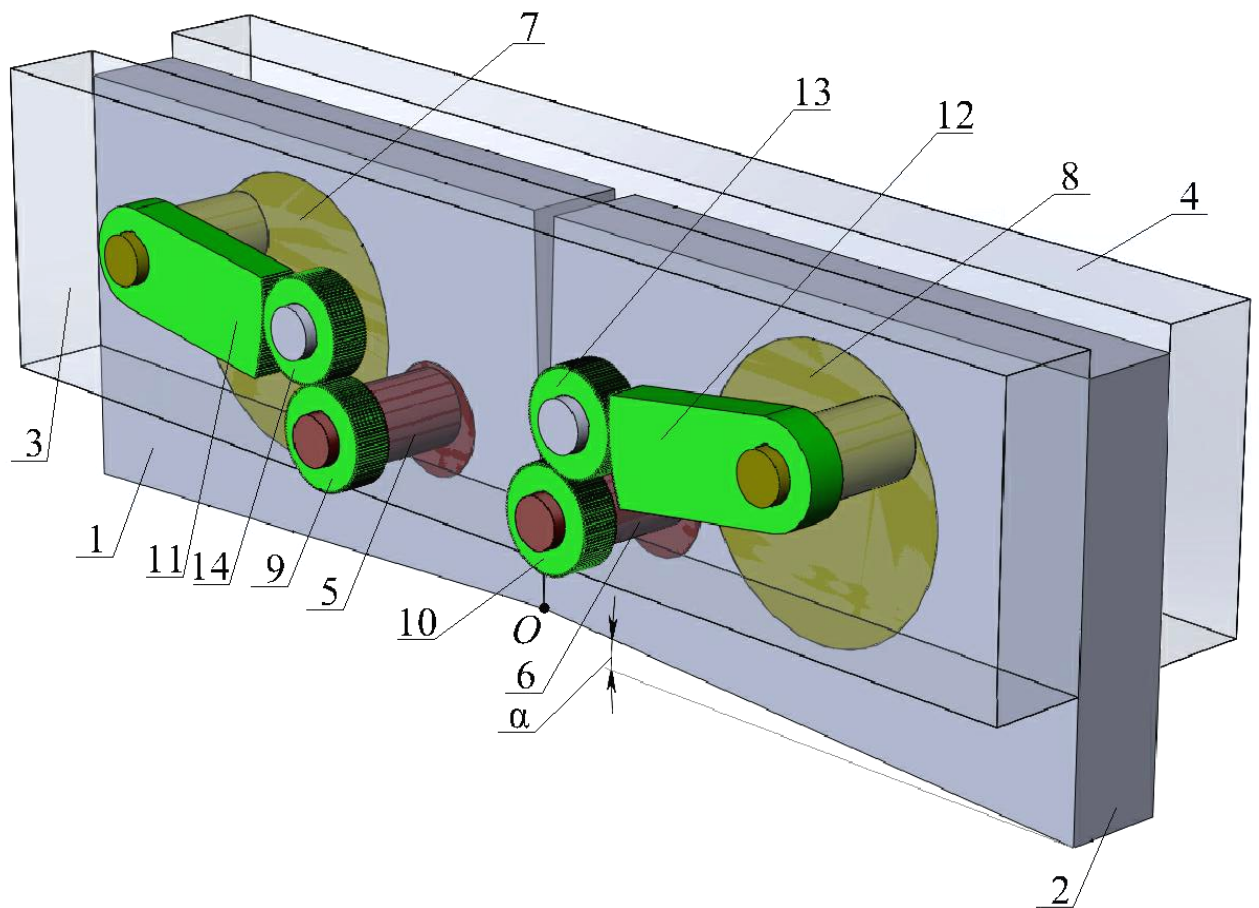


Рисунок 7.14 – Конструктивне виконання ножа з регульованим кутом нахилу різальних площин

Регулювання кута α нахилу прямолінійних площин різальної кромки пропонуваного шевронного ножа виконується шляхом зміни положення сегментів 1 і 2 відносно нерухомих частин супорта 3, 4, за рахунок обертання кривошипів 5, 6, 7, 8, при цьому на осях кривошипів 5, 6 жорстко закріплені зубчасті шестерні 9, 10 введені в зачеплення з зубчастими сегментами-водилами 11, 12 за допомогою паразитних шестерень 13, 14. При цьому приведення в дію механізму регулювання можна здійснювати, як шляхом обертання шестерень 9, 10, так і шестерень 13, 14

Крім того, як було показано в пункті 4.2.1 і підтверджено експериментально (див. пункт 6.1.3) досить ефективним є рішення, спрямоване на підвищення якості розрізання шевронними ножами комплектом V-шеvronних ножів [407, 408] для поперечного розрізання листового матеріалу (рис. 7.15).

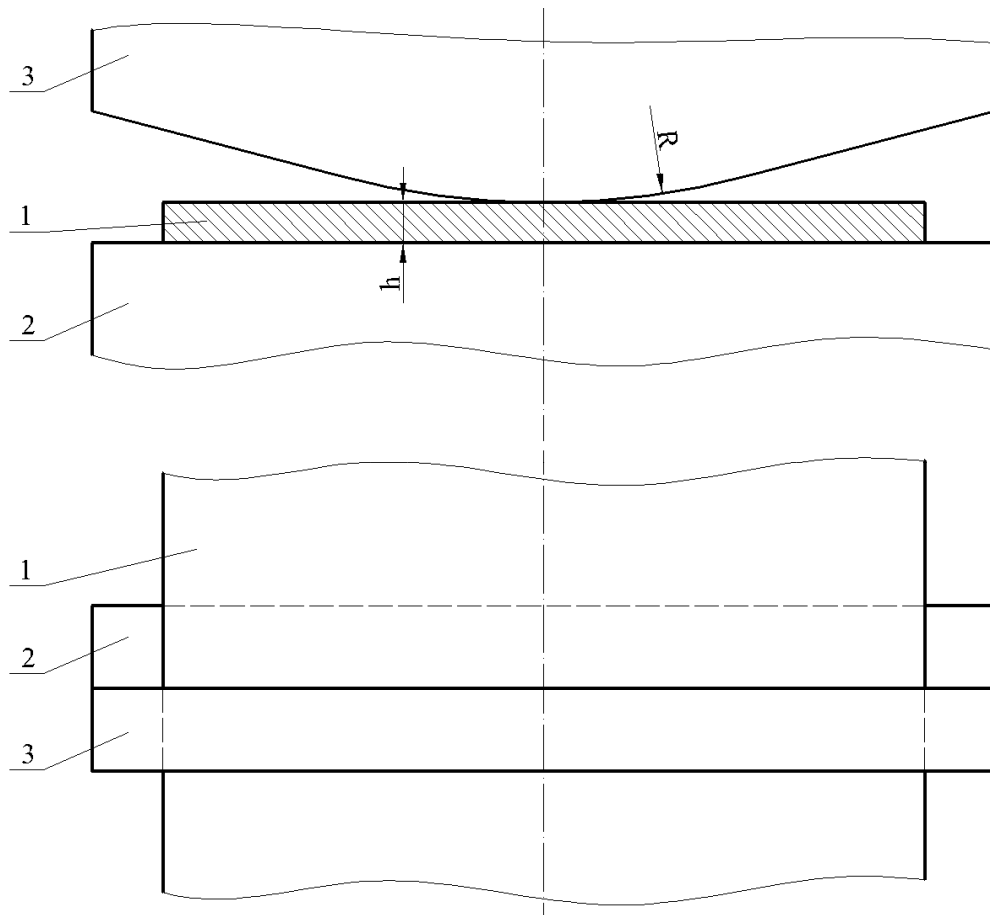


Рисунок 7.15 – Комплект V-шеvronних ножів поперечного розрізання

Підтвердженням ефективності запропонованого технічного рішення є результати математичного моделювання методом скінченних елементів процесу поперечного розрізання листового металопрокату шириною 1000 (мм) товщиною 25 (мм) зі сталі Ст2пс, V-шеvronним ножем запропонованої конструкції, ножем класичної шевронної форми різальної кромки, і шевронним ножем з горизонтальною площиною довжиною 238 (мм) в вершині сходження прямолінійних площин різальної кромки. При цьому радіус заокруглення різальної кромки запропонованого ножа становив 5000 (мм).

Кут нахилу похилих прямолінійних площин різальної кромки для всіх ножів приймався рівним 3° . За показник деформованого стану листа бралася величина максимального зсуву Δu в вертикальному напрямку нижньої межі на торцевій поверхні відрізуваної частини щодо горизонталі після завершення процесу розрізання.

На рис. 7.16 наведено графік зміни величини Δy в міру віддалення від центру до краю листа X (рис. 7.16, а), а також розподіл величини сили розрізання N в залежності від переміщення ножа S (рис. 7.16, б).

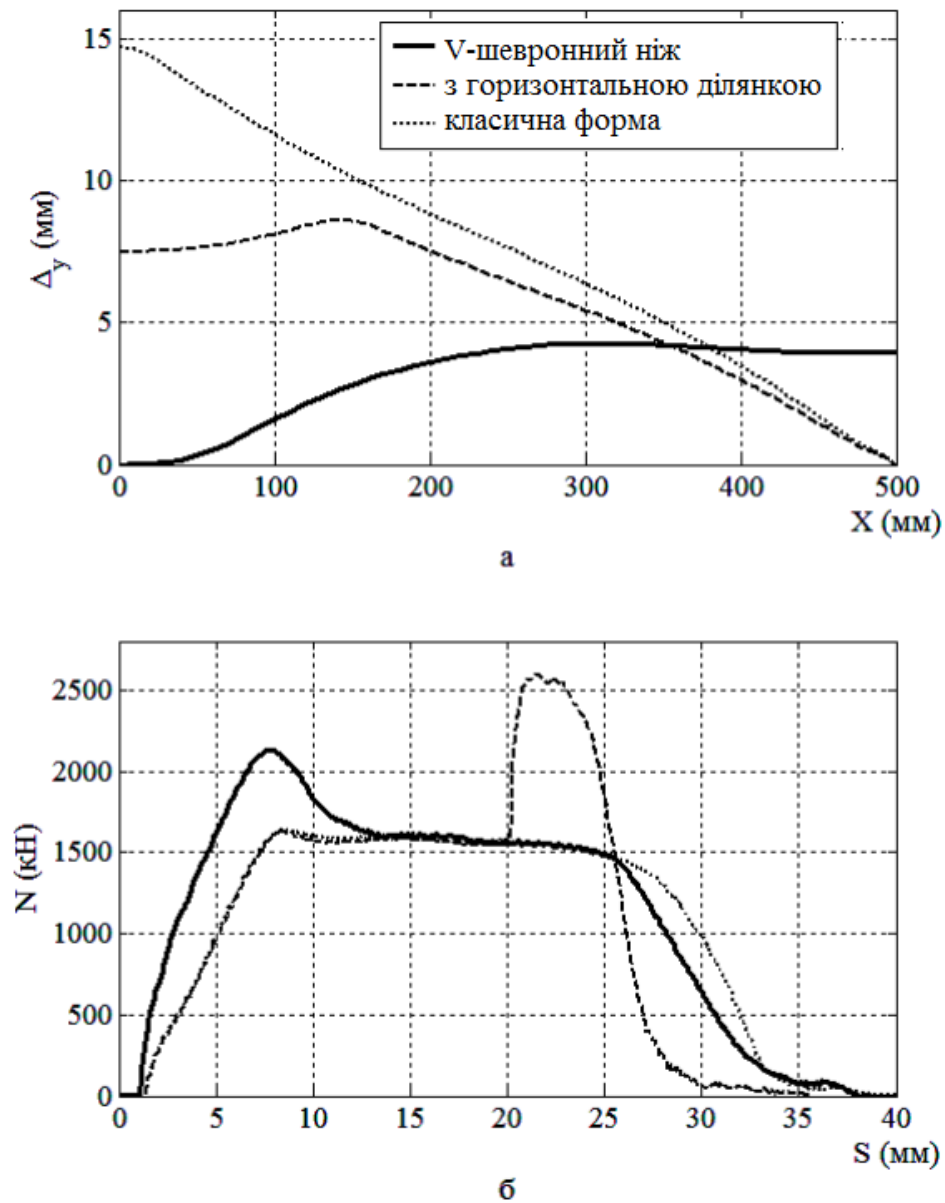


Рисунок 7.16 – Порівняння результатів процесу поперечного розрізання листового металопрокату шириною 1000 (мм) товщиною 25 (мм) зі сталі Ст2пс, шевронними ножами різних конструкцій: а – залишкова деформація; б – сила розрізання

Результати показують, що при однакових початкових умовах розрізання, застосування комплекту ножів запропонованої конструкції дійсно призводить до зниження величини залишкової деформації на $\approx 71\%$ в порівнянні з шевронним ножем класичної конструкції і на $\approx 50,4\%$ на відміну від шевронного ножа з горизонтальною площадкою, причому в порівнянні з останнім менша залишкова деформація досягається при більш низьких енергосилових параметрах процесу розділення. Менша величина залишкової деформації листа після розрізання при застосуванні комплекту ножів запропонованої конструкції, в свою чергу, свідчить про можливість отримання листів більш високої якості, ніж при застосуванні ножів відомих конструкцій.

7.4 Методика розрахунку силових параметрів процесу розділення фасонних профілів на ножицях

Як зазначалося в п. 4.3.4 необхідно розробити уточнені методики з визначення сили розрізання для кожного окремого профіля, що сприятиме більш коректному визначенню сортаменту, котрий припустимо різати на ножицях певної конструкції [409].

За аналогією з роботою [276], в основу методики розрахунку силових параметрів процесу розділення фасонних профілів на ножицях, була покладена одновимірною математичною моделлю процесу розрізання паралельними і фасонними ножами, яка базується на чисельному рекурентному рішенні скінченно-різницевої форми статичної рівноваги за визначенням геометричних характеристик і енергосилових параметрів в рамках кожного окремо виділеного елементарного об'єму осередку розрізання (рис. 7.17).

Аналітичні залежності сили розрізання, стосовно до простих форм поперечного перерізу розрізуваної заготовки, можуть бути отримані в результаті розбиття осередку розрізання на скінченну множину виділених елементарних об'ємів (площею ds) з подальшим інтегруванням.

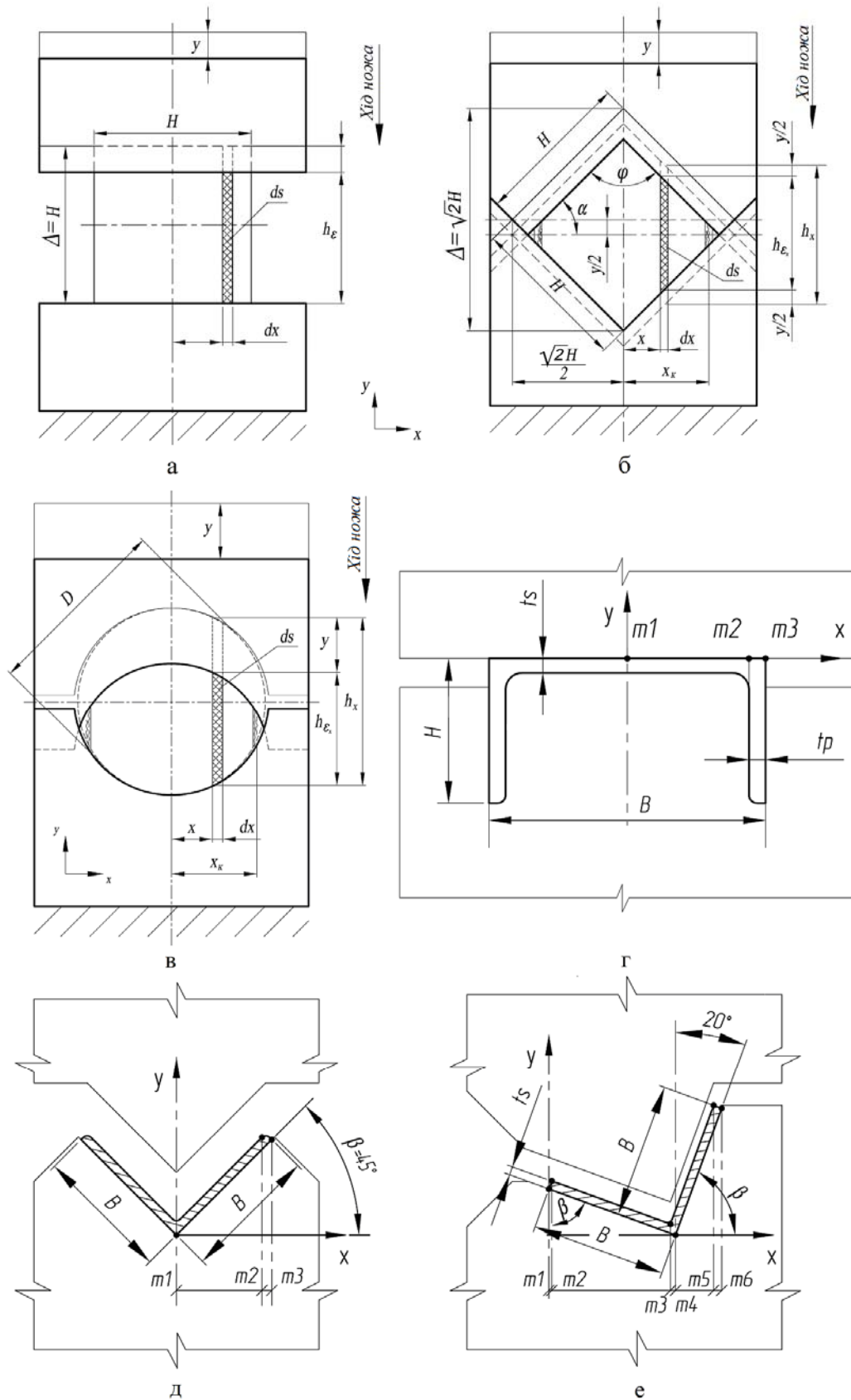


Рисунок 7.17 – Схеми до визначення сили розрізання квадратної заготовки паралельними (а) і фасонними (б) ножами, круглої заготовки (в), швелера (г), кутика при симетричному (д) і несиметричному (е) розташуванні

Силу розрізання, в загальному вигляді, прийнято визначати в такий спосіб [13, 14, 40-43]:

$$P(\varepsilon) = \int_s \tau_\varepsilon ds, \quad (7.49)$$

де τ_ε – опір зрізу, при відносній глибині проникнення ε ;

ds – залишкова площа виділеного елементарного об'єму розрізуваного перерізу.

При цьому для визначення опору розрізанню використовували залежність наведену в роботі [276]:

$$\tau_\varepsilon = \frac{1,41 \cdot \sigma_b}{1,74 - \varepsilon_n} (\varepsilon / \varepsilon_n)^{\alpha_\tau}, \quad (7.50)$$

α_τ – ступеневий показник, що характеризує форму розподілу опору розрізанню [276].

Спираючись на рівняння (7.49) і (7.50), стосовно розрізання квадратної заготовки зі стороною H паралельними ножами (див. рис. 7.17, а), можна отримати залежність зміни сили розрізання від абсолютної величини зсуву ножа y (починаючи з моменту початку контакту ножа з заготівлею):

$$P(y) = \frac{1,41 \cdot \sigma_b}{1,74 - \varepsilon_n} \left(\frac{y}{\varepsilon_n \cdot H} \right)^{\alpha_\tau} \left(1 - \frac{y}{H} \right) \cdot H^2. \quad (7.51)$$

З огляду на експериментальні дані (див. підрозділ 6.2) та результати скінченно-елементного моделювання (див. підрозділ 4.1), була запропонована наступна залежність величини відносного проникнення ε_{n_x} розрізуваної ділянки перерізу з вихідної висотою h_x (див. рис. 7.17, б):

$$\varepsilon_{h_x}(h_x, \alpha) = 1 - \frac{1 - e^{-A(h_x/h_{\max})^{0,625}}}{1 - e^{-A}} \cdot (1 - \varepsilon_n (\cos \alpha)^2) \quad (7.52)$$

де h_{\max} – товщина заготовки, при якій значення відносного проникнення до сколювання ε_n асимптотично наближаються до свого мінімуму;

α – половина кута між різальними кромками верхнього і нижнього ножів (див. рис. 7.17,б), що при розрізанні квадрата паралельними ножами становить $\alpha = 0^\circ$, а фасонними – $\alpha = 45^\circ$;

A – емпіричний коефіцієнт, який визначається властивостями розрізуваного матеріалу і може бути визначений за результатами експериментальних значень відносного проникнення до сколювання по перерізу заготовок при розділенні фасонних заготовки паралельними та фігурними ножами (див. рис. 6.18). Наближено даний коефіцієнт можна визначити, скориставшись рівнянням (7.18) повної лінійної регресійної моделі відносного проникнення до сколювання при холодному розрізанні паралельними ножами, скориставшись наступним алгоритмом:

1) з рівняння (7.18) визначити, для відповідних механічних властивостей матеріалу та умов реалізації процесу, значення ε_n при $h_{\max} = 25$ мм, та ε_{n1} при $h_1 = 1$ мм;

2) враховуючи, що рівняння (7.18) визначає відносне проникнення до сколювання при холодному розрізанні паралельними ножами підставити в рівняння (7.52) $\alpha = 0^\circ$ та отримані значення, що після нескладних перетворень приведе (7.52) до виду:

$$\varepsilon_{n1} = 1 - \frac{1 - e^{-0,134A}}{1 - e^{-A}} \cdot (1 - \varepsilon_n); \quad (7.53)$$

3) вирішити рівняння (7.53), скориставшись будь-яким чисельним методом розв'язання нелінійних рівнянь.

Таким чином, використовуючи (7.49), (7.50) і (7.52) представляється можливим отримати залежність сили розрізання від абсолютної величини зсуву ножа y по діагоналі квадрата для фасонних ножів (див. рис. 7.17, б):

$$P(y) = 2 \int_0^{x_k} \frac{1,41 \cdot \sigma_b}{1,74 - \varepsilon_{H_x}} \left(\frac{\varepsilon_x}{\varepsilon_{H_x}} \right)^{\alpha_r} (\sqrt{2H} - 2x - y) dx, \quad (7.54)$$

де ε_x – відносне проникнення ножів в заготовку для перерізу, розташованого на відстані x від осі заготовки;

ε_{H_x} – відносне проникнення ножів до сколювання для перерізу, розташованого на відстані x від осі заготовки;

x_k – координата, де порушується суцільність розрізуваного перерізу, при сумарному зміщенні ножів на величину y :

$$x_k = \frac{\sqrt{2H} \cdot \varepsilon_{H_x} - y}{2\varepsilon_{H_x}}. \quad (7.55)$$

Розрахункова схема для обчислення сили розрізання дуговими фасонними ножами заготовки круглого перерізу представлена на рис. 7.17, в. Залежність сили розрізання від величини зсуву ножа y має такий вигляд:

$$P(y) = 2 \int_0^{x_k} \frac{1,41 \cdot \sigma_b}{1,74 - \varepsilon_{H_x}} \left(\frac{\varepsilon_x}{\varepsilon_{H_x}} \right)^{\alpha_r} (\sqrt{D^2 - 4x^2} - y) dx, \quad (7.56)$$

де D – діаметр розрізуваної заготовки;

x_k – координата, при якій закінчується суцільність металу розрізуваного перерізу, при сумарному зміщенні ножів на величину y :

$$x_k = 0,5\sqrt{D^2 - (y/\varepsilon_n)^2}. \quad (7.57)$$

При розділенні фланцевих заготовок різальна кромка верхнього ножа може відрізнятись від контуру нижнього ножа, як наприклад, при розрізанні швелера. Для обчислення сили розрізання швелера фасонними ножами, слід розглянути розрахункову схему, представлену на рис. 7.17, г.

При розташуванні швелера довгою гранню (стілкою) перерізу уздовж горизонталі профіль буде симетричний, відносно вертикалі, і можна розглянути тільки половину перерізу (див. рис. 7.17, г), виділивши характерні точки m_1, m_2, m_3 .

Залежність сили розрізання від величини зсуву ножа y наступна:

$$P(y) = \begin{cases} 2 \left[\int_{m1}^{m2} \frac{1,41 \cdot \sigma_b}{1,74 - \varepsilon_{n_x}(ts,0)} \left[\left(\frac{y/ts}{\varepsilon_{n_x}(ts,0)} \right)^{\alpha_r} (ts-y) \right] dx + \right. \\ \left. + \int_{m2}^{m3} \frac{1,41 \cdot \sigma_b}{1,74 - \varepsilon_{n_x}(H,0)} \left[\left(\frac{y/H}{\varepsilon_{n_x}(H,0)} \right)^{\alpha_r} (H-y) \right] dx \right], & \text{при } \frac{y}{\varepsilon_{n_x}(ts,0) \cdot ts} \leq 1; \\ 2 \left[\int_{m2}^{m3} \frac{1,41 \cdot \sigma_b}{1,74 - \varepsilon_{n_x}(H,0)} \left[\left(\frac{y/H}{\varepsilon_{n_x}(H,0)} \right)^{\alpha_r} (H-y) \right] dx \right], & \text{при } \frac{y}{\varepsilon_{n_x}(ts,0) \cdot ts} > 1, \end{cases} \quad (7.58)$$

де H – висота полиці;

tp – товщина полиці;

B – ширина стінки;

ts – товщина стінки.

При розділенні рівнобічного кутика, розглянемо два варіанти розташування:

1) куток розташовується симетрично щодо вертикальної осі (під кутом 45°), як показано на рис. 7.17, д;

2) куток розташовується несиметрично щодо вертикальної осі (під кутом від 0° до 45°), Як показано на рис. 7.17, е.

Для розрахунку сили розрізання профілю рівнобічного кутика фасонними ножами, при симетричному розташуванні також можна розглянути тільки половину перерізу.

У правій половині перерізу виділяємо точки, проекції яких на горизонтальну вісь, відлічувані від початку координат уздовж осі абсцис, при куті $\beta = 45^\circ$, такі: $m1 = 0$, $m2 = (H - ts)/\sqrt{2}$, $m3 = H \cdot \cos \beta/\sqrt{2}$.

Залежність сили розрізання від величини зсуву ножа y матиме вигляд:

$$P(y) = 2 \left[\int_{m1}^{m3} \frac{1,41 \cdot \sigma_b}{1,74 - \varepsilon_{h_x}(h_x, \alpha)} \left[\left(\frac{y/h_x}{\varepsilon_{h_x}(h_x, \alpha)} \right)^{\alpha_r} (h_x - y) \right] dx \right], \quad (7.59)$$

де H – висота стінки;

ts – товщина стінки.

При розрізанні фасонними ножами кутика, розташованого несиметрично відносно вертикалі (див. рис. 7.17, е). Характерні точки перелому функції на горизонтальній осі, відлічувані від початку координат наступні:

$$\begin{cases} m1 = 0; \\ m2 = ts \cdot \cos \beta; \\ m3 = H \cdot \sin \beta; \\ m4 = m2 + (H - ts) \cdot \sin \beta; \\ m5 = m4 + (H - ts) \cdot \cos \beta; \\ m6 = H \cdot \sin \beta + H \cdot \cos \beta. \end{cases} \quad (7.60)$$

Залежність сили розрізання від зсуву ножа y матиме такий вигляд:

$$P(y) = \int_{m1}^{m6} \frac{1,41 \cdot \sigma_b}{1,74 - \varepsilon_{h_x}(h_x, \alpha)} \left[\left(\frac{y/h_x}{\varepsilon_{h_x}(h_x, \alpha)} \right)^{\alpha_r} (h_x - y) \right] dx. \quad (7.61)$$

Використовуючи розроблену методику, можна отримати залежність зміни сили розрізання при розділенні профілів різного перерізу в функції зсуву ножів. Програмна реалізація рішення здійснювалася в середовищі системи автоматизації математичних розрахунків MatCad. Як приклад був виконаний розрахунок для профілів з алюмінієвого сплаву AA6063 ($\sigma_g = 390\text{МПа}$, $\varepsilon_n = 0,25$).

В якості порівняння в таблиці 7.9 наведені значення максимальних значень сили розрізання, визначених за розробленою методикою і методиками інших авторів [13, 14, 40-43] (при використанні відомих методик розрахунку максимальну силу розрізання визначали через площу квадрата еквівалентного за площею перерізу).

Таблиця 7.9 – Порівняльні значення максимальних значень сили розрізання

№ п/п	Розрізуваний профіль	Експеримент, кН	Розрахункові параметри						
			Сторона еквівалентного квадрата, мм	Целіков-Корольов, кН [13, 14, 41-43]	Похибка, %	Люленков [40], кН	Похибка, %	Розроблена, кН	Похибка, %
1	Квадрат 10x10мм	27,9	10	23,21	-16,8	25,46	-8,7	26,09	-6,5
2	Квадрат 10x10мм по діагоналі	29,3	10	23,21	-20,8	24,53	-16,3	30,15	+2,9
3	Круглий профіль Ø12 мм	30,4	10,63	26,22	-13,8	28,77	-5,4	31,50	+3,6
4	Швелер	16,8	8,63	17,28	+2,9	18,96	+12,9	15,68	-6,7
5	Кутик при симетричному розташуванні	23,5	8,8	17,97	-23,5	19,72	-16,1	25,57	+8,8
6	Кутик при несиметричному розташуванні	23,3	8,8	17,97	-22,9	19,72	-15,4	25,48	+9,4

На рис. 7.18-7.22 представлені розрахункові розподіли вихідної висоти h_x перерізу заготовки, відносного проникнення ε_x до сколювання і максимального

опору розрізанню $\tau_{\max x}$ по перерізу заготовки від осі симетрії до краю, а також сили розрізання P в залежності від переміщення y ножа для випадку розрізання фасонними ножами квадратної (рис. 7.18) і круглої (рис. 7.19) заготовки, а також швелера (рис. 7.20) і кутика при симетричному (рис. 7.21) і несиметричному (рис. 7.22) розташуванні.

Аналіз отриманих результатів вказує на те, що теоретичні залежності сили розрізання дають високий ступінь збіжності з експериментальними даними, а методика розрахунку дозволяє уточнити величину максимальної сили розрізання і розширити уявлення про розділові операції при поперечному розрізанні профільованих заготовок в холодному стані.

Для визначення спектру навантажень з урахуванням впливу факторів, що носять випадковий характер і обумовлені відхиленнями механічних властивостей матеріалу та геометрії перерізів проводились статистичні дослідження [379].

В ході імітаційного математичного моделювання процесу різання сортових профілів на ножицях [379] були досліджені кількісні і якісні закономірності варіацій основних технологічних параметрів процесу різання сортових профілів на ножицях та встановлено, що при розділенні окремо взятого розрізуваного профіля коефіцієнт варіації сили розрізання не перевищує 0,03, а тому при проектуванні сортових ножиць непотрібне застосування додаткових коефіцієнтів, крім тих що враховують зношення різальних кромek і, як наслідок, збільшення бічного зазору.

Основними перевагами даної методики розрахунку в порівнянні з відомими [13, 14, 40-43] є наступне:

- 1) розширено уявлення про причинно-наслідкові зв'язки реалізації процесу поперечного розрізання фасонного металопрокату на ножицях;
- 2) враховано реальну форму розрізуваного перерізу, за рахунок чого підвищено точність розрахунку інтегральних величин енергосилових параметрів процесу;

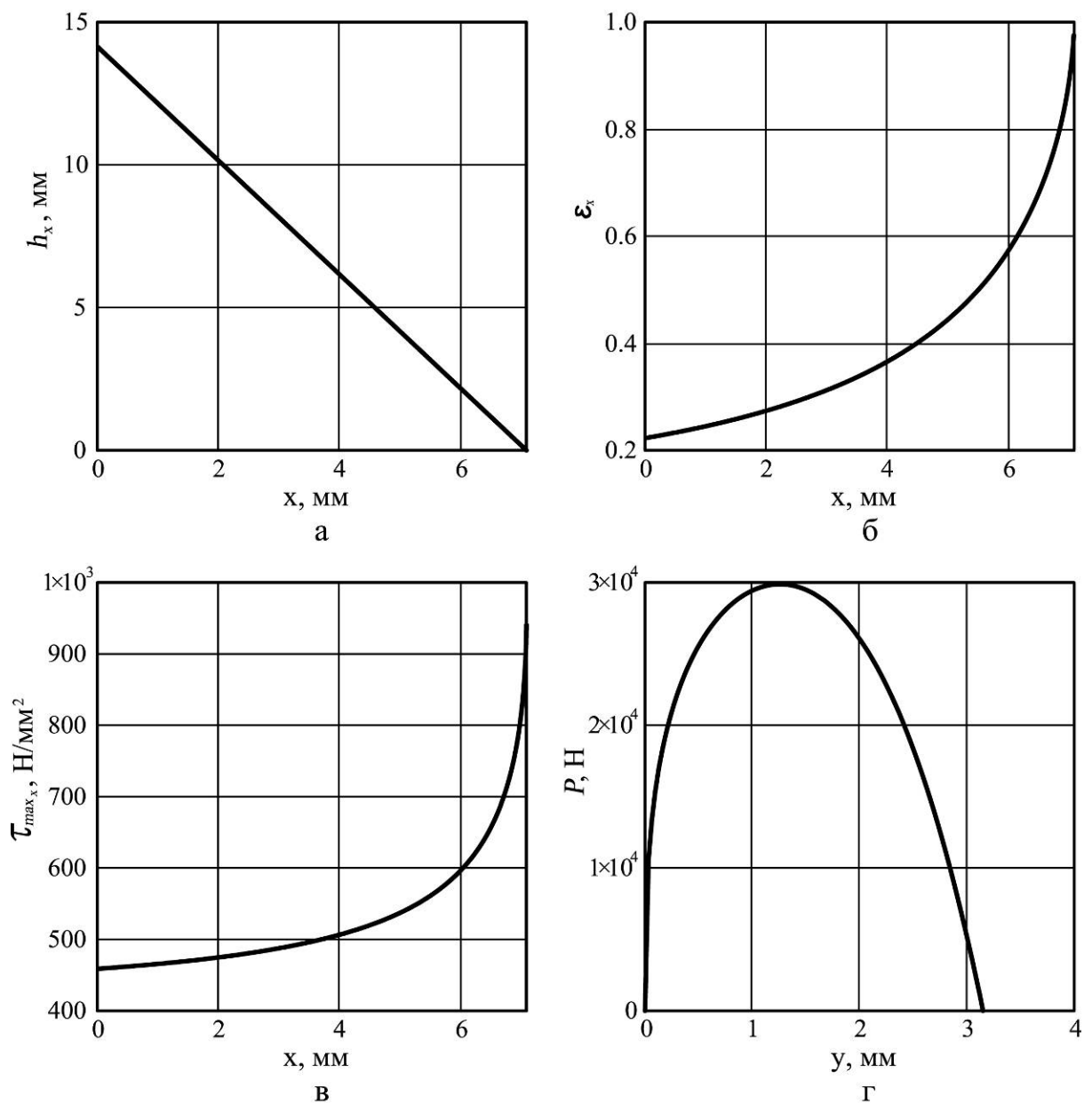


Рисунок 7.18 – Розрахункові розподіли вихідної висоти перерізу заготовки (а), відносного проникнення до сколювання (б) і максимального опору розрізанню (в) по перерізу заготовки від осі симетрії до краю, а також сили розрізання (г) в залежності від переміщення ножа для випадку розрізання квадратної заготовки кутовими фасонними ножами

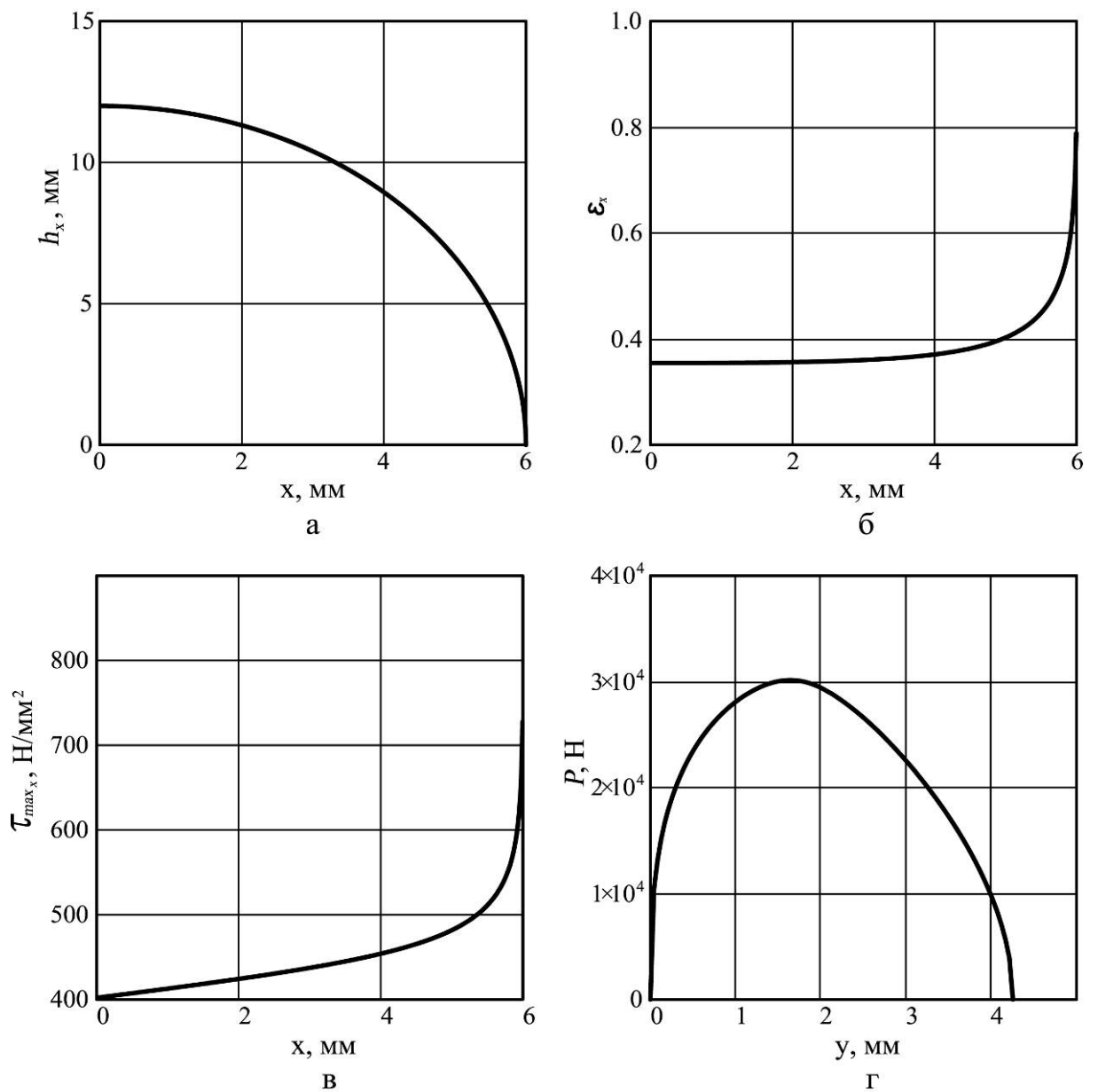


Рисунок 7.19 – Розрахункові розподіли вихідної висоти перерізу заготовки (а), відносного проникнення до сколювання (б) і максимального опору розрізанню (в) по перерізу заготовки від осі симетрії до краю, а також сили розрізання (г) в залежності від переміщення ножа для випадку розрізання круглої заготовки фасонними ножами

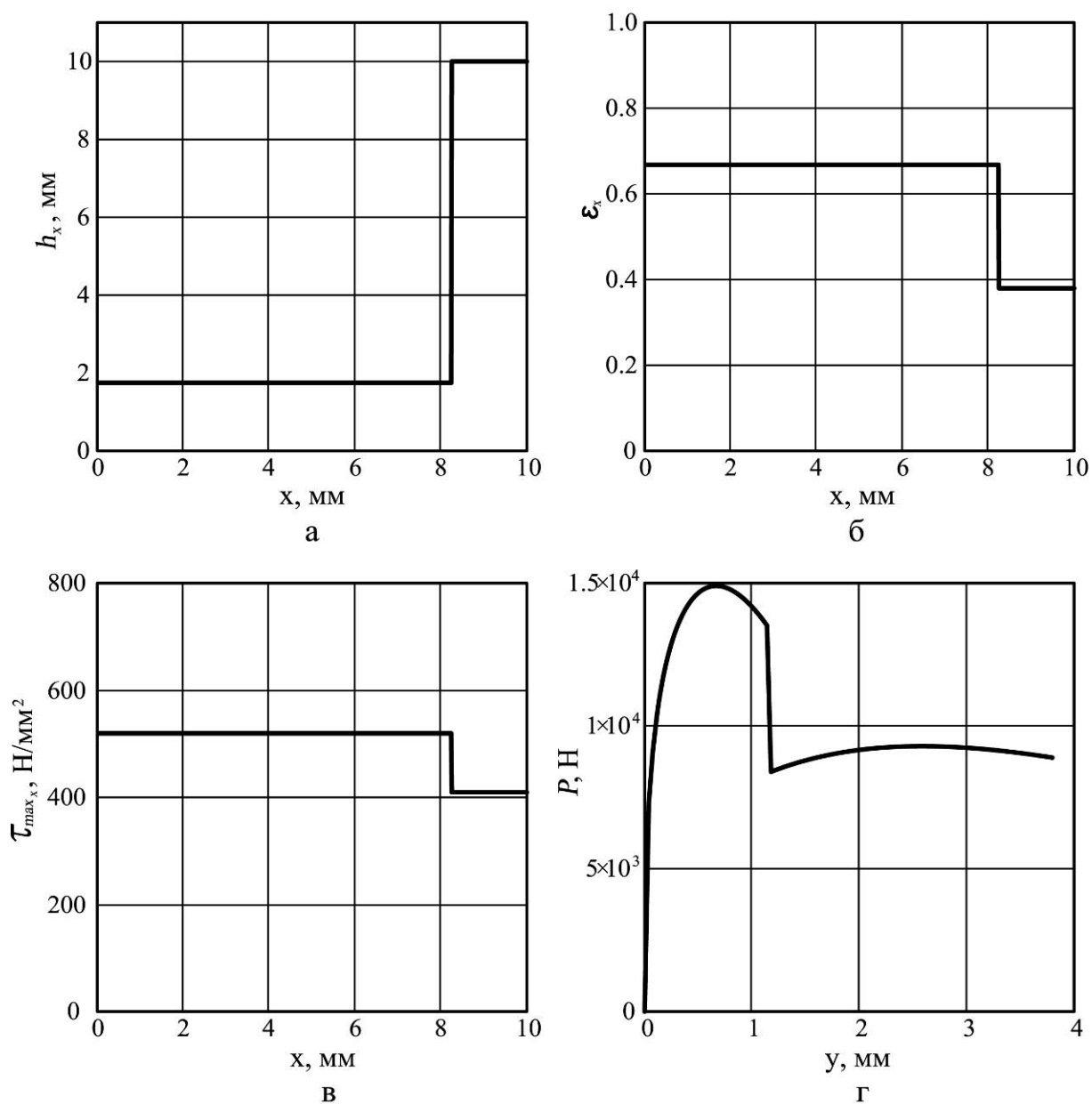


Рисунок 7.20 – Розрахункові розподіли вихідної висоти перерізу заготовки (а), відносного проникнення до сколювання (б) і максимального опору розрізанню (в) по перерізу заготовки від осі симетрії до краю, а також сили розрізання (г) в залежності від переміщення ножа для випадку розрізання швелера фасонними ножами

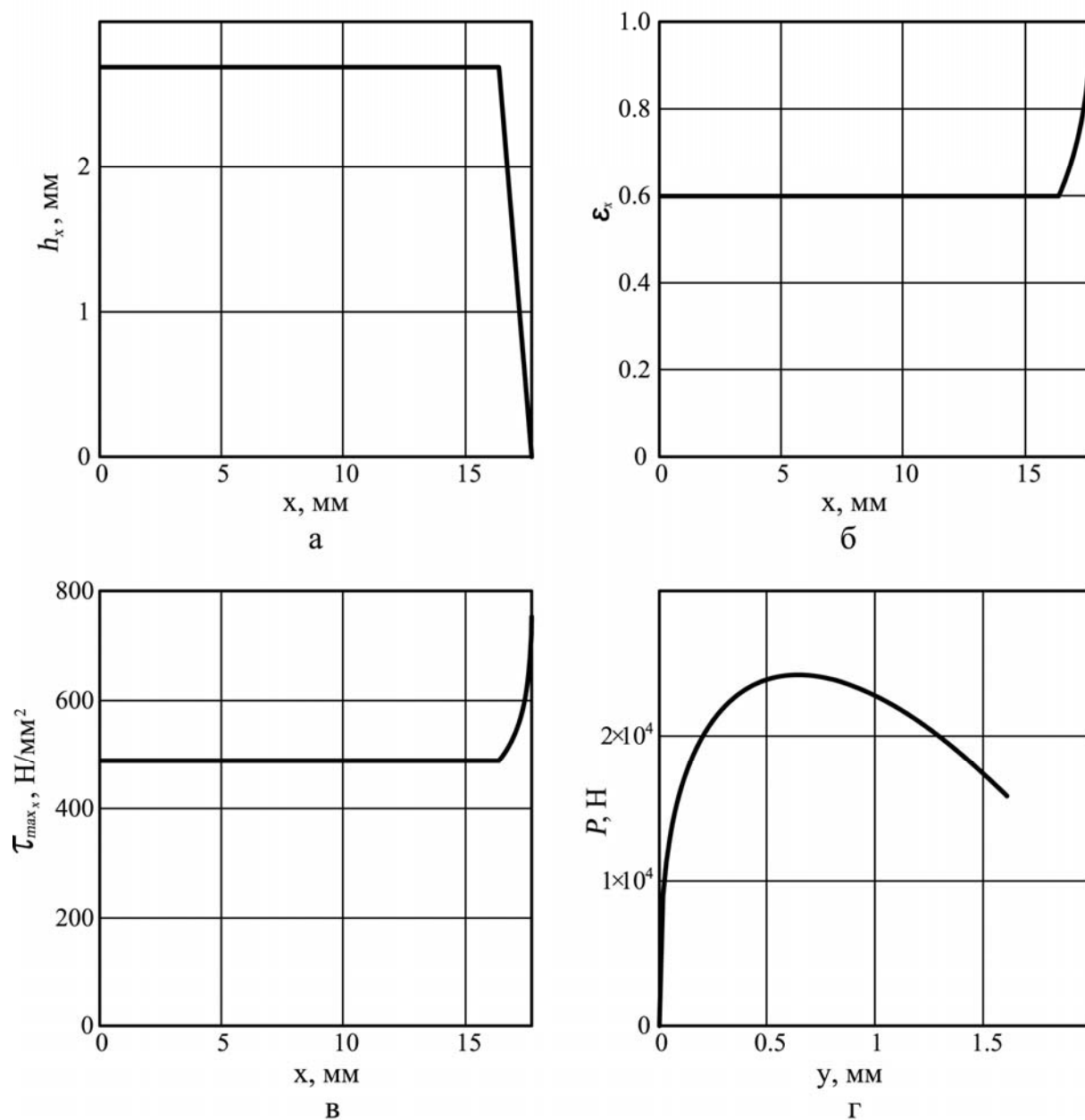


Рисунок 7.21 – Розрахункові розподіли вихідної висоти перерізу заготовки (а), відносного проникнення до сколювання (б) і максимального опору розрізанню (в) по перерізу заготовки від осі симетрії до краю, а також сили розрізання (г) в залежності від переміщення ножа для випадку розрізання кутка фасонними ножами при симетричному розташуванні ($\beta = 45^\circ$)

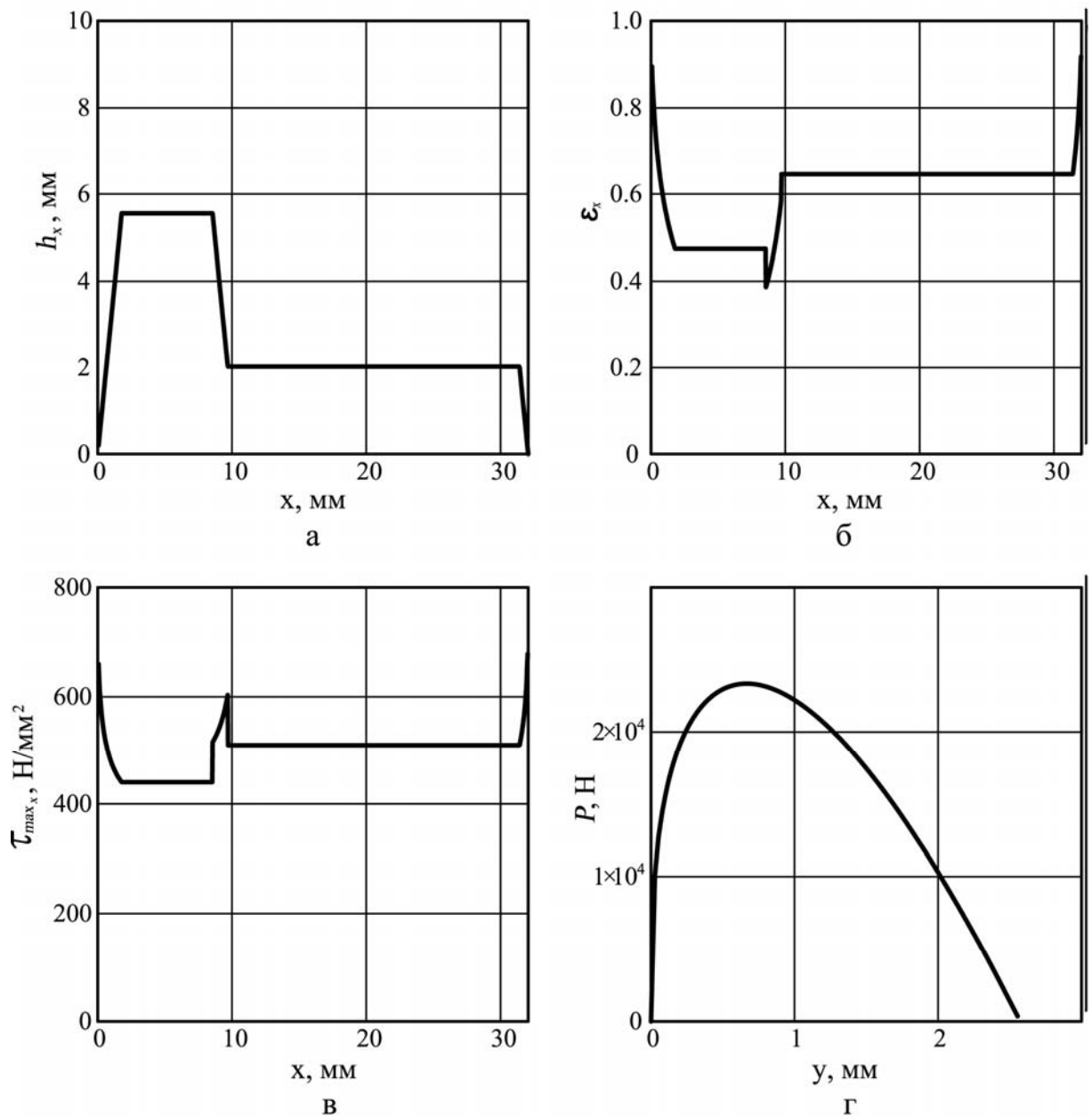


Рисунок 7.22 – Розрахункові розподіли вихідної висоти перерізу заготовки (а), відносного проникнення до сколювання (б) і максимального опору розрізанню (в) по перерізу заготовки від краю до краю, а також сили розрізання (г) в залежності від переміщення ножа для випадку розрізання кутка фасонними ножами при несиметричному розташуванні ($\beta = 20^\circ$)

3) встановлено вплив вихідної висоти перерізу, від якої залежить відносне проникнення до сколювання, котре може змінюватися при різних положеннях профілів під час розділення та впливати на силу розрізання;

4) використаний алгоритм виділення окремих ділянок перерізу, досить легко поширюється на інші форми перерізів;

5) дана методика відносно проста для програмування і може застосовуватися для автоматизованого розрахунку.

7.5 Проектування і вдосконалення конструкцій обладнання процесу поздовжнього розрізання листового металопрокату

Вдосконалення процесу поздовжнього розрізання товстих листів дисковими ножами та пов'язані з цим проектно-конструкторські рішення, спрямовані насамперед на розширення сортаменту розрізуваних листів та збільшення швидкості розрізання, а також підвищення якості готових листів. Цього можливо досягнути за умови прийняття наково-обґрунтованих проектно-конструкторських рішень за рахунок зміни конструкції дискових ножиць та нових способів розташування ножиць в потоці прокатного стану та/або поліпшення умов подачі листів в ножи [410-412].

Теоретичне дослідження роботи дискових ножиць при збільшеному діаметрі верхнього ножа [410]. Так на рисунку 7.23,а представлена принципова схема конструкції дискових ножиць з верхнім ножем збільшеного діаметру, а також розрахункові залежності моментів розрізання (рис. 7.23,б) і відношення максимально можливого значення сили зовнішнього опору до сили розрізання (рис. 7.23,в) в залежності від діаметра верхнього ножа.

Аналіз отриманих розподілів дозволив встановити, що при збільшенні діаметра верхнього ножа на 12% спостерігається вирівнювання значень моментів на верхньому і нижньому ножі, при цьому приріст сумарного моменту становить 8,4%, а величина максимально допустимого значення сили зовнішнього опору

зростає на 5%, що в свою чергу свідчить про покращення умов захоплювання листів та про можливість розширення сортаменту.

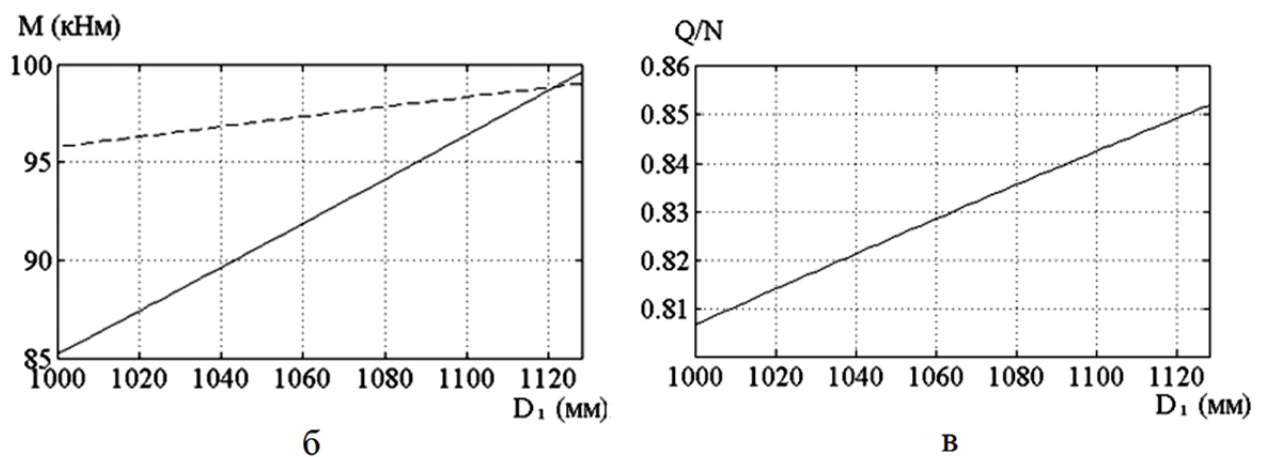
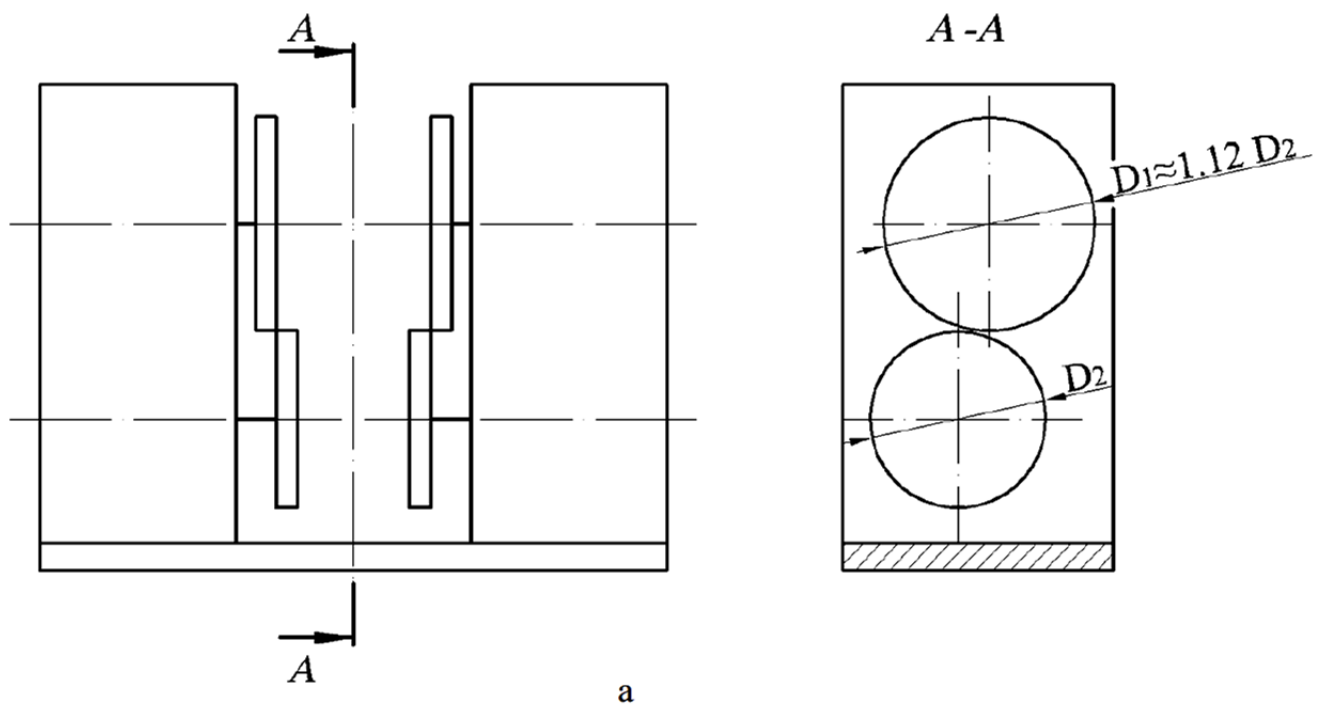


Рисунок 7.23 – Принципова схема конструкції дискових ножиць з верхнім ножом збільшеного діаметру, а також залежності максимально можливих значень моментів розрізання (б) на верхньому (---) та нижньому (—) ножі і відношення сили зовнішнього опору до сили розрізання (в) в залежності від діаметра верхнього ножа

Ще одним цікавим аспектом в роботі дискових ножиць є схема приводу, котра традиційно реалізується з двома приводними ножа, котрі обертаються з одна-

ковою швидкістю, проте її можна реалізувати з одним верхнім або нижнім приводним ножом [411]. Оцінка впливу схеми приводу ножів і сили зовнішнього опору на величину моменту різання дисковими ножами показала, що:

- розрізання на ножицях з верхнім приводним ножом можливе в меншому діапазоні позитивних значень сили зовнішнього опору, в порівнянні з ножицями з двома приводними ножами;

- момент розрізання з нижнім приводним ножом на 4-5% вище, ніж при розрізанні двома приводними ножами, за інших рівних умов;

- розрізання тільки з верхнім приводним ножом можливе лише за наявності зусилля, спрямованого в напрямку руху листа при розрізанні (зусилля «підпору»).

Таким чином, при забезпеченні постійного зусилля «підпору», достатнього для компенсації дії сил зовнішнього опору, в процесі розрізання листів на дискових ножицях, доцільно застосовувати схему приводу тільки з нижнім приводним ножом, що дозволить спростити конструкцію приводу ножиць за рахунок виключення шестеренної кліті та здешевити вартість, без зниження техніко-технологічних і експлуатаційних характеристик агрегату в цілому.

Також можна в дискових ножицях, згідно з технічним рішенням [412], встановлювати число пар ножів вздовж відрізуваної кромки більше однієї, що дозволяє розширити сортамент розрізуваних листів за рахунок здійснення процесу розрізання в декілька послідовних стадій. На рис. 7.24 показана конструктивна схема пропонуваного дискових ножиць для розрізання листового матеріалу в потоці прокатного стану.

Дискові ножиці, містять верхні 1 і нижні 2 різальні дискові ножі, при цьому число пар ножів вздовж відрізуваної кромки більше однієї, а також глибина надрізу і окружна швидкість дисків на кожній парі ножів може бути не однаковою. Дискові ножиці працюють таким чином. Матеріал подається між верхнім 1 і нижнім 2 дисковими ножами першої пари, які, обертаючись, втягують його і надрізають на певну величину, яка визначається товщиною і властивостями матеріалу розрізуваного, а також числом пар ножів задіяних в процесі. При цьому за рахунок збільшення числа пар ножів вздовж відрізуваної кромки, існує можливість зменшен-

ня діаметра дисків при одночасному збереженні максимальної товщини розрізуваних листів.

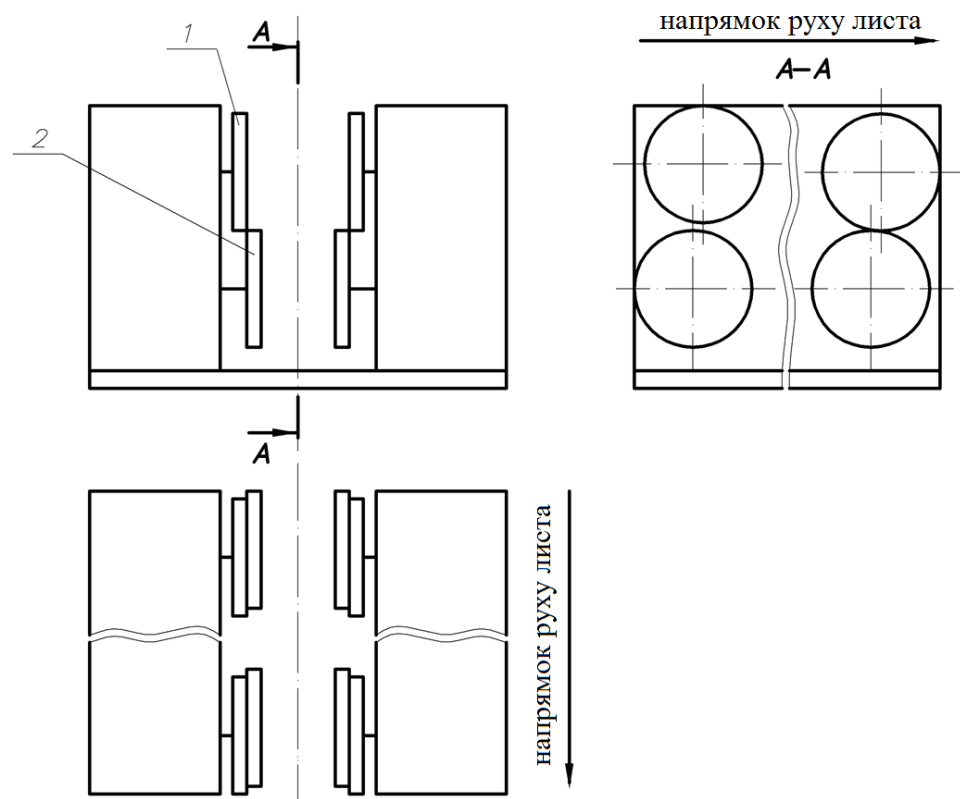


Рисунок 7.24 – Конструкція дискових ножиць багатостадійного обрізання бічних кромek

Підтвердженням ефективності пропонованого технічного рішення є дослідження розрізання листів при температурі 650°C , з використанням однієї і двох пар ножів діаметром 1000 мм, встановлених уздовж відрізуваної кромки. Результати наведені в табл.7.10.

Результати показують, що завдяки застосуванню ножиць нової конструкції можливе розширення сортаменту розрізуваних листів.

Ще одним рішенням технічної задачі розширення сортаменту і підвищення якості поздовжнього розрізання товстих листових розкатів дисковими ножицями, можна запропонувати зміни місця розташування дискових ножиць в потоці прокатного стану, що дозволило б подавати листи в дискові ножиці з постійною силою і обмежити ступінь свободи розкату в процесі розрізання тільки поздовжнім напрямком.

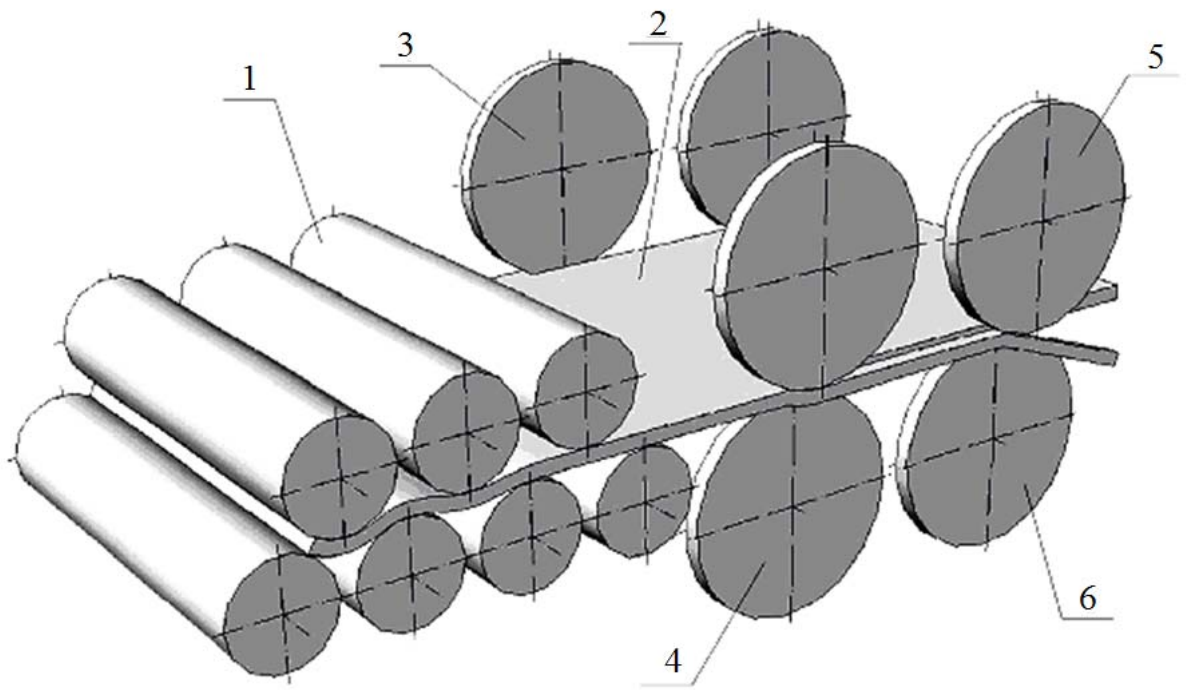
Таблиця 7.10 – Товщина листів, що допускаються до розрізання в залежності від числа пар дисків уздовж відрізуваної кромки

Група марок сталі	Число пар ножів вздовж відрізуваної кромки	Товщина листа (мм)				
		30	35	40	45	50
Зсп, ЗГСП, 15К, 20К, А, В, Д, ЗПС, 5ПС, 8–20, 14ХГС	1	+	+	+	–	–
	2	+	+	+	+	+
25–35, 10ХСНД, 15ХСНД, 09Г2, 16ГС, 10Г2С1Д, 14Г2АФ, 16Г2АФ	1	+	+	–	–	–
	2	+	+	+	+	+
40–50, 30Г–40Г	1	+	+	–	–	–
	2	+	+	+	+	+
55–70, 50Г–70Г	1	+	–	–	–	–
	2	+	+	+	+	+

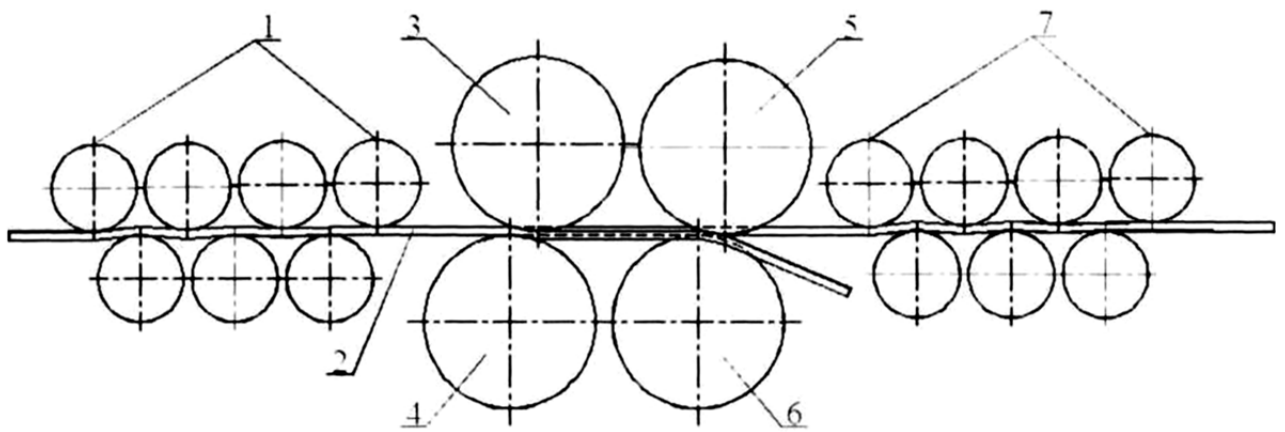
В даному випадку дискові ножиці встановлюються в потоці стану безпосередньо за правильною машиною, в напрямку руху прокату, так, щоб правильні ролики машини подавали розкат безпосередньо в ножі дискових ножиць, під час захоплення ножами листа і подальшого його розрізання, внаслідок чого процес розрізання і процес правки об'єднуються в одну технологічну операцію.

На рис. 7.25, а показаний пропонований спосіб встановлення дискових ножиць (з двома парами ножів вздовж відрізуваної кромки) в потоці прокатного стану [401, 413].

Власне процес розрізання здійснюється наступним чином. Ролики листопральної машини 1 подають лист 2 між верхнім 3 і нижнім 4 дисковими ножами першої пари, які, обертаючись, втягують його і надрізають на певну величину, яка визначається товщиною і властивостями розрізуваного матеріалу, а також числом пар ножів задіяних в процесі, а потім розкат дорізається верхнім 5 і нижнім 6 дисковими ножами другої пари.



а



б

Рисунок 7.25 – Способи установки дискових ножиць (з двома парами ножів вздовж відрізуваної кромки) в потоці прокатного стану

Цей спосіб дозволить обмежити ступінь свободи розкату в процесі розрізання поздовжнім напрямком, що дозволить виключити його поворот в горизонтальній площині і уникнути появи кривизни бічної кромки готового листа та дозволить розширити сортамент розрізуваних листів, через поліпшення умов захоплення розкату дисковими ножами, за рахунок подачі листа в ножиці з постійною силою.

Крім того, даний спосіб розташування дозволить знизити довжину технологічної лінії, що дозволить скоротити капітальні витрати та підвищити продуктивність процесу обрізання бічних кромки за рахунок збільшення швидкості руху листа.

На рис. 7.25, б показаний ще один пропонований спосіб установки дискових ножиць (з двома парами ножів уздовж відрізуваної кромки) в потоці прокатного стана між двома листопрямильними машинами [414].

Ролики листопрямильної машини 1 подають лист 2 між верхнім 3 і нижнім 4 дисковими ножами першої пари, які вільно закріплені на осях, та за рахунок подовжньої сили, утворюваної правильною машиною відбувається надрізання на певну величину, визначувану товщиною і властивостями розрізуваного матеріалу, а також числом пар ножів задіяних в процесі.

Потім лист дорізається верхнім 5 і нижнім 6 дисковими ножами другої пари, котрі також вільно закріплені на осях, після чого лист 2 потрапляє до правильної машини 7, котра забезпечить завершення процесу розрізання після виходу листа 2 з листопрямильної машини 1, за рахунок наявної подовжньої сили, утворюваної правильною машиною 7.

Цей спосіб додатково дозволить, спростити конструкцію дискових ножиць завдяки можливої відсутності приводу дисків, а також суттєво зменшити виробничу площу й виключити дві міжагрегатні ділянки з транспортуючими рольгангами.

Ефективність цих технічних рішень підтверджується результатами фізичного і математичного (МСЕ) моделювання.

Результати роботи були передані ДП «УкрНТЦ «Енергосталь» (м. Харків), ПАТ «НДіПТІМ» (м. Краматорськ), ПрАТ «Новокраматорський машинобудівний завод» (м. Краматорськ), НВП «Дніпроенергосталь» (м. Запоріжжя). Ефективність нових технологій та обладнання забезпечується за рахунок підвищення техніко-економічних та якісних показників процесів поздовжнього і поперечного розділення листового і сортового металопрокату (Додаток В).

Скінченно-елементні математичні моделі процесів поздовжнього і поперечного розділення металопрокату на ножицях в гарячому і холодному стані; уточнені методики з розподілу енергосилових параметрів в процесах розрізання металопрокату на ножицях з дуговим ножом; уточнені методики по визначенню показників якості готового листа при поперечному розрізанні на ножицях з шевронним ножом; уточнення розподілу енергосилових параметрів в процесах розрізання металопрокату на ножицях з дуговим ножом; розширені уявлення про напружено-деформований стан металу в зоні розділення при реалізації операцій розрізання металопрокату на ножицях; комплекси програмних засобів з автоматизованого розрахунку енергосилових параметрів і показників якості в процесах розділення металопрокату на ножицях використовуються на кафедрі «Машинобудування та прикладна механіка» СНУ ім В. Даля в рамках курсів «Конструювання, розрахунок та САПР машин і обладнання» та «Дослідження, випробування та діагностика машин і обладнання», а також при виконанні курсових робіт та проектів, випускних кваліфікаційних робіт бакалаврів і магістрів за спеціальностями 133 «Галузеве машинобудування» та 131 «Прикладна механіка» (Додаток В).

ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 7

1. На базі розробленого алгоритму визначення та обробки локальних і узагальнених числових даних результатів скінченно-елементного моделювання процесу гарячого розрізання паралельними ножами, встановлено функціональний зв'язок між опором розрізанню та кривими текучості, а також між відносним проникненням ножів в метал і ступенем пластичної деформації в осередку розрізання,

з урахуванням хімічного складу розрізуваних сталей та швидкості розрізання, що дозволило підвищити точність визначення опору розрізанню до $\pm 10\%$.

2. Шляхом об'ємного моделювання методом скінченних елементів процесу гарячого розділення квадратної безперервнолитої заготовки фасонними ножами з використанням планування експерименту та вирішенням оптимізаційної задачі встановлено, що кут розкриття ножів трикутної форми має становити $\alpha = 95,58^\circ$, а ухилу їх контактних поверхонь – $\beta = 8,04^\circ$, бо це призводить до мінімізації зминання і загину кінців та ромбічності торцевої поверхні розрізуваної заготовки у виробничих умовах.

3. На підставі розроблених скінченно-елементних моделей з використанням регресійного аналізу та експериментальних досліджень розроблено конструкції шевронних ножів здатних підвищити якість готового листа за рахунок зниження величини залишкової деформації до 71% в порівнянні з шевронним ножем класичної конструкції.

4. На підставі аналізу математичних моделей процесу обрізання бічних кромок дисковими ножами встановлено, що при розрізанні товстих листів за рахунок збільшення діаметра верхнього ножа на 12% можна отримати вирівнювання значень моментів на верхньому і нижньому ножі, при цьому приріст сумарного моменту становить 8,4%, а величина максимально допустимого значення сили зовнішнього опору зростає на 5%, що свідчить про покращення умов захоплення листів.

ВИСНОВКИ

У дисертації вирішена актуальна науково-практична проблема з підвищення ефективності процесів поздовжнього і поперечного розділення металопрокату на основі розвитку наукових і практичних основ застосування методу скінченних елементів для вирішення комбінованих задач теорій пружності, пластичності та руйнування з урахуванням змінних умов протікання процесу, що дозволило виконати нові науково-технічні розробки з вдосконалення технологічних режимів і обладнання процесів поздовжнього і поперечного розрізання металопрокату на ножицях в гарячому і холодному стані в світлі актуальних практичних завдань по при задоволенні вимог до розширення сортаменту і якості готової продукції.

1. Подальший розвиток розділових операцій прокатного виробництва, а також вдосконалення обладнання, що їх реалізує, вимагає всебічного дослідження впливу конструктивних, механічних та технологічних параметрів на напружено-деформований стан, енергосилові параметри та показники якості процесів розрізання на ножицях та потребує розробки нових методик розрахунку опору зрізу, поліпшених технологічних режимів та інструментів, підвищення основних показників якості, що можливо за умови розвитку наукових і практичних основ використання МСЕ стосовно операцій розрізання металопрокату.

2. Уточнення практично-наукових умов застосування методу скінченних елементів, а саме, обґрунтування типу скінченних елементів, правил контролю сітки в зоні розділення, процесу формування та зростання тріщини в пластичному матеріалі з ізотропним зміцненням, а також пружних характеристик ножиць та термодинамічних ефектів в матеріалі під час розділення дозволяє узагальнити плоскі та об'ємні математичні моделі комбінованих задач розрізання ножицями, та забезпечує можливість врахування впливу чинників, які не можна врахувати іншими методами.

3. На основі аналізу напружено-деформованого стану результатів скінченно-елементного моделювання та експериментальних даних процесу гарячого роз-

різання паралельними ножами встановлено, що при температурі розрізання в діапазоні 1100...600°C, лише за наявної можливості варіювання хімічного складу розрізуваних сталей в межах стандарту має місце зміна опору розрізанню на 5...30%, при цьому збільшення відсотку відбувається зі зменшенням температури та швидкості розрізання. Врахування хімічного складу, температури, ступеня і швидкості деформації розрізуваної сталі в математичній моделі розрахунку опору розрізанню забезпечило підвищення точності розрахунку силових характеристик процесів гарячого розрізання для конкретних умов реалізації на 10...40%.

4. На основі аналізу результатів досліджень процесів розрізання в холодному стані встановлено, що величина відносного проникнення ножів в метал до сколювання, яка визначає момент закінчення розділення металу, залежить від сукупності факторів у їх взаємодії, а саме відносного подовження після розриву, границь міцності і текучості матеріалу, висоти розрізуваного перерізу і швидкості руху ножа урахування яких дозволило підвищити до 30% точність при визначенні інтегральних значень сил розрізання на ножицях холодного різання.

5. Виявлено шляхом моделювання методом скінчених елементів, що на двохкривошипних ножицях з дуговим ножом раціональний вибір радіусу дуги ножа в діапазоні 80...200 м дозволяє отримати більш рівномірний розподіл сили розрізання по ходу процесу і знизити її максимальне значення на 25...30% за рахунок того, що кут нахилу твірної ножа та відповідно форма і розміри осередку різання є більш стабільними.

6. За результатами теоретичних та експериментальних досліджень процесу поперечного розрізання встановлено, що застосування шевронного ножа з вигнутим (модифікованим) розташуванням похилих поверхонь та можливим їх заокругленням профілю в вершині сходження дозволяє знизити залишкову деформацію на 60...85%, при одночасному зростанні максимальної сили розрізання не більше 10...15%.

7. Встановлено, на підставі результатів скінченно-елементного моделювання процесу обрізання кромки товстих листів на дискових ножицях в гарячому і холодному стані та підтверджено експериментально, що в умовах сталого процесу

розрізання швидкість листа в ножах змінюється в діапазоні 0,9...0,95 окружної швидкості диска. Цей факт дозволяє розробляти технологічні схеми виробництва товстих листів із суміщенням процесів розрізання і правлення.

8. Шляхом експериментальних досліджень встановлено, що максимально допустима величина зношення різальних кромek ножів, при якій на поверхні зрізу утворюються задирки, призводить до збільшення сили розрізання, по відношенню до розрізання ножами з гострими кромками, для паралельних ножів в 1,25, а для похилих ножів в 1,42 рази, що вказує на доцільність, при розрахунку максимального навантаження на ножиці, застосування цих значень в якості коефіцієнта, які враховує збільшення сили розрізання через зношення різальних кромek та збільшення бічного зазору між ножами.

9. Розроблено технологічні та конструктивні заходи, спрямовані на розширення сортаменту та підвищення якості металопрокату процесів поздовжнього і поперечного розділення на ножицях в холодному і гарячому стані. Результати роботи у вигляді програмних засобів, а також технологічних і конструктивних рекомендації були використані ДП «УкрНТЦ«Енергосталь» (м. Харків) і ПАТ «НДіПТІМ» (м. Краматорськ) в рамках комплексу наукових досліджень, розробки технологій, проектування, конструювання та виготовлення обладнання прокатних станів і в рамках комплексу науково-дослідних робіт по вдосконаленню технологічних режимів, поліпшенню показників якості і підвищенню виходу придатного, а також підвищенню надійності обладнання виробництва ПрАТ «Новокраматорський машинобудівний завод» (м. Краматорськ) і НВП «Дніпроенергосталь» (м. Запоріжжя). Сумарний частковий економічний ефект від впровадження розробок склав 2130 тис. грн., очікуваний економічний ефект становить 2680 тис. грн.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Технология процессов прокатки и волочения. Листопркатное производство : учебник для вузов / М. М. Сафьян, В. Л. Мазур, А. М. Сафьян, А. Н. Молчанов. – К. : Вища школа, 1988. – 351 с.
2. Прокатка толстых листов / П. И. Полухин, В. М. Клименко, В. П. Полухин и др. – М. : Металлургия, 1984. – 288 с.
3. Прокатное производство : учебник для вузов / П. И. Полухин, Н. М. Федосов, А. А. Королев, Ю. М. Матвеев. – 3-е изд. – М. : Металлургия, 1982. – 696 с.
4. Технология прокатного производства / В. М. Клименко, А. М. Онищенко, А. А. Минаев, В. С. Горелик. – К. : Вища школа, 1989. – 311 с.
5. Грудев А. П. Технология прокатного производства / А. П. Грудев, Л. Ф. Машкин, М. И. Ханин. – М. : Металлургия, 1994. – 656 с.
6. Коновалов Ю.В. Справочник прокатчика. Справочное пособие в 2-х т. / Ю. В. Коновалов. – М. : Теплотехник, 2008. – . – Книга 1: Производство горячекатанных листов и полос. – 2008. – 640 с.
7. Коновалов Ю.В. Справочник прокатчика. Справочное пособие в 2-х т. / Ю. В. Коновалов. – М. : Теплотехник, 2008. – . – Книга 2: Производство холоднокатанных листов и полос. – 2008. – 608 с.
8. Стасовский Ю.Н. Проектирование современных производств обработки металлов давлением / Ю. Н. Стасовский, Ю. С. Кривченко, Г. С. Бабенко; под ред. д.т.н. Ю. Н. Стасовского. – Днепропетровск : Монолит, 2009. – 745 с.
9. Гулидов И. Н. Оборудование прокатных цехов (эксплуатация, надежность). Учебное пособие для студентов сред. спец. учеб. Заведений / И. Н. Гулидов. – М. : Интермет Инжиниринг, 2004. – 320 с.
10. Ginzburg V. B. Flat-rolled steel processes: Advanced Technologies / V. B. Ginzburg. – CRC Press, 2009. – 372 p.

11. Технология прокатного производства. В 2-х книгах. Кн. 1. Справочник / М. А. Беньковский, К. Н. Богоявленский, А. И. Виткин и др., под ред. В. И. Зюзина и А. В. Третьякова. – М. : Metallurgy, 1991. – 440 с.
12. Технология прокатного производства. В 2-х книгах. Кн. 2. Справочник / М. А. Беньковский, К. Н. Богоявленский, А. И. Виткин и др., под ред. В. И. Зюзина и А. В. Третьякова. – М. : Metallurgy, 1991. – 423 с.
13. Машиностроение. Энциклопедия / Ред. совет: К. В. Фролов (пред.) и др. – М. : Машиностроение, 2000. – . – Т. IV-5: Машины и агрегаты металлургического производства / Н. В. Пасечник, В. М. Сеницкий, В. Г. Дрозд и др.; Под. общ. ред. В. М. Сеницкого, Н. В. Пасечника. – 2000. – 912 с.
14. Машины и агрегаты металлургических заводов : учебник для вузов / А. И. Целиков, П. И. Полухин, В. М. Гребеник и др. – М. : Metallurgy, 1987 – . – Т. 3: Машины и агрегаты для производства и отделки проката. – 1988. – 680 с.
15. Интенсификация производства листовой стали / Ф. Е. Долженков, В. Г. Носов, Ю. В. Фурман, А. Е. Руднев. – К. : Техника, 1990. – 136 с.
16. Прокатные станы. Справочник. В 3-х томах / В. Г. Антипин, С. В. Тимофеев, Д. К. Нестеров и др. – М. : Metallurgy, 1992 – . – Т. 1: Обжимные заготовочные и сортопрокатные станы 500-950. – 1992. – 429 с.
17. Прокатные станы. Справочник. В 3-х томах / В. Г. Антипин, С. В. Тимофеев, Д. К. Нестеров и др. – М. : Metallurgy, 1992 – . – Т. 2: Средне-, мелкосортные и специальные станы. – 1992. – 496 с.
18. Прокатные станы. Справочник. В 3-х томах / В. Г. Антипин, С. В. Тимофеев, Д. К. Нестеров и др. – М. : Metallurgy, 1992 – . – Т. 3: Листопрокатные станы и профилегибочные агрегаты. – 1992. – 428 с.
19. Теория и практика процесса многоручьевого прокатки-разделения / Г. М. Шульгин, О. В. Дубина, В. Ф. Габайдулин и др. Под научн. ред. Ю. В. Коновалова. – Севастополь: «Вебер», 2003. – 622 с.
20. Создание и промышленная реализация высокоэффективных ресурсосберегающих технологий, основанных на применении процесса –

многоручьева прокатка-разделение / Г. М. Шульгин, А. Г. Маншилин, С. М. Жучков и др. // *Металл и литье Украины*. – 2003. – № 3-4. С. 3-50

21. Многоручьева прокатка-разделение. Научные и технологические основы / В. М. Клименко, С. П. Ефименко, В. Ф. Габайдулин, Г. М. Шульгин. – М. : *Металлургия*, 1987. – 168 с.

22. Минаев А. А. Совмещенные металлургические процессы : монография / А. А. Минаев. – Донецк: Технопарк ДонГТУ УНИТЕХ, 2008. – 552.

23. Процесс прокатки-разделения с использованием неприводных делительных устройств. Теория и практика : монография / С. М. Жучков и др. – М. : *Пан пресс*, 2007. – 285 с.

24. Следнев В. П. Спаренная прокатка сортовых профилей / В. П. Следнев. – М. : *Металлургия*, 1988. – 168 с.

25. Жучков С.М. Технические и технологические задачи повышения эффективности производства сортового проката / С. М. Жучков, Д. Г. Паламарь // *Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии: Сб. научн. тр.* – Дніпропетровськ.: ІСМ НАН України, 2008. – Вип. 17. – С. 180-184.

26. Поляков Б.Н. Повышение качества технологий и долговечности оборудования прокатных станов. Часть 2 / Б. Н. Поляков. – Екатеринбург: Изд-во Урал. гос. проф.-пед. ун-та, 1994. – 192 с.

27. Овчинников В.М. Термическая резка металла на предприятиях черной металлургии / В.М. Овчинников // *Черная металлургия: бюл. НТИ*. – 1986. – №8

28. Резка и сварка : комплект решений / Messer Griesheim Schweisstechnik. Представительство по СНГ. – М., 1998. – Вып. : Кислородно-плазменная резка сталей – экономическое и технологическое сравнение с другими термическими методами резки. – 6 с.

29. Лазер вместо дисковых ножниц для продольной резки полос из стали и цветных металлов // *Blech Rohne Profile*. – 1997. – Т. 44, №6. – С. 26.

30. Никитина Л. А. Лазерная резка / Л. А. Никитина // *Обработка металлов давлением*. – М.: ЦНИИТЭИчермет, 1989. – Вып. 12. – С. 11.

31. Лазерная техника и технология : учебное пособие для вузов : в 7 кн. / под ред. А. Г. Григорьянца. – М. : Высш. шк., 1988 – . – Кн. 7 : Лазерная резка металлов / А. Г. Григорьянц, А. А. Соколов. – 1988. – 126 с.

32. Артамонова Е. А. Современные газорезательные машины ФРГ / Е. А. Артамонова, М. Р. Бесшапова // Прокатное производство. – М. : ЦНИИТЭИчермет, 1989. – Вып. 16. – С. 1-8.

33. Никитина Л. А. Газорезательные машины с ЧПУ / Л. А. Никитина // Обработка металлов давлением. – М. : ЦНИИТЭИчермет, 1989. – Вып. 12. – С. 10-11.

34. Чистая лазерная резка тонкостенных труб // Новости черной металлургии за рубежом. – 2005. – №4. – С.66 – 67

35. Лазерная резка труб - фантастический процесс // Новости черной металлургии за. – 2000. – №3. – С.72-73

36. Ильин С.И. Технология термической обработки сталей: учебное пособие / С.И. Ильин, Ю.Д. Корягин. – Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2009. – 120 с.

37. Управляемое термическое упрочнение проката / И. Г. Узлов, В. В. Парусов, Р. В. Гвоздев, О. В. Филонов. – К. : Тэхника, 1989. – 118 с.

38. Ульяницкий В. Н. Резервы снижения энергоемкости производства толстолистового проката / В. Н. Ульяницкий, П. В. Боровик // Вестник МАНЭБ. – СПб, 2000. – №1(37). – С. 137-139.

39. Maintenance of Required Mechanical Properties of Sheets with the Use of Rolling Heat / I. E. Davydov, I. V. Rakova, M. B. Lutskiy, V. A. Lutsenko, P. V. Borovik // Metallurgical and Mining Industry. – 2010. – Vol. 2, No. 4. – P. 298-301. – ISSN 2076-0507

40. Іванченко Ф. К. Розрахунок машин і механізмів прокатних цехів: навч. посібник / Ф. К. Іванченко, В.М. Гребеник, В.І. Ширяєв. – К. : Вища шк., 1995. – 445 с.

41. Лукашин Н. Д. Конструкция и расчет машин и агрегатов металлургических заводов: учебник для вузов / Н. Д. Лукашин, Л. С. Кохан, А. М. Якушев – М.: ИКЦ «Академкнига», 2003. – 456 с.

42. Королев А. А. Конструкция и расчет машин и механизмов прокатных станков / А. А. Королев. – М. : Металлургия, 1985. – 375 с.

43. Королев А. А. Механическое оборудование прокатных и трубных цехов : учебник для вузов / А. А. Королев. – 4-е изд. перераб. и доп. – М. : Металлургия, 1987. – 480 с.

44. Сердюк А. И. Особенности технологии безотходного разделения фасонных П-образных профилей в штампах со сложным движением ножей / А. И. Сердюк. – Мариуполь : ПГТУ, 2015. – 139 с.

45. Роль ВНИИМЕТМАША в создании и освоении агрегатов поперечной резки листового проката Сумский С.Н., Грачев В.Г., Солодовник Ф.С., Рогачиков Ю.М. Металлург. 2004. № 3. С. 45-48.

46. Современные ножницы для порезки полосового проката / Г.С. Суков, В. Н. Тиунов, Ю. Н. Белобров и др. // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – №1/1 (43), 2010. – С. 25-26.

47. Бойденко Н. Г. Профилирование инструмента ножниц с катящимся резом / Н. Г. Бойденко, В. П. Капота, В. Я. Панюхно // Прогрессивные технологии и машины для обработки и отделки прокатного производства: сб. науч. тр. / под ред. Попова Б. В., Коновалова Л. В. М.: ВНИИМЕТМАШ. – 1986. С. 47-54.

48. Ножницы с катящимся резом конструкции ОАО “КО ВНИИМЕТМАШ” / В. И. Клопов, В. Г. Астахов, В. Е. Кутузов, А. В. Кульвиц // Черная металлургия: Бюл. ин-та “Черметинформация”. – 2007. – № 3. – С. 54-58.

49. Резка толстых листов гильотинными ножницами с наклонными кромочными ножами / В. Н. Карпушкин, Н. М. Хорошилов, В. И. Роспасиенко и др. // Чер. металлургия: Бюл. НТИ / Черметинформация. – 1982. – Вып. 8(916). – С. 43-45.

50. Кульвиц А. В. Разработка ножниц сдвоенных кромкообрезных и продольной резки / А. В. Кульвиц, Н. А. Комар // Сталь. – 2006. – №8. – С. 68-69.

51. Сдвоенные кромкообрезные ножницы с катящимся резом конструкции ОАО "КО ВНИИМЕТМАШ" / В. И. Клопов, В. А. Дунаев, В. Е. Кутузов, А. В. Кульвиц // Черные металлы. – 2009. – № 9. – С. 11-13.

52. Сумский С. Н. Расчет кинематических и динамических характеристик плоских рычажных механизмов. Справочник. / С. Н. Сумский. – М. Машиностроение, 1980. – 312с.

53. Пат. 2089353 Российская федерация, МПК6 В23D15/04, В23D15/00. Ножницы для резки проката / А. В. Быков, В. А. Быков, А. М. Попиченко; заявитель Акционерное общество открытого типа "Уральский завод тяжелого машиностроения". – №94005240/02; заявл. 14.02.1994; опубл. 10.09.1997.

54. Пат. 2114722 Российская федерация, МПК6 В23D15/04, В26D1/09. Ножницы для резки проката / А. В. Быков, В. А. Быков; заявитель Акционерное общество открытого типа "Уральский завод тяжелого машиностроения". – №97111030/02; заявл. 25.06.1997; опубл. 10.07.1998.

55. Пат. 2118235 Российская федерация, МПК6 В23D15/00. Ножницы для резки проката / В. А. Быков; заявитель Акционерное общество открытого типа "Уральский завод тяжелого машиностроения". – 97110740/02; заявл. 25.06.1997; опубл. 27.08.1998.

56. Пат. 2136456 Российская федерация, МПК6 В23D15/04, В26D1/09. Ножницы для резки проката / А. В. Быков, В. А. Быков; заявитель Акционерное общество открытого типа "Уральский завод тяжелого машиностроения". – №98102345/02; заявл. 10.02.1998; опубл. 10.09.1999.

57. А.с. 1073012 СССР, МКИЗ В23D15/02. Ножницы для резки металла / В.Ф. Егоров, В.И. Люленков, В.П. Прилуков, В.М. Новиков (СССР). – №3405120/25-27; заявл. 12.03.82; опубл. 15.02.84, Бюл. №6.

58. А.с. 1349898 СССР, МКИЗ В23D15/08. Ножницы с верхним резом / В.Н. Кондратенко, А.А. Туник, В.П. Багнов (СССР). – №3938272/25-27; заявл. 28.06.85; опубл. 07.11.87, Бюл. №41.

59. Пат. 4337679 США, МКИ5 В26D7/02. Plate shears / Gleb L. Krylov, Ivan V. Stanovoi, Georgy P. Fuga – №243908; заявл. 02.07.79; опубл. 06.07.82.

60. UA28482 Україна, МПК6 B23D15/00, B23D17/00. Ножиці для різання прокату / Тунік О.О. та ін. ; заявник і патентовласник Закрите акціонерне товариство «Новокраматорський машинобудівний завод. – №200709082; заявл. 07.08.07; опубл. 10.12.07.

61. UA50929 Україна, МПК1 B23D15/04. Гідравлічні ножиці / Тарасов О.Ф. та ін. ; заявник і патентовласник Донбаська державна машинобудівна академія. – №2001074874; заявл. 11.07.01; опубл. 15.11.02, Бюл. №11.

62. А.с. 1569109 ССРСР, МКИЗ B23D15/02. Эксцентрикковые ножницы для резки металла / П.Я. Скичко и В.А. Скуме (СССР). – №4328083/27-27; заявл. 12.08.87; опубл. 07.06.90, Бюл. №21.

63. Патент RU 2105641 С1, МПК B23D15/04. Способ резки прокатных заготовок / Люленков В.И., Егоров В.Ф. (RU). – № 96101983/02; заявл. 01.02.1996; опубл. 27.02.1998, Бюл. № 6.

64. UA56374 Україна, МПК1 B23D33/00. Ножиці з нижнім різом і пристроєм забирання обрізі / Бортник В.В. та ін. ; заявник і патентовласник Закрите акціонерне товариство «Новокраматорський машинобудівний завод. – №201008369; заявл. 05.07.10; опубл. 10.01.00, Бюл. №1.

65. Патент RU 2333079 С2, МПК B23D35/00, B23D15/00. Комплект ножей ножниц холодной резки проката / А.Н. Луценко, В. А. Монида, А.А. Травников и др. (RU). – № 2006135023/02; заявл. 03.10.2006; опубл. 10.09.2008, Бюл. № 25.

66. Информационная система резчика слябов в обжимном цехе Евгений Азин, Сергей Будакова, Александр Кузьмин, Иван Фонов Современные технологии автоматизации №1, 2001, С. 22-25

67. Контроль порезки слитков на блюминге Игорь Иерусалимов, Юрий Карфидов, Александр Литвинов Современные технологии автоматизации №1, 2007, С. 18-22

68. Пат. 13090 Україна, МПК51 B23D25/00, B23D25/04. Ножиці для різання заготовки, що рухається / Багнов В.П., Чижик В.В., Калашников А.А., Царьов А.В., Козлов П.М.; заявник і патентовласник Закрите акціонерне товариство

«Новокраматорський машинобудівний завод. – №200508886; заявл. 19.09.05; опубл. 15.03.06, Бюл. №3.

69. Патент RU2279952 С1, МПК В23D15/02. Устройство для резки заготовок круглого сечения / В.И. Трусовский, Р. А. Закиров (RU). – № 2005109209/02; заявл. 30.03.2005; опубл. 20.07.2006, Бюл. № 20.

70. Патент RU2279953 С12, МПК В23D15/02 Устройство для резки заготовок круглого сечения / В.И. Трусовский, Р. А. Закиров, Е.В. Патук (RU). – № 2005109210/02; заявл. 30.03.2005; опубл. 20.07.2006, Бюл. № 20.

71. Патент RU2283732 С1, МПК В23D15/02 Устройство для резки заготовок круглого сечения / В.И. Трусовский, Р. А. Закиров (RU). – № 2005123270/02; заявл. 21.07.2005; опубл. 20.09.2006, Бюл. № 26.

72. Патент RU2006346 С1, МПК В23D15/04 Ножницы для горячей резки проката круглого и квадратного поперечного сечения / Ломсадзе З.Д., Ломсадзе Д.М., Нозадзе А.Д. и др (RU). – № 2006346; заявл. 02.01.1991; опубл. 30.01.1994.

73. Патент RU2274520 С1, МПК В23D15/02 Устройство для резки заготовок круглого сечения / В.И. Трусовский, Р. А. Закиров, В.Г. Шеркунов (RU). – № 2004129191/02; заявл. 04.10.2004; опубл. 20.04.2006, Бюл. №11.

74. Патент RU2277033 С1, МПК В23D15/02 Устройство для резки заготовок круглого сечения / В.И. Трусовский, Р. А. Закиров, В.Г. Шеркунов (RU). – № 2004137787/02; заявл. 23.12.2004; опубл. 27.05.2006, Бюл. №15.

75. Патент RU2470747 С1, МПК В23D15/02 Способ резки прокатных заготовок / А.Ю. Бодров, Ю.В. Бодров и др. (RU). – № 2011118932/02; заявл. 11.05.2011; опубл. 27.12.2012, Бюл. №36.

76. А.с. 878446 СССР, МКИЗ В23D15/04. Ножницы сортовые для резки профилей / П.П. Удалов, Л.Я. Макшанов и И.Н. Филькин (СССР). – №2879984/25-27; заявл. 06.02.80; опубл. 07.11.81, Бюл. №41.

77. А.с. 1146144 СССР, МКИЗ В23D15/04, В23D35/00. Сортовые кривошипные ножницы / Б.Н. Лагутин, В.Г. Кузнецова и др. (СССР). – №3712578/25-27; заявл. 11.01.84; опубл. 23.03.85, Бюл. №11.

78. А.с. 952478 СССР, МКИЗ В23D15/04, В23D33/08. Ножницы сортовые кривошипные / И.Е. Кудинов, В.А. Носков и др. (СССР). – №3003816/25-27; заявл. 14.11.80; опубл. 23.08.82, Бюл. №31.

79. А.с. 1685633 СССР, МКИЗ В23D21/00. Ножницы для резки заготовок круглого сечения / И.И. Онищенко, Н.С. Кирвалидзе и др. (СССР). – №4624810/27; заявл. 03.11.88; опубл. 23.10.91, Бюл. №39.

80. Исследование процесса разрезки прутков при повышенной температуре Романцев Б.А., Попов В.А., Калагин С.Д. Известия высших учебных заведений. Черная металлургия №7, 1991, с. 51-52

81. Особенности технологической нагруженности и процесса резки на сортовых ножницах обжимных и заготовочных станов Б. Поляков Технический альманах «Оборудование» №4, 2005, С. 64-69

82. Поляков Б.Н. Напряженно-деформированные и термоупругие состояния суппортов ножниц заготовочных прокатных станов / Б. Н. Поляков // Оборудование. Технический альманах.-2008.-№4.-с.34-39

83. К назначению угла наклона плоских клиновых ножей для резки сортового проката на ножницах с тангенциальным движением инструмента Трусовский В.И., Шеркунов В.Г. Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2012. №3. с. 21-23

84. Патент RU2249495 С1, МПК В23D35/00. Комплект ножей ножниц / Луценко А.Ю., Мониц В.А. и др. (RU). – № 2003119629/02; заявл. 30.06.2003; опубл. 10.04.2005, Бюл. № 10.

85. А.с. 496110 СССР, МКИ2 В23D15/00. Ножницы для резки проката / Н.С. Мингалеев, Ю.И. Поливодин, Ю. В. Шишкин. (СССР). – №2054946/22-2; заявл. 26.08.74; опубл. 25.12.75, Бюл. №47.

86. Сравнение адиабатического разделения и традиционной резки на ножницах Нойгебауэр Р., Кройзель В., Вейгель П. Черные металлы. 2010. № 7. С. 39-42.

87. Трусковский В.И. Ножницы для резки сортового проката и толстостенных труб / В. И. Трусковский, В.Г. Шеркунов // *Металлург*. 2012. – № 11. – С. 63–66.

88. А.с. 1234067 СССР, МКИЗ В23D15/00. Ножницы сортовые / А.Н. Катрахов и И.М. Куркин (СССР). – №3804025/25-27; заявл. 22.10.84; опубл. 30.05.86, Бюл. №20.

89. Пат. 4385538 США, МКИ5 В26D15/02. Shearing device for cutting bar-shaped stock such as rolled steel billets / Hans Bieri, Karl Rimmele; №237847; заявл. 24.02.81; опубл. 31.05.83, НКИ 83/302.

90. Оценка стойкости ножей для резки сортового проката Кутыш-кин А.В., Кутышкина О.А. Известия высших учебных заведений. Черная металлургия №10, 1996, с. 32-33

91. Влияние упрочняющей обработки на стойкость ножей холодной резки В.П. Прилуков, Ю.С. Самсонов, В.С. Чалков, В.И. Люленков, В.С. Поламарчук Известия высших учебных заведений. Черная металлургия №8, 1989, с. 147-149

92. Вибрационные гильотинные ножи: высокое качество поверхности реза Люке М., Стонис М. Черные металлы. 2009. № 3. С. 43-44.

93. Автоматизированное управление участком делительных ножниц стана 2800 ОАО "Уральская сталь" О. Зементов Современные технологии автоматизации №1, 2011, С. 84-87

94. Компьютерное моделирование поперечного прогиба ножевой балки листовых ножниц Васильев К.И., Садеков Н.А. Вестник МГТУ «Станкин». Научный рецензируемый журнал. М.: МГТУ «Станкин», №2(14), 2011, с. 27-30

95. А.с. 1804963 СССР, МКИЗ В23D15/08. Ножницы гильотинные для обрезки полосового материала / В.А. Могильницкий, В.Е. Балаболко и др. (СССР). – №4783056/27; заявл. 05.12.89; опубл. 30.03.93, Бюл. №12.

96. Патент RU2071876 С1, МПК В23D15/04 Гильотинные ножницы / Л.В. Мешков, В. Г. Антипанов и др. (RU). – № 95102442/08; заявл. 21.02.1995; опубл. 20.01.1997.

97. Пат. US5237901 США, МКИ5 В23D15/04. Shear / Philip R. Warga, III, North Canton; №863872; заявл. 06.04.92; опубл. 24.08.93.

98. А.с. SU1613251 СССР, МКИЗ В23D15/06. Ножницы гильотинные для резки металла / П.А. Замай, В.А. Могильницкий и А.А. Калашников (СССР). – №4469512/27-27; заявл. 04.08.88; опубл. 15.12.90, Бюл. №46.

99. UA37358 Україна, МПК51 В23D15/00. Ножиці гідравлічні для різання штабового прокату / Чижик В.В., Калашніков А.А. та ін. ; заявник і патентовласник Закрите акціонерне товариство «Новокраматорський машинобудівний завод. – №200807818; заявл. 09.06.08; опубл. 25.11.08, Бюл. №22.

100. Патент RU2291047 С2, МПК В26D1/08, В23D15/08, В23D25/08. Гильотинные ножницы для резки листового проката / А.В. Быков (RU). – № 2005105156/02; заявл. 24.02.2005; опубл. 10.01.2007, Бюл. №1.

101. UA49274 Україна, МПК51 В23D15/00. Ножиці гідравлічні гільйотинні з нижнім різом / Білобров Ю.М., Бортник В.В. та ін. ; заявник і патентовласник Закрите акціонерне товариство «Новокраматорський машинобудівний завод. – №200911056; заявл. 02.11.09; опубл. 26.04.10, Бюл. №8.

102. UA69331 Україна, МПК51 В23D35/00, В23D25/00, В23D15/00. Комплект ножів ножиців для різання листового матеріалу / Суков Г.С., Алдохін Д.В. та ін.; заявник і патентовласник Закрите акціонерне товариство «Новокраматорський машинобудівний завод. – №201112194; заявл. 18.10.11; опубл. 25.04.12, Бюл. №8.

103. Определение геометрических параметров верхнего ножа листовых ножниц В.П. Прилуков, В.И. Люленков, В.Ф. Егоров Известия высших учебных заведений. Черная металлургия №10, 1989, с. 141-142

104. Патент RU 2212986 С2, МПК В23D35/00. Нож шевронный для резки листового материала / Ю. С. Котелевец, В. А, Арашкевич, Ю. Д. Иванов и др. (RU). – № 2001120645/02; заявл. 23.07.2001; опубл. 27.09.2003.

105. Патент RU2338633 C2, МПК В23D15/08, В21D43/09. Ножницы для поперечной резки толстых листов с эксцентриковым приводом / Хайтце Гехард (DE), Баур Томас (DE). – № 2005122948/02; заявл. 15.12.2003; опубл. 10.02.2006.

106. Патент RU2420374 C1, МПК В23D15/04. Устройство для резки / Баур Томас (DE). – № 2009143858/02; заявл. 07.0.2008; опубл. 10.06.2011.

107. А.с. 810403 СССР, МКИЗ В23D35/00. Нож для листовых ножниц с катящимся резом / Р. А. Адамович, Л. М. Рудельсон, А. М. Рогоза, А. Д. Пальмин (СССР). – №2739862/25-27; заявл. 09.01.79; опубл. 07.03.81, Бюл. №9.

108. А.с. 902989 СССР, МКИЗ В23D15/06. Нож для ножниц с катящимся резом / Р. А. Адамович, Л. М. Рудельсон, А. М. Рогоза, А. Д. Пальмин (СССР). – №2935090/25-27; заявл. 04.06.80; опубл. 07.02.82, Бюл. №5.

109. А.с. 984734 СССР, МКИЗ В23D31/04, В23D15/08. Ножницы для резки листового материала / Р. А. Адамович, Л. М. Рудельсон, А. М. Рогоза, А. Д. Пальмин и О.Р. Черников (СССР). – № (21) 3326831/25-27; заявл. 05.08.81; опубл. 30.12.82, Бюл. №48.

110. А.с. 1828619 СССР, МПК6 В23D15/06. Кромкообрезные ножницы / Д.П. Щербаков, И. М. Калетин, О.В. Горелов, А.В. Петров, В.Е. Кутузов (СССР). – №4616340/27; заявл. 06.12.86; опубл. 27.12.95, Бюл. №5.

111. Пат. 77377 Україна, МПК1 В23D15/00. Ножиці для різання листового матеріалу / Козлов П.М., Тітаренко О.І. та ін. – №201209646; заявл. 09.08.12; опубл. 11.02.13, Бюл. №3.

112. Пат. 82861 Україна, МПК1 В23D15/00. Ножиці для поперечного різання товстих листів з эксцентриковим приводом / Хайтце Гехард, Баур Томас – №200507208; заявл. 15.12.03; опубл. 26.05.08, Бюл. №10.

113. Опыт эксплуатации ножниц "с катящимся резом" Зырянов В.В., Иванов А.М., Гайтанов И.Ю. *Металлург.* 2004. № 3. С. 51-52.

114. Бойденко А. Н. Об опыте внедрения нового способа резания толстолистового проката ножницами с катящимся резом / А. Н. Бойденко // Удосконалення процесів і обладнання обробки тиском в металургії і

машинобудуванні : темат. зб. наук. пр. – Краматорськ – Слов'янськ, 2000. – С. 95-96.

115. Патент 2020046 Российская федерация С1, МПК В23D15/06. Ножницы для резки листового металла / Щербаков Л.П., Калетин И.М., Горелов О.В., Петров А.В., Кутузов В.Е. – № 4952445/27; заявл. 28.06.1991; опубл. 30.09.1994.

116. Патент 2419521 Российская федерация С2, МПК В23D19/06. Кромкообрезные ножницы / Клопов В.И., Кутузов В.Е., Дунаев В.А., Кульвиц А.В. – № 2009104275/02; заявл. 09.02.2009; опубл. 09.02.2009.

117. Патент 2342227 Российская федерация С2, МПК В23D15/06. Ножницы для резки листового материала / Клопов В.И., Кутузов В.Е., Дунаев В.А. и др. – № 2007103054/02; заявл. 25.01.2007; опубл. 27.12.2008.

118. Пат. 74890 Україна, МПК1 В23D15/00. Ножиці для різання листового прокату / Суков Г.С., Вольвач О.Є., Царьов А.В. та ін.; заявник і патентовласник Публічне акціонерне товариство «Новокраматорський машинобудівний завод. – №201206129; заявл. 21.05.12; опубл. 12.11.12, Бюл. №21.

119. Патент 2470748 Российская федерация С1, МПК В23D15/02, В23D15/14, В23D36/00. Ножницы с переменной величиной резки / Кларк Майкл Тревор (GB), Чемпион Николас (GB), Стоунклифф Дэвид (GB) – № 2011123909/02; заявл. 12.11.2009; опубл. 27.12.2012, Бюл. № 36.

120. Пат. 11318 Україна, МПК1 В23D15/08, В23D15/14. Ножиці для різання штабового матеріалу / Гриценко С.А., Слещьких В.І., Литвинов В.І. та ін.; заявник і патентовласник Закрите акціонерне товариство «Новокраматорський машинобудівний завод. – №200506142; заявл. 21.06.05; опубл. 15.12.05, Бюл. №21.

121. А.с. 1038107 СССР, МПК6 В23D15/06. Ножницы для резки листа / Д.П. Щербаков, И. М. Калетин и О.В. Горелов (СССР). – №3443656/25-27; заявл. 26.05.82; опубл. 30.08.83, Бюл. № 32.

122. Пат. 6748 Україна, МПК1 В23D15/04. Ножиці для різання листового матеріалу / Вольвач О.Є., Білобров Ю.М., Калашніков А.А. та ін.; заявник і патентовласник Закрите акціонерне товариство «Новокраматорський

машинобудівний завод. – №20041109273; заявл. 12.11.04; опубл. 16.05.05, Бюл. №5.

123. Патент 2058859 Российская федерация С1, МПК В23D15/06. Кромкообрезные ножницы / Калетин И.М., Щербаков Л.П., Горелов О.В., Кутузов В.Е., Петров А.В. – № 4905279/08; заявл. 28.01.1991; опубл. 27.04.1996.

124. Пат. 57380 Україна, МПК1 В23D31/04. Ножиці здвоєні кромкообрізні / Реука Ю.Ю., Калашников А.А.; заявник і патентовласник Закрите акціонерне товариство «Новокраматорський машинобудівний завод. – №2002097332; заявл. 10.09.02; опубл. 16.06.03, Бюл. №6.

125. Пат. 76981 Україна, МПК1 В23D15/00. Ножиці здвоєні кромкообрізні / Коваленко В.І., Реука Ю.Ю., Калашніков А.А. та ін.; заявник і патентовласник Публічне акціонерне товариство «Новокраматорський машинобудівний завод. – №201207878; заявл. 26.06.12; опубл. 25.01.13, Бюл. №2.

126. А.с. 1044436 СССР, МКИЗ В23D19/04. Инструмент для обрезки листового материала / И. И. Бондяев, И. И. Овшеверов, П. Н. Смирнов, В. В. Белан (СССР). – №3452606/25-27; заявл. 15.06.82; опубл. 30.09.83, Бюл. №36.

127. А.с. 1177084 СССР, МКИ4 В23D19/06. Устройство для обрезки кромки полосового материала и ее крошения / И. И. Бондяев, П. Н. Смирнов, И. И. Овшеверов, В. В. Белан (СССР). – №3728561/25-27; заявл. 20.04.84; опубл. 07.09.85, Бюл. №33.

128. А.с. 1377171 СССР, МКИ4 В23D19/04. Устройство для обрезки и крошения кромок полосового материала / И. И. Бондяев, П. Н. Смирнов, И. И. Овшеверов, В. М. Сергиенко (СССР). – №4078396/31-27; заявл. 18.06.86; опубл. 29.02.88, Бюл. №8.

129. Патент 2286865 Российская федерация С2, МПК В23D31/04, В23D19/06. Комбинированные дисковые кромкокрошительные ножницы / Бортник В.В., Реука Ю.Ю., Калашников А.А. – № 2004126715/02; заявл. 03.09.2004; опубл. 10.11.2006, Бюл. №31.

130. Пат. 47149 Україна, МПК6 В23D19/04. Спосіб різання комбінованими дисковими кромкокришільними ножицями / Реука Ю. Ю. та ін.; заявник і

патентовласник ЗАТ «Новокрамат. маш. з-д». – №2001085600; заявлено 07.08.2001; опубл. 17.06.2002, Бюл. №3.

131. Пат. 47074 Україна, МПК6 В23D19/04. Комбіновані дискові кромкообрізні ножиці / Реука Ю. Ю. та ін.; заявник і патентовласник ЗАТ «Новокрамат. маш. з-д». – №2001075043; заявлено 17.07.2001; опубл. 17.06.2002, Бюл. №3.

132. А.с. 984724 СССР, МКИЗ В23D19/06. Дисковые ножницы / В. Г. Носов, А. Г. Цатуров, Е. И. Цибуков, А. М. Ещенко (СССР). – №3279928/25-27; заявл. 27.04.81; опубл. 03.12.82, Бюл. №48.

133. А.с. 1177083 СССР, МКИ4 В23D19/00. Дисковые ножницы / О. А. Суховеев, В. Г. Носов, В. Л. Акопян, А. М. Ещенко (СССР). – №3722905/25-27; заявл. 10.04.84; опубл. 07.09.85, Бюл. №33.

134. А.с. 984723 СССР, МКИЗ В23D19/04. Дисковые ножницы / И. И. Овшеверов, П. Н. Смирнов, В. В. Белан, А. Н. Макаров (СССР). – №3347013/25-27; заявл. 06.10.81; опубл. 30.12.82, Бюл. №48.

135. А.с. 1669643 СССР, МКИ5 В23D19/04. Дисковые кромкообрезные ножницы / В. М. Фендриков, В. В. Лучанинов, С. В. Лучанинов (СССР). – №4497350/25-27; заявл. 24.10.88; опубл. 15.08.91, Бюл. №30.

136. А.с. 925562 СССР, МКИЗ В23D19/04. Дисковые ножницы / В. И. Дунаевский, Г. М. Попов, В. Г. Клименко, Ю. М. Кукуш, В. Д. Шейнкман, П. И. Маслаков, Н. И. Лежанин (СССР). – №2963337/25-27; заявл. 25.07.80; опубл. 07.05.82, Бюл. №17.

137. Пат. 35920 Україна, МПК1 В23D19/04. Дискові кромкообрізні ножиці / Гриценко С.А., Новоселов С.В., Білобров Ю.И. та ін.; заявник і патентовласник Публічне акціонерне товариство «Новокраматорський машинобудівний завод. – №99041923; заявл. 06.04.99; опубл. 16.04.01, Бюл. №3.

138. Патент 2285592 Российская федерация С2, МПК В23D19/06. Способ резки толстолистовой стали дисковыми ножницами / Драпенко А.Д., Кузнецов В.Г., Долгушин В.Н. та ін. – № 2004127530/02; заявл. 14.09.2004; опубл. 20.10.2006, Бюл. №29.

139. Патент 2368468 Российская федерация С2, МПК В23D19/06, В23D15/12, В23D5/04. Механизм привода вращения ножей дисковых ножниц /Плахтин В.Д., Синев О.В., Саков А.Н. – № 2007142614/02; заявл. 19.11.2007; опубл. 27.09.2009, Бюл. №27.

140. Пат. 4860 Україна, МПК7 В23D19/04. Дискові ножиці / Боровік П. В. ; заявник і патентовласник Донбаський гірничо–металургійний інститут. – №20040503435; заявл. 06.05.04; опубл. 15.02.05, Бюл. №2.

141. Пат. 25865 Україна, МПК В23D19/00. Ножиці дискові з подавальними роликами / Гриценко С. А., Калашніков А. А., Багнов В. П. та ін.; заявник і патентовласник ЗАТ «Новокраматорський машинобудівний завод». – №200703913; заявл. 10.04.07; опубл. 27.08.08, Бюл. №13.

142. Пат. 35365 Україна, МПК С2 В23D19/06. Ножиці дискові / Суков Г.С., Гриценко С. А., Євгиненко І.О. та ін.; заявник і патентовласник ЗАТ «Новокраматорський машинобудівний завод». – №200805588; заявл. 29.04.08; опубл. 10.09.08, Бюл. №17.

143. Патент WO2012120294A1 МПК В23D19/04, МПК В23D19/06, МПК В23D33/02, МПК В21D43/09 Rotary shear device and method / Michael N. Clark (GB), Richard Donkin (GB) et al.; №PCT/GB2012/0504095; заявл. 06.03.12; опубл. 13.09.12.

144. Пат. 67033 Україна, МПК В23D19/00. Агрегат крайкообрізних ножиців / Суков Г.С., Гриценко С. А., Євгиненко І.О. та ін.; заявник і патентовласник ЗАТ «Новокраматорський машинобудівний завод». – №200805588; заявл. 29.04.08; опубл. 10.09.08, Бюл. №17.

145. Пат. 63571 Україна, МПК В23D19/00. Дискові ножиці / Боровік П. В., Селезньов М.Є.; заявник і патентовласник Донбаський гірничо–металургійний інститут. – №201103732; заявл. 28.03.11; опубл. 10.10.11, Бюл. №19.

146. Пат. 68029 Україна, МПК В23D19/00. Ножиці дискові з роликовим притискачем / Коваленко В.І., Калашников А.А., Реука Ю.Ю., Грибанов .В., Вишняков О.О.; заявник і патентовласник ПАТ «Новокраматорський

машинобудівний завод». – №201110676; заявл. 05.09.11; опубл. 12.03.12, Бюл. №5.

147. Пат. 4527454 США, В23D19/06. Rotary sheet-metal trimming shear / Karl R. Ross, Herbert Dubno; №526113; заявл. 24.08.83; опубл. 09.07.85.

148. Пат. 4964324 США, МКИ5 В26D1/56. Ножницы для обрезки боковых кромок / Drew C. Pavlick; SMS Engineering Inc. – №270080; заявл. 14.11.88; опубл. 23.10.90, НКИ 83/302.

149. Пат. 20040031367A1 США, В26D1/24, В23D19/04. Compact rotary shears / Horst Grafe (DE), Matthias Beuter (DE); – №PCT/EP01/12377; заявл. 26.10.01; опубл. 19.02.04.

150. Современные тенденции развития оборудования для резки листов на примере ножниц дисковых кромкообрезных стана «Трио – Лаута – 2150» / А. А. Калашников, С. П. Кирпичников, А. В. Царев, А. И. Козняков // Обработка материалов давлением: Сб. науч. тр. – Краматорск, 2009. – № 2 (21). – С. 349-351.

151. Дисковые ножницы: А.с. 1438929 СССР, МКИ⁴ В23D19/00 / И.И. Бондяев, И.И. Овшеверов, П.Н. Смирнов, Б.Я. Омельченко – Магнитог. металлург. комб. им. В.И.Ленина, Магнитог. горно-металлург. ин-т. им. Г.И. Носова – №4262392/31-27; Заявл. 22.04.87; Опубл. 23.11.88, Бюл. №43.

152. Дисковые ножницы: А.с. 1368113 СССР, МКИ В23D19/06 / Е.Г. Бондаренко, В.Г. Павловский, И.А. Коротецкий – ЦКТБ Центросоюза. – №4033809/28/27; Заявл. 11.03.86; Опубл. В.Б.И., 1988, Бюл. №3.

153. Конструкция дисковых ножниц для порезки тончайших полос и фольги / В. И. Дунаевский, А. Н. Бойденко, М. В. Асеева // Совершенствование процессов и оборудования обработки давлением в металлургии и машиностроении : Сб. науч. тр. – Краматорск, 1998. – С. 73-78.

154. Дисковые ножницы: А.с. 1196165 СССР, МКИ⁴ В23D19/04 / И.И. Бондяев, П.Н. Смирнов, И.И. Овшеверов, В.В. Белан – Магнитог. металлург. комб. им. В.И.Ленина, Магнитог. горно-металлург. ин-т. им. Г.И. Носова – №3705464/25-27; Заявл. 01.03.84; Опубл. 07.12.85, Бюл. №45.

155. Дисковые ножницы: А.с. 1186406 СССР, МКИ⁴ В23D19/00 / Г.Н. Сасонко, В.Б. Бельтюков, А.И. Давидсон, А.И. Егоров, А.А. Зыков – Ленинградское специальное конструкторское бюро шлифовального оборудования – №3723005/25-27; Заявл. 06.04.84; Оpubл. 23.10.85, Бюл. №39.

156. Дисковые ножницы: А.с. 1009650 СССР, МКИ В23D19/00 / Н.В. Кшистан, В.Д. Шейнкман, Н.И. Лежанин – Славянский филиал Всесоюзного ордена Ленина научно-исслед. и проектно-констр. ин-та метал. машиностроения – №3315918/25-27; Заявл. 10.07.81; Оpubл. 07.04.83, Бюл. №13.

157. Дисковые ножницы: А.с. 1590216 СССР, МКИ⁵ В23D19/04 / А.П. Лукьяненко, Д.Б. Зеув, К.Л. Кажаяев – ВНИИ метизной пром. и Магнитогорский калибровочный завод– №4429151/27-27; Заявл. 18.02.88; Оpubл. 07.09.90, Бюл. №33.

158. Ножницы для продольной резки полосового материала: А.с. 1449250 СССР, МКИ⁴ В23D19/00 / Т.В. Бровман – Краматорский индустриальный ин-т – №4193388/31-27; Заявл. 10.02.87; Оpubл. 07.01.89, Бюл. №1.

159. Ножницы дисковые для продольной резки полосового материала: А.с. 837614 СССР, МКИ³ В23D19/00 / В.И. Дунаевский, А.П. Самарин, В.Д. Шейнкман, А.Н. Сергеевков, В.М. Козырь, Н.И. Лежанин – Славянский филиал Всесоюзного ордена Ленина научно-исслед. и проектно-констр. ин-та метал. машиностроения – №2817791/25-27; Заявл. 09.07.79; Оpubл. 15.06.81, Бюл. №22.

160. Патент 2089355 Российская федерация, МПК В23D19/00. Способ продольной резки стали толщиной 2-6 мм / Антипанов В.Г., Афанасьев В.Ф., Молчанов В.С. – №95102539; заявл. 21.02.1995; опубл. 10.09.1997.

161. А.с. 1618525 СССР, МКИ В23D19/04. Дисковые ножницы / В. Г. Антипанов и В.С. Молчанов (СССР). – №4487462/27; заявл. 28.09.88; опубл. 07.01.91, Бюл. №1.

162. А.с. 1683905 СССР, МКИЗ В23D19/06. Дисковые ножницы / Н. И. Павликов, С.А. Драгомаров (СССР). – №4642790/27; заявл. 30.01.89; опубл. 15.10.91, Бюл. №38.

163. Патент 2317180 Российская федерация, МПК, С2 В23D19/06. Дисковые ножницы / Гриценко С.А., Петрусенко В.А., Смирнов В.Г., Рева Е.В. – № 2004115771/02; заявл. 24.05.2004; опубл. 20.02.2008, Бюл. № 5.

164. А.с. 1606265 СССР, МКИ, В23D19/04. Дисковые ножницы / В. Г. Антипанов, В.И. Гридневский, Н.Т. Пахомов, В.В. Шварцман и В.В. Пахарев (СССР). – №4472342/25-27; заявл. 10.08.88; опубл. 15.11.90, Бюл. №42.

165. Патент 2458765 Российская федерация, МПК, С1 В23D19/06. Дисковые ножницы / Корнилов В.Л., Архандеев А.В., Крюков Д.М., Щуров Г.В. – № 2011119142/02; заявл. 12.05.2011; опубл. 20.08.2012, Бюл. № 23.

166. Пат. 4466 Украина, МПК В23D19/00. Дискові ножиці. / Гриценко С.А., Петрусенко В.А., Смирнов В.Г., Рева О.В.; заявник і патентовласник ЗАТ «Новокраматорський машинобудівний завод». – №20040503665; заявл. 17.05.04; опубл. 17.01.05, Бюл. №1.

167. Пат. 4922779 США, В23D19/06. Sitting shears / Manfred Frits. Hans Scheel; №185095; заявл. 22.04.88; опубл. 08.05.90.

168. Пат. 6631664В2 США, В26D1/24. Slitting shears / Ingolf Muller; №09/902530; заявл. 10.07.01; опубл. 14.10.03.

169. Пат. 8221873В2 США, В23D19/06. Film slitter, film and film slitting method / Eijiro Nagao (JP), Osamu Noguchi (JP); №12/569696; заявл. 29.09.09; опубл. 17.07.12.

170. Освоение нового агрегата продольного роспуска / О.В. Симененко, В.С. Мовшович, А.Г. Николенко и др. // Metallurg. и горнорудн. пром-сть. – 2008. - № 5. – С. 21-23.

171. Патент 2456131 Российская федерация, МПК, С1 В23D15/06, В23D19/06 / Гринавцев В.Н., Гринавцев О.В., Ганул Е.В. – № 2011103750/02; заявл. 02.02.2011; опубл. 20.07.2012, Бюл. № 20.

172. Пат. 0193693B1 European patent specification, B26D1/00. Rotary drum shear / Eijiro Nagao (JP), Osamu Noguchi (JP); №85730035.4; заявл. 10.06.86; опубл. 11.12.91 Bulletin 91/50.

173. Патент 2286864 Российская федерация, МПК, C2 B23D25/12. Летучие барабанные ножницы / Елецких В.И., Стеч В.С., Барабаш А.В., Куликов А.И. – № 2002105403/02; заявл. 20.09.2003; опубл. 10.11.2006, Бюл. № 31.

174. Патент 2314898 Российская федерация, МПК, C1 B23D25/12. Летучие барабанные ножницы / Антипанов В.Г., Корнилов В.Л., Носов В.Л., Куницин Г.А. – № 2006109649/02; заявл. 27.03.2006; опубл. 20.01.2008, Бюл. № 2.

175. Пат. 4566 Україна, МПК B23D25/12. Летючі ножиці / Єлецьких В.І., Гриценко С.А., Стеч В.С., Капорович С.Е., Рубленко Н.І.; заявник і патентовласник ЗАТ «Новокраматорський машинобудівний завод». – №20040604373; заявл. 07.06.04; опубл. 17.01.05, Бюл. №1.

176. Пат. 41737 Україна, МПК B23D25/12. Летючі барабанні ножиці. / Білобров Ю.М., Єлецьких В.І., Стеч В.С., Барабаш А.В.; заявник і патентовласник ЗАТ «Новокраматорський машинобудівний завод». – №2001031488; заявл. 05.03.01; опубл. 17.09.01, Бюл. №8.

177. Пат. 41988 Україна, МПК B23D25/00. Летючі ножиці для поперечного різання сталеві смуги. / Волошин О.І., Резников В.І., Калашников А.А., Реука Ю.Ю. та ін.; заявник і патентовласник ЗАТ «Новокраматорський машинобудівний завод». – №200812335; заявл. 20.10.08; опубл. 25.06.09, Бюл. №12.

178. Пат. 47171 Україна, МПК B23D25/12. Летючі барабанні ножиці. / Білобров Ю.М., Єлецьких В.І., Стеч В.С., Барабаш А.В.; заявник і патентовласник ЗАТ «Новокраматорський машинобудівний завод». – №2001085768; заявл. 14.08.01; опубл. 17.06.02, Бюл. №2.

179. Пат. 50446 Україна, МПК B23D25/12. Летючі барабанні ножиці. / Єлецьких В.І., Стеч В.С., Барабаш А.В., Куликов О.І.; заявник і патентовласник ЗАТ «Новокраматорський машинобудівний завод». – №2002010333; заявл. 14.01.2002; опубл. 15.10.02, Бюл. №10.

180. Пат. 62499 Україна, МПК В23D25/12. Летючі барабанні ножиці. / Білобров Ю.М., Колесников Ю.М., Гриценко С.А., Єлецьких В.І.; заявник і патентовласник ЗАТ «Новокраматорський машинобудівний завод». – №2003042900; заявл. 03.04.03; опубл. 15.12.03, Бюл. №12.

181. Патент 2112631 Российская федерация, МПК, С1 В23D25/12. Летучие барабанные ножницы. / Антипанов В.Г., Сафронов М.Ф., Афанасьев В.Ф., Кривоносов С.В. – № 97105643/02; заявл. 09.04.1997; опубл. 10.06.1998.

182. Патент 2227086 Российская федерация, МПК, С2 В23D25/12. Барабанные летучие ножницы для резки горячего проката. / Котелевец Ю.С. (UA), Модеев В.Ф. (RU), Синев О.В. (RU), Гуськов А.Н. (UA), Сайко В.В. (UA) – № 2002114296/022002114296/02; заявл. 31.05.2002; опубл. 20.04.2004.

183. Патент 2103117 Российская федерация, МПК, С1 В23D25/12. Барабанные летучие ножницы. / Антипанов В.Г., Сеничев Г.С., Шайхисламов И.Х., Корнилов В.Л. – № 96102307/02; заявл. 08.02.1996; опубл. 27.01.1998.

184. А.с. 1539003 СССР, МКИ, В23D25/12. Барабанные летучие ножницы. / А.К. Гребе, В.И. Белобров, Г.И. Ганжа, Н.М. Шевцов и др. (СССР). – №4432788/25-27; заявл. 27.05.88; опубл. 30.01.90, Бюл. №4.

185. А.с. 1590223 СССР, МКИ, В23D25/12. Барабанные летучие ножницы. / А.К. Гребе, В.И. Белобров, Г.И. Ганжа, Н.М. Шевцов и А.З. Слоним (СССР). – №4397685/25-27; заявл. 25.03.88; опубл. 07.09.90, Бюл. №33.

186. А.с. 1669648 СССР, МКИ, В23D25/12. Барабанные летучие ножницы. / В.Г. Юнышев, В.А. Камнев, А.Х. Винокурский и В.С. Пастухова (СССР). – №4393553/25-27; заявл. 18.03.88; опубл. 15.08.91, Бюл. №30.

187. А.с. 1731477 СССР, МКИ, В23D25/12. Барабанные ножницы для резки листового материала. / А.К. Гребе, И.Ф. Дворжак, В.А. Федоринов, В.П. Яшин и А.В. Дегтярев (СССР). – №4745329/27; заявл. 08.08.89; опубл. 07.05.92, Бюл. №17.

188. А.с. 1803280 СССР, МКИ, В23D25/12. Барабанные летучие ножницы. / А.К. Гребе, Ф.А. Фурманов, В.И. Рудерфер, В.П. Яшин и В.И. Белобров (СССР). – №4908241/27; заявл. 20.11.90; опубл. 23.03.93, Бюл. №11.

189. Пат. 4399727 США, B23D19/06. Drum shear / Shunji Ohmori, Kanji Hayashi, Yukio Hiasa, Nobutaka Maeda, Shoichi Hashimoto, Hiroki Yoshiya (JP); №228699; заявл. 26.06.81; опубл. 23.08.83.

190. Пат. 4630514 США, B23D25/12. Rotary drum shear / Shunji Ohmori, Hiroynki Takenaka, Akira Hozoji, Kazunori Kono, Kiyomitsu Yoshikawa, Seichi Kajihara, (JP); №228699; заявл. 26.06.81; опубл. 23.08.83.

191. Пат. 5216962 США, B23D25/12. Shear for shearing laminar elements / Marcello Parigi, Pompeo Rovelli (IT); №765408; заявл. 25.09.91; опубл. 08.06.93.

192. Пат. 6272959 США, B23D25/12. Continuously rotating shears / Fausto Drigani, Glampetro Pittari (IT); №09/408105; заявл. 29.09.99; опубл. 14.08.01.

193. Пат. 6742427B2 США, B23D25/12. Helical rotary drum shears / John R. Buta (US); №10/318897; заявл. 13.10.02; опубл. 01.06.04.

194. Пат. 20110017038A1 США, B23D25/08. Rotary shear / William X. Shen (US); №12/506682; заявл. 21.07.09; опубл. 27.01.11.

195. Опыт разработки и внедрения системы управления участком мерной порезки Михаил Блаженков, Максим Саньков, Денис Ченцов Современные технологии автоматизации №2, 1998, С. 52-55

196. Создание летучих ножниц для высокоскоростной резки готовых полос в линия станом бесконечной прокатки/ В. С. Стеч, В. И. Елецких, Д. А. Марченко // Удосконалення процесів і обладнання обробки тиском в металургії і машинобудуванні : темат. зб. наук. пр. – Краматорськ, 2001. – С. 619-622.

197. Совершенствование высокопроизводительных летучих барабанных ножниц для мерной резки полосового проката Колесников Ю.Н., Гриценко С.А., Елецких В.И., Поливанов В.А. Металлург. 2004. № 11. С. 48-49.

198. Пути повышения скоростных параметров барабанных летучих ножниц для мерной резки полосового проката Белобров Ю.Н., Елецких В.И., Гриценко С.А. Металлург. 2006. № 11. С. 71-73.

199. Оценка погрешности систем синхронизации летучих ножниц прокатных станом Файнштейн В.Г., Цветнов В.А., Сванидзе В.З. Металлургическая и горнорудная промышленность №1 (246) 2008, С. 132-135

200. Елецких В. И. Оптимизация скоростных параметров барабанных летучих ножниц с числовым программным управлением функцией мерного реза / В. И. Елецких, С. А. Грищенко // Обработка материалов давлением: Сб. науч. тр. – Краматорск, 2009. – № 2 (21). – С. 352-357

201. Точность мерного реза на летучих ножницах с электрическим выравниванием скоростей Анисимов Е.Ф., Королев В.В., Иванов Е.Б. *Металлург* №10, 2011, С. 87-88

202. Патент 2328361 Российская федерация, МПК, С2 В23D25/08. Кривошипные ножницы с двумя ножевыми парами при резке катанной полосы / Хайтце Герхард (DE), Гребе Ульрих (DE), Боймер Клаус (DE). – № 2005122500/02; заявл. 15.12.2003; опубл. 10.07.2008. Бюл. №19.

203. А.с. 1532208 СССР, МКИ, В23D25/06. Летучие ножницы для резки полосового материала / Ю.И. Агашков, В.Н. Поносов, А.П. Белоусов и М.Ю. Герулайтес (СССР). – №4392142/25-27; заявл. 14.03.88; опубл. 30.12.89, Бюл. №48.

204. А.с. 1599160 СССР, МКИ, В23D23/02. Летучие ножницы / В.И. Дунаевский, В.Л. Шейкман, В.И. Елеуких, Е.Г. Липовой и Г.И. Небаба (СССР). – №4425648/25-27; заявл. 04.04.88; опубл. 15.10.90, Бюл. №38.

205. А.с. 1055594 СССР, МКИ, В23D25/00, В23D25/16. Летучие ножницы. / Е.И. Третьяков, Ю.Н. Белобров, В.П. Семенихин, Е.П. Прибыш и А.А. Гостев (СССР). – №3437012/25-27; заявл. 14.05.82; опубл. 23.11.83, Бюл. №43.

206. Пат. 57337 Україна, МПК В23D25/06. Летючі ножиці / Єлецьких В.І., Стеч В.С., Барабаш А.В.; заявник і патентовласник ЗАТ «Новокраматорський машинобудівний завод». – №2002086960; заявл. 23.08.2002; опубл. 16.06.03, Бюл. №6.

207. Пат. 60681 Україна, МПК В23D25/02, В23D25/06. Летючі ножиці. / Єлецьких В.І., Стеч В.С., Сорокин Є.І.; заявник і патентовласник ЗАТ «Новокраматорський машинобудівний завод». – №2003010814; заявл. 30.01.2003; опубл. 15.10.03, Бюл. №10.

208. А.с. 1028442 СССР, МКИ, В23D25/10. Летучие ножницы / С.Н. Сумский, В.Н. Корнев, Д.Н. Тарасов, Р.Д. Войдин и др. (СССР). – №3366399/25-27; заявл. 04.11.81; опубл. 15.07.83, Бюл. №26.

209. А.с. 998016 СССР, МКИ, В23D25/10. Параллелограммные летучие ножницы / С.Н. Сумский, В.Н. Корнев, Д.Н. Тарасов, Р.Д. Бондин, Ю.А. Федоровский и др. (СССР). – №3351262/25-27; заявл. 04.11.81; опубл. 23.02.83, Бюл. №7.

210. А.с. 994161 СССР, МКИ, В23D25/10. Летучие ножницы / А.Ф. Белоусов, Г.Р. Хейфец, Е.Г. Булгаков, и В.И. Анисимов (СССР). – №3347835/25-27; заявл. 16.07.81; опубл. 07.02.83, Бюл. №5.

211. А.с. 1669647 СССР, МКИ, В23D25/02. Летучие ножницы / А.К. Греббе, Г.Р. Хейфец, К.П. Супличенко, В.И. Торопченко и Ю.С. Котелевец (СССР). – №4690485/27; заявл. 10.05.89; опубл. 15.08.91, Бюл. №20.

212. А.с. 1704962 СССР, МКИ, В23D25/06. Летучие ножницы / В.И. Дунаевский, Л.К. Винников, В.Д. Шейнкман, В.И. Елецких и Г.И. Небаба (СССР). – №4720916/27; заявл. 19.07.89; опубл. 15.01.92, Бюл. №2.

213. Пат. 4319505 США, В23D25/06. Pendulum-type flying shear / Yukio Otake. Yuji Kikuchi. Tsuneo Nakanishi (Japan); №145147; заявл. 30.04.80; опубл. 16.03.82.

214. А.с. 948562 СССР, МКИ, В23D25/06. Маятниковые летучие ножницы / Г.К. Григорьев и Э.Л. Шеяман (СССР). – №2419935/25-27; заявл. 10.11.76; опубл. 07.08.82, Бюл. №29.

215. А.с. 1006106 СССР, МКИ, В23D25/06, В26D1/36. Гидравлические маятниковые ножницы / Н.И. Крылов, В.А. Лукин, Г.М. Овсянников и М.М. Рудаков (СССР). – №3368875/25-27; заявл. 16.12.81; опубл. 23.03.83, Бюл. №11.

216. А.с. 1069962 СССР, МКИ, В23D25/06. Гидравлические маятниковые ножницы / Н.И. Крылов, В.А. Лукин, Г.М. Овсянников, В.В. Попов и М.М. Рудаков (СССР). – №3439911/25-27; заявл. 18.05.82; опубл. 30.01.84, Бюл. №4.

217. А.с. 1073014 СССР, МКИ, В23D25/06. Гидравлические маятниковые ножницы / Г.М. Овсянников, М.М. Рудаков, Н.И. Крылов, Б.В. Попов и С.Е. Архипов (СССР). – №3528514/25-27; заявл. 24.12.82; опубл. 15.02.84, Бюл. №6.

218. А.с. 1110563 СССР, МКИ, В23D25/06, В23D1/36. Гидравлические маятниковые ножницы / Г.К. Григорьев и Э.Л. Шеяман (СССР). – №3564554/25-27; заявл. 15.03.83; опубл. 30.08.84, Бюл. №32.

219. А.с. 820929 СССР, МКИ, В21D1/02. Способ производства заготовок / В.И. Клименко, А.М. Онищенко, В.Ф. Губайдулин и Г.М. Шульгин (СССР). – №2783996/20-02; заявл. 25.03.79; опубл. 15.04.81, Бюл. №14.

220. Поляков Б. Н. Новая технология модернизации заготовочных станов. Многоручьевая прокатка сортовых заготовок из непрерывнолитых слябов. / Б. Н. Поляков // Оборудование. Технический альманах. – 2006.-№4. – С.66-69

221. А.с. 419283 СССР, МКИ, В21d53/00, В21d1/00, В23d15/00. Способ изготовления профильных изделий / А.А. Нефедов, Б.В. Мерекин, Е.В. Галицкий, И.Б. Мерекина и Ю.С. Постольник (СССР). – №1795002/25-27; заявл. 29.05.72; опубл. 15.03.74, Бюл. №10.

222. А.с. 1057130 СССР, МКИ, В21D1/02. Способ производства сортовых заготовок / Е.Н. Изотов, В.П. Приходько, Ю.Е. Кулак, Н.Ф. Грицук и В.И. Вергелес (СССР). – №3490634/22-02; заявл. 17.09.82; опубл. 30.11.83, Бюл. №44.

223. Патент 2179485 Российская федерация, МПК, С2 В21В1/02. Способ продольного разделения слябов при прокатке / Ефименко С.П., Шахпазов Е.Х., Карелин Ф.Р., Чопоров В.Ф., Бахтинов Ю.Б. – заявл. 14.03.2000; опубл. 20.02.2002.

224. А.с. 699716 СССР, МКИ, В21В1/02. Способ прокатки заготовок / Ю.М. Чумаков, В.Ф. Габайдулин, Г.М. Шульгин, А.А. Толпа, Ю.П. Ляшенко (СССР). – №2575285/22-02; заявл. 03.02.78; опубл. 30.03.85. Бюл. №12.

225. А.с. 738696 СССР, МКИ, В21В1/02. Способ прокатки заготовок / Ю.М. Чумаков, Г.М. Шульгин, В.Ф. Габайдулин, С.П. Ефименко, С.Н. Игнатьев и др. (СССР). – №2428014/22-02; заявл. 22.12.76; опубл. 05.06.80. Бюл. №21.

226. А.с. 740311 СССР, МКИ, В21В1/02. Способ прокатки сортовых заготовок / Ю.М. Чумаков, В.Ф. Габайдулин, Г.М. Шульгин, В.И. Погоржельский, В.П. Морозов, П.А. Левичев и Ю.П. Ляшенко (СССР). – №2366170/22-02; заявл. 01.06.76; опубл. 15.06.80. Бюл. №22.

227. А.с. 778827 СССР, МКИ, В21В1/02. Способ прокатки заготовок / Ю.М. Чумаков, Г.М. Шульгин, В.Ф. Габайдулин, С.П. Ефихенко и В.П. Следнев (СССР). – №2494401/22-02; заявл. 28.06.77; опубл. 15.11.80. Бюл. №42.

228. А.с. 899169 СССР, МКИ, В21В1/02. Способ многоручьевой прокатки заготовок / Ю.П. Ляшенко, В.Ф. Габайдулин и Г.М. Шульгин (СССР). – №2896962/22-02; заявл. 19.03.80; опубл. 23.01.82. Бюл. №3.

229. Патент 2104104 Российская федерация, МПК, С1 В21В1/02. Способ прокатки разделения / Жучков С.М. (UA), Токмаков В.А. (UA), Дышлевич В.Ф. (BY), Асанов В.Н. (BY), Бондаренко А.Н. (BY), Сокиркин С.Н. (BY), Бобренок Г.Л. (BY) – №95105025/02; заявл. 07.03.1995; опубл. 10.02.1998.

230. Патент 2171724 Российская федерация, МПК, С2 В21В1/02. Способ производства заготовок / Липухин Ю.В., Данилов Л.И., Скорохватов Н.Б., Постоногов Ю.А. – №99121154/02; заявл. 05.10.1999; опубл. 10.08.2001.

231. Патент 2255819 Российская федерация, МПК, С2 В21В1/02. Система калибров валков прокатного стана / Бондаренко А.Н., Тищенко В.А., Жучков С.М., Курбатов Г.А и др. – №2003103194/02; заявл. 03.02.2003; опубл. 10.07.2005, Бюл. № 19.

232. А.с. 946698 СССР, МКИ, В21В1/04. Способ калибровки валков / Ю.М. Чуманов, В.И. Погоржельский, И.А. Острейко, Г.М. Шульгин и др. (СССР). – №2175861/22-02; заявл. 01.10.75; опубл. 30.07.82. Бюл. №28.

233. А.с. 1066679 СССР, МКИ, В21В1/00. Способ прокатки заготовок преимущественно на реверсивном стане / Ю.М. Чуманов, А.Н. Шичков, В.Ф. Габайдулин, Г.М. Шульгин и др. (СССР). – №3508334/22-02; заявл. 05.11.82; опубл. 15.01.84. Бюл. №2.

234. А.с. 1187895 СССР, МКИ, В21В1/04. Способ прокатки заготовок / Л.А. Барков, П.Н. Амосов, О.Е. Лысков, В.В. Пастухов и С.А. Мымрин (СССР). – №3736943/22-02; заявл. 05.05.84; опубл. 30.10.85. Бюл. №40.

235. Жучков С.М. Разработка технологии многоручьевого прокатки-разделения на стане 850 / С.М. Жучков, В.А. Маточкин // Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии: Сб. научн. тр. – Дніпропетровськ.: ІЧМ НАН України, 2008. – Вип. 17. – С. 172-179.

236. Патент 2171723 Российская федерация, МПК, С2 В21В1/02. Способ продольного разделения сляба / Липухин Ю.В., Данилов Л.И., Скорохватов Н.Б., Постоногов Ю.А., Морозов В.Н. – №99121153/02; заявл. 05.10.1999; опубл. 10.08.2001.

237. А.с. 1072930 СССР, МКИ, В21В1/08. Способ получения тавровых профилей / Л.А. Барков, В.В. Пастухов и В.Н. Выдрин (СССР). – №3516370/22-02; заявл. 24.11.82; опубл. 15.02.84. Бюл. №6.

238. Патент 2162381 Российская федерация, МПК, С1 В21В1/00. Способ холодной прокатки прутков / Трайно А.И., Мониц В.А., Ефименко С.П., Юсупов В.С. – №2000103642/02; заявл. 16.02.2000; опубл. 27.01.2001.

239. Патент 2176165 Российская федерация, МПК, С1 В21В1/00. Способ прокатки заготовок разделением / Бондаренко А.Н. (ВУ), Филиппов В.В. (ВУ), Гуляев М.П. (ВУ), Дьяченко Ю.В. (ВУ), Тищенко В.А. (ВУ) – №2000125597/02; заявл. 12.10.2000; опубл. 27.11.2001.

240. Патент 2245749 Российская федерация, МПК, С2 В21В1/02. Способ прокатки заготовок / Тищенко В.А., Стеблов А.Б., Жучов С.М., Бондаренко А.Н. и др. – №2003103195/02; заявл. 03.02.2003; опубл. 10.02.2005, Бюл. №4.

241. Патент 2254940 Российская федерация, МПК, С1 В21В1/02. Способ прокатки разделения / Солод В.С., Кукуй Д.П., Нефедьев С.П., Бенецкий А.Г., Нефедьев А.С. – №2003135470/02; заявл. 04.12.2003; опубл. 27.06.2005, Бюл. №18.

242. А.с. 749460 СССР, МКИ, В21В1/04. Способ прокатки заготовок / Ю.М. Чуманов, В.М. Клименко, Г.М. Шульгин, В.Ф. Габайдулин, В.П. Тимофеев и др. (СССР). – №2348863/02; заявл. 14.04.76; опубл. 23.07.80. Бюл. №27.

243. А.с. 1061860 СССР, МКИ, В21В1/02. Способ прокатки / В.Ф. Габайдулин, Г.М. Шульгин, С.Н. Игнатьев, Э.В. Овсий, В.В. Гурин и Д.П. Кукуй (СССР). – №3481969/22-02; заявл. 17.08.82; опубл. 23.12.83. Бюл. №47.

244. Оптимизация технологических режимов прокатки-разделения на стане 320/150 ОАО «Амурметалл» / Г. П. Перунов, С. А. Хохлов, В. К. Смирнов, В. А. Шилов, Ю. В. Инатович // Производство проката. – 2008. – №9. – с. 20-24

245. Пат. 0845307A1 European patent specification, В21В1/08, В21В31/26. Rolling mill slitting apparatus / Terence Mishael Princetown (US), Melicher Dudley (US); №97309677.9; заявл. 02.12.97; опубл. 03.06.98 Bulletin 1998/23.

246. Патент 2164177 Российская федерация, МПК, С2 В21В1/02. Способ прокатки и прокатный стан для его осуществления / Кузьменко А.Г., Лежнин Н.И. – №99103478/02; заявл. 16.02.1999; опубл. 20.03.2001.

247. Патент 2201816 Российская федерация, МПК, С1 В21В1/02. Способ продольного разделения проката / Фастыковский А.Р., Перетяцько В.Н. – №2001128267/02; заявл. 18.10.2001; опубл. 10.04.2003.

248. Патент 2379138 Российская федерация, МПК, С1 В21В1/02. Способ продольного разделения раската / Ефимов О.Ю., Фастыковский А.Р., Никиташев В.М. и др. – №2008122748/02; заявл. 04.06.2008; опубл. 20.01.2010, Бюл. №2.

249. А.с. 1703210 СССР, МКИ, В21В1/02. Кассета для продольного разделения горячего раската / Э.В. Сивак, Л.В. Кулаков, С.М. Жучков, В.Д. Нашиванько, А.П. Лохматов и др. (СССР). – №4783254/02; заявл. 22.11.89; опубл. 07.01.92. Бюл. №1.

250. Пат. 5626044 США, В21В1/12. Method on producing steel bars from billets / Manuel Lara-Castro (Mexico); №445431; заявл. 19.05.95; опубл. 06.05.97.

251. Неприводные делительные устройства в процессе прокатки-разделения / С. М. Жучков, Л. В. Кулаков, Э. В. Сивак и др. // Удосконалення процесів і обладнання обробки тиском в металургії і машинобудуванні : темат. зб. наук. пр. – Краматорськ – Слов'янськ, 2000. – С. 77-81.

252. Жучков С. М. Повышение эффективности производства и качества сортового проката и катанки за счет реализации новых технических решений / С. М. Жучков, В. А. Луценко // Наука та інновації. – 2007. – Т. 3. № 5. – С. 4-10.

253. Жучков С.М. Инновационные технологии сортопрокатного производства / С.М. Жучков, А.П. Лохматов // Наука та інновації. – 2008. – Т. 4. № 1. – С. 49-60.

254. Совершенствование технологических схем процесса прокатки-разделения с использованием неприводных деформационно-делительных устройств / С. М. Жучков, А. А. Горбанев, Б. Н. Колосов // Наука та інновації. – 2009. – Т. 5. № 5. – С. 47-56.

255. Patil R. N. Slit Rolling Technology, To Increase Production of Rolling Round Steel Bars / R. N. Patil, Achintya Mittal // National Conference on Recent Advances in Manufacturing Technology and Management (RAMTM 2010), 19th -20th February, 2010, Jadavpur University, Kolkata. – 2010. – P. 189-194

256. А.с. 1458034 СССР, МКИ, В21В1/02. Устройство для продольного разделения проката / Е.В. Руднев, Г.Е. Трусов, В.И. Юрков и И.И. Милованов (СССР). – №4187457/23-02; заявл. 28.01.87; опубл. 15.02.89. Бюл. №6.

257. Пат. 20130047811A1 США, В26D1/12. Multi-slit powered slitting machine / T. Michael Shore (US), Kenneth Plante (US), Richard Kowal (US); №445431; заявл.23.08.11; опубл. 28.02.13.

258. К вопросу определения усилий резания металла в горячем состоянии/ В. И. Одинокоев, О. С. Лехов, Т. Г. Химич, А. В. Песков // Изв. вузов. Черная металлургия. – 1981. – №8. – С. 142-145.

259. Котельников В. П. Резание заготовок на ножницах с параллельными ножами / В. П. Котельников // Изв. вузов. Черная металлургия. – 1981. – №8. – С. 150-152.

260. Бер В.И. Скорость и величина деформации при резке толстолистовых материалов / В. И. Бер, Д. И. Суяров // Изв. вузов. Черная металлургия. – 1982. – №6. – С. 51-55.

261. Теоретическое исследование процесса резания непрерывнолитых слэбов / О. С. Лехов, В. И. Одинокоев, Т. Г. Химич, А. В. Песков // Изв. вузов. Черная металлургия. – 1985. – №2. – С. 128-131.

262. Диамантопуло К. К. О резке полосы параллельными ножами / К. К. Диамантопуло, И. В. Левандовская, А. И. Сердюк // Удосконалення процесів і обладнання обробки тиском в металургії і машинобудуванні : темат. зб. наук. пр. – Краматорськ, 2000. – С. 129-131.

263. Химич Т. Г. Автоматизированный расчет кинематических и динамических параметров ножниц 1250 тс / Т. Г. Химич, О. С. Техов, А. Г. Жигалин // Изв. вузов. Черная металлургия. – 1980. – №4. – С. 144-147.

264. Ручко В.Н. Получение аналитических зависимостей для определения углов поворота эксцентрикового вала механизма резания на ножницах с параллельными ножами / В. Н. Ручко // Удосконалення процесів і обладнання обробки тиском в металургії і машинобудуванні : темат. зб. наук. пр. – Краматорськ, 2006. – С. 197-201.

265. Васильев К. И. Резка листовыми ножницами: компьютерное моделирование и экспериментальное исследование изменения зазора между ножами / К. И. Васильев, Н. А. Садеков // Вестник МГТУ «Станкин». Научный рецензируемый журнал. – М. : МГТУ «Станкин», 2011. – №2(14). – С. 34-37.

266. Жуков И. Б. Исследование и оптимизация электромеханических систем управления комплексом резки листового проката : дис. на соискание учен. степени канд. техн. наук: 05.09.03 / Жуков Илья Борисович. – Санкт-Петербург, 2005. – 276 с.

267. Потапенков А. П. Исследование усилий резания наклонными ножами / А. П. Потапенков // Изв. вузов. Черная металлургия. – 1998. – №8. – С. 65-69.

268. Исследование усилий резания металлических листов / А. П. Потапенков, Ю. Г. Серебренников, С. С. Пилипенко, С. М. Степанов // Изв. вузов. Черная металлургия. – 2009. – №11. – С. 56-59.

269. Методика расчета силы резания дугообразным ножом / В. Д. Нотченко, Е. А. Емченко, А. Н. Бойденко, В. П. Капота // Удосконалення процесів і

обладнання обробки тиском в металургії і машинобудуванні : темат. зб. наук. пр. – Краматорськ – Слов'янськ, 2000. – С. 66-69.

270. Савицкий В. В. Исследование энергосиловых параметров сдвоенных кромкообрезных ножниц в среде COSMOSWorks / В. В. Савицкий, А. Е. Вольвач // Научный Вестник ДГМА. – Краматорск, 2009. – №1 (4Е). – С. 150-155.

271. Численное математическое моделирование процесса резания листового металлопроката на ножницах с дугообразным ножом / В. Д. Нотченко, А. Н. Бойденко, Е. А. Емченко и др. // Удосконалення процесів і обладнання обробки тиском в металургії і машинобудуванні : темат. зб. наук. пр. – Краматорськ, 2001. – С. 454-457.

272. Дунаевский В. И. К расчету энергосиловых параметров процесса резания дисковыми ножами / В. И. Дунаевский, А. В. Сатонин, А. С. Ткаченко // Изв. вузов. Черная металлургия. – 1993. – №9/10. – С. 73-75.

273. Развитие методов расчета, совершенствования технологий и оборудования агрегатов продольной резки холоднокатаных лент, листов и полос / В.Ф. Потапкин, Ю. К. Доброносков, В. Д. Нотченко, А. Н. Бойденко // Удосконалення процесів і обладнання обробки тиском в металургії і машинобудуванні : темат. зб. наук. пр. – Краматорськ, 2003. – С. 33-37.

274. Численное математическое моделирование процесса резания дисковыми ножами / В. И. Дунаевский, Е. А. Емченко, В. В. Нотченко // Совершенствование процессов и оборудования обработки давлением в металлургии и машиностроении : Сб. науч. тр. – Краматорск, 1998. – С. 26-30.

275. Численное математическое моделирование напряженно-деформированного состояния при продольной резке двухслойных биметаллических лент и полос / В.И. Дунаевский, А. Н. Бойденко, А. А. Сатонин, А. В. Муравьев // Удосконалення процесів і обладнання обробки тиском в металургії і машинобудуванні : темат. зб. наук. пр. – Краматорськ, 2002. – С. 302-306.

276. Боровик П. В. Совершенствование технологии и оборудования процесса продольной резки толстых горячекатаных листов на дисковых ножницах

: дис. на соискание учен. степени канд. техн. наук, спец. 05.03.05 / Боровик Павел Владимирович. – Краматорск, 2008. – 225 с.

277. Разработка статистической модели разрезки рулонной стали на агрегате продольной резки / В. В. Шестаков, А. В. Колобов, М. С. Селезнев, Е. С. Федотов, Н.Л. Лисунец, А. Г. Радюк // Изв. вузов. Черная металлургия. – 2011. – №9. – С. 39-41.

278. Разработка математической модели процесса разрезки рулонной полосы на многодисковых ножницах агрегата продольной резки / Колобов А.В., Федотов Е.С., Лисунец Н.Л., Радюк А.Г., Виноградов А.И. // Черные металлы. – 2013. – № 2. – С. 9-13.

279. Влияние силы прижатия режущих кромок ножей дисковых ножниц на величину их износа / В.И. Дунаевский, А. Н. Бойденко, Е. А. Емченко, В. А. Шапиро // Удосконалення процесів і обладнання обробки тиском в металургії і машинобудуванні : темат. зб. наук. пр. – Краматорськ, 2000. – С. 338-341.

280. Королев А. А. Методика расчета параметров качественного резания проката на летучих ножницах / А. А. Королев // Изв. вузов. Черная металлургия. – 1981. – №9. – С. 155-160.

281. Точность мерного реза на летучих ножницах с электрическим выравниванием скоростей / Е. Ф. Анисимов, В. В. Королев, Е. Б. Иванов // Металлург. – 2011. – №10. – С. 87-88.

282. О резке проката в штампе при сложном движении ножа / К. К. Диамантопуло, А. И. Сердюк, И. В. Левандовская // Удосконалення процесів і обладнання обробки тиском в металургії і машинобудуванні : темат. зб. наук. пр. – Краматорськ – Слов'янськ, 2000. – С. 279-282.

283. Численная методика расчета энергосиловых параметров процесса горячей поперечной резки непрерывнолитых сортовых заготовок / А. В. Сатонин, С. М. Стриченко, А. В. Завгородний, А. А. Житлова // Обработка материалов давлением : сб. науч. тр. – Краматорск ДГМА, 2011. – № 2 (27). – С. 43–47.

284. Математическое моделирование энергосиловых параметров процесса поперечной резки круглых сортовых профилей / П. А. Петров, С. М. Стриченко,

И. И. Бойко, А. А. Сытник // *Обработка материалов давлением* : сб. науч. тр. – Краматорск ДГМА, 2012. – № 1 (30). – С. 227–232.

285. Боровик П. В. Особенности процесса холодной резки квадратной заготовки на сортовых ножницах / П. В. Боровик, П. А. Петров // *Сборник научных трудов / ДонГТУ*. – Алчевск, 2012. – Вып. 38. – С. 190-196.

286. Фастыковский А. Р. Продольное разделение полосы неприводными дисковыми ножами в потоке непрерывного прокатного стана / А. Р. Фастыковский, В. Н. Перетяцько // *Изв. вузов. Черная металлургия*. – 2002. – №12. – С. 25-28.

287. Фастыковский А. Р. Особенности продольного разделения сдвоенных несимметричных профилей в потоке прокатного стана / А. Р. Фастыковский, В. Н. Перетяцько // *Изв. вузов. Черная металлургия*. – 2003. – №8. – С. 23-24.

288. Потапкин В. Ф. Метод полей линий скольжения в теории процессов обработки металлов давлением / В. Ф. Потапкин. – Краматорск: ДГМА, 2005. – 160 с.

289. Колмогоров, Г.Л. Вариационные методы в теории пластин и оболочек : учеб. пособие / Г.Л. Колмогоров, Т.Е. Мельникова. – Пермь :Изд-во Перм. нац. исслед. политехн. ун-та, 2012. – 41 с.

290. Колмогоров В. Л. Механика обработки металлов давлением / В. Л. Колмогоров. – М. : Металлургия, 1986. – 688 с.

291. Васидзу К. Вариационные методы в теории упругости и пластичности : пер. с англ. / К. Васидзу. – М. : Мир, 1987. – 542 с.

292. Победря Б.Е. Численные методы в теории упругости и пластичности : учеб. Пособие / Б. Е. Победря. – 2-е изд. – М. : Изд-во МГУ, 1995. – 366 с.

293. Яковченко А. В. Аналитические методы моделирования нестационарных процессов обработки металлов давлением / А. В. Яковченко. – Донецк : ДонНИИчермет, 1997. – 177 с.

294. Liu G. R. *The Finite Element Method: A Practical Course* / G. R. Liu, S. S. Quek. – 2003. – 348 p.

295. Кузьменко В. И. Решение на ЭВМ задач пластического деформирования / В. И. Кузьменко, В. Ф. Балакин. – Киев : Техніка, 1990. – 136 с.
296. Боровік П.В. Теоретичні дослідження процесів обробки металів тиском на основі методу скінчених елементів: навч. посіб. / П.В. Боровік. – Алчевськ: ДонДТУ, 2012. – 170 с.
297. Еременко С. Ю. Методы конечных элементов в механике деформируемых тел / С. Ю. Еременко. – Х. : Основа, 1991. – 272 с.
298. Gockenbach M. S. Understanding And Implementing the Finite Element Method / M. S. Gockenbach. – 2006. – 363 p.
299. Теллес Д. К. Ф. Применение методов граничных элементов для решения неупругих задач / Д. К. Ф. Теллес. – М. : Стройиздат, 1987. – 160 с.
300. Крауч С. Методы граничных элементов в механике твердого тела: пер. с англ. / С. Крауч, А. Старфилд. – М. : Мир, 1987. – 328 с.
301. Бенерджи П. Методы граничных элементов в прикладных науках / П. Бенерджи, Р. Баттерфилд. – М. : Мир, 1984. – 496 с.
302. Beer G. The Boundary Element Method with Programming: For Engineers and Scientists / G. Beer, I. Smith, Duenser C. Springer. – 2008. – 494 p.
303. Hartmann F. Introduction to Boundary Elements: Theory and Applications / F. Hartmann. – Springer-Verlag Berlin, 1989. – 416 p.
304. Finite volume computational methods for polymer processing / R.I. Tanner, X. Huang, S.-C. Xue, N. Phan-Thien // Proc. of the 7 Int. Conf. on numerical methods in industrial forming processes. – Enschede (Netherlands), 1998. – P. 3-9.
305. Li R. Generalized Difference Methods for Differential Equations: Numerical Analysis of Finite Volume Methods / R. Li, Z. Chen, W. Wu. – CRC, 2000. – 472 p.
306. LeVeque R. Finite volume methods for hyperbolic problems / R. LeVeque. – Cambridge, 2004. – 558 p.
307. Causon D. M. Introductory Finite Volume Methods for PDEs / D. M. Causon, C. G. Mingham, L. Qian. – Ventus Publishing ApS, 2011. – 82 p.

308. Процессы деформации металла на основе многовалковых калибров: монография / И. К. Огинский, В. Н. Данченко, А. А. Самсоненко, В. В. Бояркин. – Днепропетровск: Пороги, 2011. – 355 с.

309. Analysis of Metal forming process based on meshless method / J.-S. Clıcil, C. Roque, C. Pan, S.T. Button // Journal of Materials Processing Technology. – 1998. – №80-81. – P. 642-646.

310. Progress on meshless methods / A. J. M. Ferreira, E. J. Kansa, G. E. Fasshauer, V. M. A. Leitão. – Springer, 2009. – 305 p.

311. Griebel M. Meshfree Methods for Partial Differential Equations V / M. Griebel, M. A. Schweitzer. – Springer, 2010. – 250 p.

312. Лукьянов А. А. Моделирование деформирования твердого тела с использованием бессеточных методов / А. А. Лукьянов, В. Б. Пеньков // Вестник СамГУ : Естественнонаучная серия, 2007. – №6(56). – С. 62-70.

313. Анил К. Дж. Введение в искусственные нейронные сети / К. Дж. Анил, М. Жиангчанг, К. М. Моиуддин // Открытые системы. – 1997. – №4. – С. 16-24.

314. Светличный Д. С. Применение искусственных нейронных сетей в обработке металла давлением / Д. С. Светличный // Metallurgical and Mining Industry. – 2002. – №8/9. – С. 127-131.

315. Пантюхин О.В. Управление качеством изделий массового производства с применением теории нейронных сетей / О. В. Пантюхин, В. М. Лялин, Н. А. Тарасова // Известия ТулГУ. Технические науки. Проблемы специального машиностроения. – Тула, 2011. – С. 342-347.

316. Harris V. Fatigue in composites: Science and technology of the fatigue response of fibre-reinforced plastics / V. Harris. – CRC Press, Woodhead Publishing Ltd., 2003. – 742 p.

317. Миленин А. А. Современные методы компьютерного моделирования процессов обработки металлов давлением / А. А. Миленин // Metallurgical and Mining Industry. – 2000. – №8/9. – С. 22-26.

318. Гринкевич В. А. Краткий обзор современных методов решения краевых задач обработки металлов давлением и основные тенденции их развития / В. А.

Гринкевич, В. Н. Данченко // Сучасні проблеми металургії. Наукові вісті. Том 5 : Пластична деформація металів. - Дніпропетровськ: Системні технології, 2002. – С. 113–119.

319. Компьютерное моделирование процессов обработки металлов давлением / В. Н. Данченко, А. А. Миленин, В. И. Кузьменко, В. А. Гриневич. – Днепропетровск: Системные технологии, 2005. – 448 с.

320. A numerical simulations of steady state metal cutting / P. Joyot, R. Rakotomalala, O. Pantale и др. // Journal of Mechanical Engineering Science. – 1998. – Vol. 212. – P. 331-341.

321. Pantale O. An ALE three-dimensional model of orthogonal and oblique metal cutting processes / O. Pantale, R. Rakotomalala, M. Touratier // International Journal of Forming Processes. – 1998. – Vol. 1, N° 3. – P. 371-389.

322. Wisselink, H.H. Simulation of stationary sheet metal cutting processes / H. H. Wisselink, J. Huetink // In: International Conference on Numerical Methods in Industrial Forming Processes, NUMIFORM, 22-25 June 1998, Enschede.

323. Bolt P. Prediction of shape aberrations due to punching, shearing and slitting/ P. Bolt, W. Sillekens // Sheet Metal 98: Proc. of the 6th Int. Conf. – 1998.

324. Wisselink H. Simulation of the slitting process with the finite element method / H. Wisselink, J. Huetink // Sheet Metal 99: Proc. of the 7th Int. Conf. – 1999. – P. 143-152.

325. Wisselink H. H. Title: Analysis of Guillotining and Slitting, Finite Element Simulations. Ph.D-Thesis / H. H. Wisselink. –Twente, The Netherlands, 2000.

326. Stoker H. C. Title: Developments of the Arbitrary Lagrangian-Eulerian Method in non-linear Solid Mechanics. Ph.D-Thesis / H. C. Stoker. – Twente, The Netherlands, 1999.

327. Abaqus documentation (mit.edu). Режим доступа: <https://abaqus-docs.mit.edu/2017/English/SIMACAEEXCRefMap/simaexc-c-docproc.htm>

328. Rachik M. Some phenomenological and computational aspects of sheet metal blanking simulation / M. Rachik, J. M. Roelandt, A. Maillard // Journal of Materials Processing Technology, 2002. – №128. – P. 256–265.

329. Wisselink H. H. 3D FEM simulation of stationary metal forming process with application to slitting and rolling / H. H. Wisselink, J. Huetink // *Journal of Materials Processing Technology*, 2004. – №148. – P. 328–341.

330. 3D modeling of shear-slitting process for aluminum alloys / Somnath Ghosh, Ming Li, Aniruddha Khadke // *Journal of Materials Processing Technology*, 2005. – №167. – P. 91–102.

331. F.E. elastoplastic damage model with 2D adaptive remeshing procedure for fracture prediction in metal forming simulation / H. Badreddine, C. Labergère, K. Saanouni, W. Rajhi, A. Rassinieux, D. Kircher // *International Journal of Material Forming*, April 2008. – Volume 1, Issue 1 Supplement. – P. 109-112.

332. 3D numerical simulation of anisotropic thin sheet metal slitting process using fully coupled constitutive equations including ductile damage / K. Saanouni, N. Belamri, P. Autesserre // *International Journal of Material Forming*, August 2009. – Volume 2, Issue 1 Supplement. – P. 535-538.

333. Numerical simulation of the fine blanking process of sheet titanium / J. Adamus, P. Lacki, W. Wieckowsky // *Archives of Metallurgy and Materials*, 2011. – Volume 56, Issue 2. – P. 431-437.

334. Investigation of metal flow direction during double – core rod rolling in slitting oval pass / A. Stefanik, S. Mróz, H. Dyja // *Proceedings of the 12th International Scientific Conference “Achievements in Mechanical and Materials Engineering” AMME’2003, Gliwice- Zakopane, 2003.* – P. 839-842.

335. Stefanik A. Slitting criterion for various rolling speeds in MSR rolling process / A. Stefanik // *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*, March 2008. – Volume 27, Issue 1. – P. 91-94.

336. Mróz S. Examination of the effect of slitting roller shape on band slitting during the multi slit rolling process / S. Mróz // *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*, February 2008. – Volume 26, Issue 2. – P. 167-170.

337. Determination of the critical value of normalized Cocroft–Latham criterion during multi slight rolling based on tensile test/ A. Stefanik, H. Dyja, S. Mróz // *Archives of Metallurgy and Materials*, 2011. – Volume 56, Issue 2. – P. 543-549.

338. Experimental and numerical studies for the forming groove and separating groove design in slit rolling process / D. H. Na, S. H. Cho, Y. Lee // *Journal of Mechanical Science and Technology*, 2011/ – №25 (9). – P. 2439-2446.

339. Влияние формы многоручного калибра на размерную точность арматурных профилей / П.Л. Шота, С.А. Мроз, Х.С. Дья, А.А. Кавалек // *Ползуновский вестник*, 2012. – № 1/1. – С. 365-369.

340. Боровик П. В. Развитие методов численного моделирования процессов резки металла на дисковых ножницах / П. В. Боровик // *Сборник научных трудов ДГМА. – Алчевск, 2006. – Вып. 22. – С. 166–172.*

341. Механические свойства сталей и сплавов при нестационарном нагружении. Справочник / Д. А. Гохфельд, Л. Б. Гецов, К. М. Кононов и др. – Екатеринбург : УрО РАН, 1996. – 408 с.

342. Полухин П. И. Сопротивление пластической деформации металлов и сплавов / П. И. Полухин, Г. Я. Гун, А. М. Галкин. – М. : *Металлургия*, 1983. – 352 с.

343. Коновалов Ю.В. Расчет параметров листовой прокатки: Справочник / Ю. В. Коновалов, А. Л. Остапенко, В. И. Пономарев. – М. : *Металлургия*, 1986. – 430 с.

344. Боровик П. В. Решение проблемы учета механических свойств материала при моделировании процесса горячей резки на ножницах / П. В. Боровик, В. А. Луценко. / *Сборник научных трудов / ДонГТУ. – Алчевск, 2010. – Вып. 32. – С. 175-181.*

345. Боровик П. В. Аппроксимация механических свойств при математическом моделировании процесса горячей резки на ножницах / П. В. Боровик, В. А. Луценко // *Металлургические процессы и оборудование – Донецк, – 2011, – 2(24) – С. 5-9. – ISSN 1816-1200.*

346. Боровик П. В. Математическое моделирование процесса резки на ножницах с учетом упругой деформации станины / П. В. Боровик. / *Сборник научных трудов / Вестник национального технического университета ХПИ. – Харьков, 2011. – Вып. 47. – С. 76-80.*

347. Боровик П. В. Теоретический анализ процесса разделения при горячей резке на ножницах / П. В. Боровик // Вісник НТУ України “КПІ”. Серія: Машинобудування. – К., – 2012, – №64. – С. 190-195.

348. Богатов А. А. Механические свойства и модели разрушения металлов: учеб. пособ. для вузов / А. А. Богатов. – Екатеринбург : ГОУ ВПО УГТУ-УПИ, 2002. – 329 с.

349. Львовский Е. Н. Статистические методы построения эмпирических формул : учеб. пособие для вузов / Е. Н. Львовский. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Высш. шк., 1988. – 239 с.

350. Боровиков В. П. STATISTICA® – Статистический анализ и обработка данных в среде Windows® / В. П. Боровиков, И. П. Боровиков. – М. : Информационно-издательский дом «Филинь», 1997. – 608 с.

351. The Finite Element Modulation of Thermostressed State of Coating Formation at Electric Contact Surfacing of “Shaft” Type Parts / OV Berezshnaya, EP Gribkov, PV Borovik, VD Kassov // Advances in Materials Science and Engineering, vol. 2019, Article ID 7601792, 18 pages, 2019.

352. Боровик П. В. Особенности двухмерного моделирования методом конечных элементов процесса резки параллельными ножами / П. В. Боровик, Т. И. Греновецкая // Збірник наукових праць Донбаського державного технічного університету. – 2017. – Вип. 1(46). – С. 72-77. – ISSN 2077-1738.

353. Боровик П. В. Теоретический анализ процесса горячей резки на ножницах / П. В. Боровик // Обработка материалов давлением : сб. науч. тр. – Краматорск ДГМА, 2012. – № 1 (30). – С. 218–222. – ISSN 2076-2151.

354. Боровик П. В. Оценка влияния жесткости станины на параметры процесса резки на ножницах / П. В. Боровик // Сборник научных трудов ДонГТУ. – Алчевск, 2012. – Вып. 36. – С. 269-275. – ISSN 2077-1738.

355. Боровик П. В. Теоретический анализ бокового усилия при горячей резке параллельными ножами / П. В. Боровик // Обработка материалов давлением : сб. науч. тр. – Краматорск ДГМА, 2012. – № 4 (33). – С. 132-135.

356. Боровик П. В. Влияние деформационного нагрева на результаты математического моделирования процесса резки на ножницах / П. В. Боровик // Сборник научных трудов ДонГТУ. – Алчевск, 2012. – Вып. 37. – С. 135-140. – ISSN 2077-1738.

357. Боровик П. В. Теоретический анализ взаимосвязи кривой текучести материала и кривых сопротивления срезу процесса резки на ножницах / П. В. Боровик // Обработка материалов давлением : сб. науч. тр. – Краматорск ДГМА, 2012. – № 2 (31). – С. 69–73. – ISSN 2076-2151.

358. Залога В. А. О выборе уравнения состояния обрабатываемого материала для моделирования процесса резки методом конечных элементов / В. А. Залога, Д. В. Криворучко, С. Н. Хвостик // «Вісник Сумського державного університету. Серія Технічні науки» – Сумы, – 2006, –№ 12(96) – С. 101-115.

359. Паршин В. А. Деформируемость и качество / В. А. Паршин, Е. Г.Зудов, В. Л. Колмогоров. – М. : Металлургия, 1979. – 192 с.

360. Остапенко Л. А. Сопротивление деформации сталей при прокатке и методики его расчета / Л. А. Остапенко, Л. А. Забира. – Черная металлургия: Бюл. ин-та «Черметинформация» –М., – 2009, – Вып. 3(1311) – С. 54-79

361. Johnson G.R., Cook W.H. A Constitutive Model and Data for Metals Subjected to Large Strains, High Strain Rates and High Temperatures//Proceedings of the 7th int. Symp. on Ballistics. – 1983. – С. 541-547.

362. Боровик П. В. Метод построения кривых текучести и пластичности при трехмерном моделировании процессов холодной резки на ножницах / П. В. Боровик // Вісник Національного технічного університету "ХПІ". Сер. : Інноваційні технології та обладнання обробки матеріалів у машинобудуванні та металургії: зб. наук. пр. – Харків : НТУ "ХПІ", 2018. – № 31 (1307). – С. 8-13.

363. Боровик П. В. Анализ процесса разделения металла в холодном состоянии на ножницах с параллельными ножами / П. В. Боровик // Сборник научных трудов ДонГТУ. – Алчевск, 2014. – Вып. 2(43). – С. 36-42. – ISSN 2077-1738.

364. Боровик П. В. Метод построения кривых текучести материала при моделировании процесса холодного разделения на ножницах / П. В. Боровик // Ресурсозберігаючі технології виробництва та обробки тиском матеріалів у машинобудуванні. – 2014. – № 1. – С. 54-60. – ISSN 2218-1806.

365. Марочник сталей и сплавов / А. С. Зубченко, М. М. Колосков, Ю. В. Каширский и др. Под общей ред. А. С. Зубченко – М. : Машиностроение, 2003. – 784 с.

366. Ушаков М.В. Учет влияния скорости деформации и температуры на процессы, происходящие в зоне первичной деформации при резании металлов / М.В. Ушаков, С.Ю. Ильюхин, И.А. Воробев // Известия ТулГУ. Технические науки. Вып. 4. Ч. 2. – Тула : ТулГУ, 2010 – С. 89–93.

367. Губкин С. И. Пластическая деформация металлов / С. И. Губкин. – М. : Металлуриздат, 1961 – . – Т. 2. Физико-химическая теория пластичности. – 1961. – 384 с.

368. Огородников В. А. Оценка деформируемости металлов при обработке давлением. / В. А. Огородников. – Киев: Вища школа, 1983. – 175 с.

369. Методы оценки трещиностойкости конструкционных материалов / В.В. Панасюк, А.Е. Андрейкив, С.Е. Ковчик // Киев: Наукова думка, 1977. – 279 с.

370. Боровик П. В. Анализ влияния химсостава стали на удельное сопротивление резке в процессе горячего разделения на ножницах / П. В. Боровик // Сборник научных трудов ДонГТУ. – Алчевск, 2012. – Вып. 38. – С. 156-162. – ISSN 2077-1738.

371. Боровик П. В. 3D модель процесса поперечного разделения на ножницах непрерывнолитых сортовых заготовок / П. В. Боровик, П. А. Петров // Сборник научных трудов ДонГТУ. – Алчевск, 2013. – Вып. 41. – С. 151-155. – ISSN 2077-1738.

372. Боровик П. В. Анализ напряженно-деформированного состояния металла при разделении квадратного профиля на ножницах / П. В. Боровик // Обработка материалов давлением : сб. науч. тр. – Краматорск ДГМА, 2014. – № 2 (39). – С. 17-23. – ISSN 2076-2151.

373. Боровик П. В. К вопросу качества резки шевронными ножами / П. В. Боровик // Обработка материалов давлением : сб. науч. тр. – Краматорск ДГМА, 2013. – № 1 (34). – С. 245-250. – ISSN 2076-2151.

374. Селезнёв М. Е. Сравнительный теоретический анализ эффективности применения шевронных ножей со сложной формой режущей кромки / М. Е. Селезнёв, П. В. Боровик // Научный вестник Донбасской государственной машиностроительной академии. – 2015. – № 2. – С. 148-153. – ISSN 2219-7869.

375. Пат. 90094 Україна, МПК В23D35/00. Комплект ножів для поперечного різання листового матеріалу / Боровік П. В., Селезньов М.Є.; заявники і патентовласники Боровік П. В., Селезньов М.Є. – №201314896; заявл. 19.12.2013, опубл. 12.05.2014, Бюл №9.

376. Borovik P.V. 3D model of cutting using the rolling cut type shears / P. V. Borovik // Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University. – Magnitogorsk, 2013. – № 5. – P. 40-42. – ISSN 1995-2732.

377. Боровик П. В. Трёхмерное моделирование процесса разделения круглого профиля на ножницах / П. В. Боровик // Сборник научных трудов ДонГТУ. – Алчевск, 2014. – Вып. 1(42). – С. 102-106. – ISSN 2077-1738.

378. Боровик П. В. 3D моделирование процессов поперечного разделения сортовых профилей на ножницах / П. В. Боровик // Збірник наукових праць Дніпровського державного технічного університету. Технічні науки. – 2018. – Вип. Тем. вип. – С. 11-16.

379. Сатонин А. В. Имитационное моделирование спектра рабочей нагрузки процесса поперечной резки сортовых профилей на ножницах / В. А. Сатонин, П. В. Боровик, П. А. Петров // Обработка материалов давлением : сб. науч. тр. – Краматорск ДГМА, 2014. – № 2 (39). – С. 53-59. – ISSN 2076-2151.

380. Боровик П. В. Математическое моделирование процесса резки толстолистовых раскатов в горячем состоянии на дисковых ножницах / П. В. Боровик // Ресурсозберігаючі технології виробництва та обробки тиском матеріалів у машинобудуванні: Зб. наук. пр. – Луганськ: Вид-во СХУ ім. В. Даля., 2013. – №1(14). – С. 69-76. – ISSN 2218-1806.

381. Боровик П. В. Трехмерная модель процесса продольной резки на сдвоенных кромкообрезных ножницах с катящимся резом / П. В. Боровик, М. Е. Селезнев // Вестник Нац. техн. ун-та "ХПИ" : сб. науч. тр. Темат. вып. : Инновационные технологии и оборудование обработки материалов в машиностроении и металлургии – Харьков : НТУ "ХПИ". – 2015. – № 47 (1166). – С. 15-20.

382. Borovik P. V. Influence of a chevron type knife design on the quality of sheet material shearing / P. V. Borovik, M. E. Seleznyov // Metallurgical and Mining Industry. – 2015. – No. 5. – P. 218-223. – ISSN 2076-0507.

383. Исследование энергосиловых параметров процесса поперечного разделения на ножницах непрерывнолитых сортовых заготовок / А. В. Сатонин, П. В. Боровик, П. А. Петров, С. М. Стриченко // Сборник научных трудов ДонГТУ. – Алчевск, 2011. – Вып. 35. – С. 131-137. – ISSN 2077-1738.

384. Анализ энергосиловых параметров процесса разделения на ножницах сортовых профилей в горячем состоянии / П. Н. Денищенко, П. В. Боровик, П. А. Петров, С. М. Стриченко // Обработка материалов давлением : сб. науч. тр. – Краматорск ДГМА, 2011. – № 4 (29). – С. 172–176. – ISSN 2076-2151.

385. Боровик П. В. Экспериментальная оценка влияния сил внешнего сопротивления на скорость резки толстых листов дисковыми ножами / П. В. Боровик, М. Е. Селезнев // Обработка материалов давлением : сб. науч. тр. – Краматорск ДГМА, 2012. – № 3 (32). – С. 181-184. – ISSN 2076-2151.

386. Ульяницкий В. Н. Экспериментальная оценка стойкости инструмента при резке высокопрочных сталей / В. Н. Ульяницкий, П. В. Боровик, М. Е. Селезнев // Обработка материалов давлением. – 2015. – № 1(40). – С. 227-230. – ISSN 2076-2151.

387. Боровик П. В. Выбор метода расчета механических свойств при моделировании процесса горячей резки на ножницах / П. В. Боровик // Актуальные вопросы современной техники и технологии [Текст]: Сборник докладов IX-й Международной научной конференции (г. Липецк, 27 октября 2012

г.). / Отв. ред. А.В. Горбенко. – Липецк: Издательский центр «Гравис», 2012. – С. 45-52.

388. Боровик П. В. Метод построения кривых сопротивления резке в процессе горячего разделения металла на ножницах / П. В. Боровик // *Металлургическая и горнорудная промышленность*. – 2014. – № 2 (287). – С.25-29. – ISSN 0543-5749.

389. Грудев А. П. Теория прокатки: учебник для вузов / А. П. Грудев. – М. : *Металлургия*, 1988. – 240 с.

390. Боровик П. В. Относительное внедрение до скола при резке металла на ножницах в холодном состоянии / П. В. Боровик // *Обработка материалов давлением*. – 2018. – № 1. – С. 59-65. – ISSN 2076-2151.

391. Адлер Ю. П. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий / Ю. П. Адлер, Е. В. Маркова, Ю. В. Грановский. – М. : *Наука*, 1976. – 279 с.

392. Боровик П. В. Возможности повышения качества резки шевронным ножом / П. В. Боровик // *Производство проката*. – 2014. – №3. – С.36-39. – ISSN 1684-257X.

393. Прокат сортовой і фасонний із сталі вуглецевої звичайної якості. Загальні технічні умови : ДСТУ 4484:2005 / ГОСТ 535-2005. – Чинний від 2005-11-25. – К. : *Держспоживстандарт України*, 2005. – 14 с. – (Держспоживстандарт України).

394. Прокат сортовой сталевий гарячекатаний квадратний. Сортамент : ДСТУ 4746:2007 / ГОСТ 2591-2006. – Чинний від 2007-02-26. – К. : *Держспоживстандарт України*, 2007. – 6 с. – (Держспоживстандарт України).

395. ГОСТ 8559-75 Сталь калиброванная квадратная. Сортамент. – Введ. 1976-01-01. – М. : *Госстандарт СССР*, 1975. – 5 с. – (Государственный комитет СССР по управлению качеством продукции и стандартам).

396. Металопродукція. Методи вимірювання відхилів форми : ДСТУ 6026:2008 / ГОСТ 26677-2008. – Чинний від 2013-01-01. – К. : *Держспоживстандарт України*, 2008. – 23 с. – (Держспоживстандарт України).

397. ГОСТ 21014-88. Прокат черных металлов. Термины и определения дефектов поверхности. – Введ. 1990-01-01. – М. : Госстандарт СССР, 1989. – 60 с. – (Государственный комитет СССР по управлению качеством продукции и стандартам).

398. Боровик П. В. Обоснование профилировки фасонного ножа для разделения квадратной заготовки в горячем состоянии / П. В. Боровик // Обработка материалов давлением. – 2019. – № 1. – С. 179-185.

399. Боровік П. В. Задача оптимізації профілювання фасонного ножа / П. В. Боровік // Вісник Національного технічного університету "ХПІ". Сер. : Інноваційні технології та обладнання обробки матеріалів у машинобудуванні та металургії: зб. наук. пр. – Харків : НТУ "ХПІ", 2019. – № 12 (1337). – С. 15-19.

400. Кузьмичов А. І. Оптимізаційні методи і моделі: практикум в Excel: Навч. посіб. / А. І. Кузьмичов – К.: ВПЦ АМУ, 2013. – 438 с.

401. Боровик П. В. Развитие технологии обрезки боковых кромок листового проката дисковыми ножами / П. В. Боровик, М. Е. Селезнев // Сборник научных трудов ДонГТУ. – Алчевск, 2012. – Вып. 37. – С. 156-163. – ISSN 2077-1738.

402. Боровик П. В. Анализ условий захвата толстолистого проката в процессе резки дисковыми ножницами / П. В. Боровик, П. А. Петров, М. Е. Селезнев // Обработка материалов давлением : сб. науч. тр. – Краматорск ДГМА, 2013. – № 2 (35). – С. 227-231. – ISSN 2076-2151.

403. Пат. 87339 Україна, МПК В23D19/00. Спосіб подачі листа в дискові ножиці гарячого різання / Боровік П. В., Селезньов М.Є.; заявник і патентовласник Донбаський державний технічний університет. – №201306139; заявл. 17.05.2013, опубл. 10.02.2014, Бюл №3.

404. Боровик П. В. Оценка скорости резки листа дисковыми ножами / П. В. Боровик, М. Е. Селезнев // Вестник Нац. техн. ун-та "ХПИ" : сб. науч. тр. Темат. вып. : Инновационные технологии и оборудование обработки материалов в машиностроении и металлургии. – Харьков : НТУ "ХПИ". – 2014. – № 44 (1087). – С. 15-21.

405. Пат. 122024 Україна, МПК В23D35/00, В23F7/00. Спосіб поперечного різання листового матеріалу ножицями з шевронним ножом / Боровік П. В.; заявник і патентовласник Донбаський державний технічний університет. – №201706464; заявл. 23.06.2017, опубл. 26.12.2017, Бюл №24.

406. Пат. 104285 Україна, МПК В23D35/00. Ніж шевронний / Коваленко В.І., Барабаш А.В., Калашников А.А., та ін.; заявник і патентовласник ПАТ «Новокраматорський машинобудівний завод» – №201506097; заявл. 19.06.2015, опубл. 25.01.2016, Бюл №2.

407. Боровик П. В. Повышение качества толстых листов за счёт применения шевронного ножа новой конструкции / П. В. Боровик, М. Е. Селезнев // 3б. наук. пр. "Вісник НТУ "ХПІ" : Нові рішення в сучасних технологіях, – Харьков, 2013, – №43 (1016). – С. 41-46. – ISSN 2079-5459.

408. Пат. 90095 Україна, МПК В23D35/00. Комплект ножів для поперечного різання листового матеріалу / Боровік П. В., Селезньов М.Є.; заявники і патентовласники Боровік П. В., Селезньов М.Є. – №201314897; заявл. 19.12.2013, опубл. 12.05.2014, Бюл №9.

409. Боровик П. В. Теоретическое определение силы резки ножницами фасонных профилей / П. В. Боровик, П. А. Петров // Metallurgicheskaya i gornorudnaya promyshlennost'. – 2013. – № 5 (284). – С.41-44. – ISSN 0543-5749.

410. Боровик П. В. Теоретическое исследование работы дисковых ножниц при увеличенном диаметре верхнего ножа / П. В. Боровик, М. Е. Селезнев // Сборник научных трудов ДонГТУ. – Алчевск, 2013. – Вып. 39. – С. 135-140. – ISSN 2077-1738.

411. Боровик П. В. Оценка влияния схемы привода дисковых ножниц при резке боковых кромок толстолистовых раскатов / П. В. Боровик, М. Е. Селезнев // Актуальные вопросы современной техники и технологии [Текст]: Сборник докладов X-й Юбилейной Международной научной конференции (г.Липецк, 26 января 2013 г.). / Отв. ред. А.В. Горбенко. – Липецк: Издательский центр «Гравис», 2013. – 204 с. – С. 18-21.

412. Селезнев М. Е. Расширение технологических возможностей операции продольной резки за счет совершенствования конструкции дисковых ножниц / М. Е. Селезнев, П. В. Боровик // Сборник научных работ студентов ДонГТУ. – Алчевск, 2011. – Вып. 4 (ч. 1). – С. 100-108.

413. Пат. 72820 Україна, МПК В23D19/00. Спосіб розташування дискових ножиць в потоці прокатного стану / Боровік П. В., Селезньов М.Є.; заявник і патентовласник Донбаський державний технічний університет. – №201202702; заявл. 06.03.2012, опубл. 27.08.2012, Бюл №16.

414. Пат. 122009 Україна, МПК В23D19/00. Спосіб розташування дискових ножиць в потоці прокатного стана / Боровік П. В.; заявник і патентовласник Донбаський державний технічний університет. – №201706423; заявл. 23.06.2017, опубл. 26.12.2017, Бюл №24.

ДОДАТОК А

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ РОБІТ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЙНОЇ РОБОТИ

1. Borovik P. V. Influence of a chevron type knife design on the quality of sheet material shearing / P. V. Borovik, M. E. Seleznyov // Metallurgical and Mining Industry. – 2015. – No. 5. – P. 218-223. – ISSN 2076-0507. – Режим доступу: https://www.metaljournal.com.ua/assets/MMI_2014_6/MMI_2015_5/028BOrovik.pdf
2. Borovik P.V. 3D model of cutting using the rolling cut type shears / P. V. Borovik // Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University. – Magnitogorsk, 2013. – № 5. – P. 40-42. – ISSN 1995-2732. – Режим доступу: <https://cyberleninka.ru/article/n/3d-model-of-cutting-by-rolling-cut-type-shears>
3. Maintenance of Required Mechanical Properties of Sheets with the Use of Rolling Heat / I. E. Davydov, I. V. Rakova, M. B. Lutskiy, V. A. Lutsenko, P. V. Borovik // Metallurgical and Mining Industry. – 2010. – Vol. 2, No. 4. – P. 298-301. – ISSN 2076-0507 – Режим доступу: <https://www.metaljournal.com.ua/assets/Uploads/attachments/Davydov298.pdf>
4. The Finite Element Modulation of Thermostressed State of Coating Formation at Electric Contact Surfacing of “Shaft” Type Parts / OV Berezshnaya, EP Gribkov, PV Borovik, VD Kassov // Advances in Materials Science and Engineering, vol. 2019, Article ID 7601792, 18 pages, 2019. <https://doi.org/10.1155/2019/7601792>
5. Боровик П. В. Возможности повышения качества резки шевронным ножом / П. В. Боровик // Производство проката. – 2014. – №3. – С.36-39. – ISSN 1684-257X. – Режим доступу: <https://elibrary.ru/item.asp?id=21234088>
6. Боровик П. В. Решение проблемы учета механических свойств материала при моделировании процесса горячей резки на ножницах / П. В. Боровик, В. А. Луценко // Сборник научных трудов ДонГТУ. – Алчевск, 2010. – Вып. 32. – С. 175-181. – ISSN 2077-1738. – Режим доступу: <http://masters.donntu.org/2018/fimm/shcherbakov/library/article4.htm>

7. Боровик П. В. Метод построения кривых текучести и пластичности при трехмерном моделировании процессов холодной резки на ножницах / П. В. Боровик // Вісник Національного технічного університету "ХПІ". Сер. : Інноваційні технології та обладнання обробки матеріалів у машинобудуванні та металургії: зб. наук. пр. – Харків : НТУ "ХПІ", 2018. – № 31 (1307). – С. 8-13 – Режим доступу: <http://repository.kpi.kharkov.ua/handle/KhPI-Press/41119>

8. Исследование энергосиловых параметров процесса поперечного разделения на ножницах непрерывнолитых сортовых заготовок / А. В. Сатонин, П. В. Боровик, П. А. Петров, С. М. Стриченко // Сборник научных трудов ДонГТУ. – Алчевск, 2011. – Вып. 35. – С. 131-137. – ISSN 2077-1738. – Режим доступу: <http://sbornik.dstu.education/articles/RU/262.pdf>

9. Боровик П. В. Математическое моделирование процесса резки на ножницах с учетом упругой деформации станины / П. В. Боровик. / Сборник научных трудов / Вестник национального технического университета ХПИ. – Харьков, 2011. – Вып. 47. – С. 76-80. – ISSN 2079-5459. – Режим доступу: <http://repository.kpi.kharkov.ua/handle/KhPI-Press/16302>

10. Анализ энергосиловых параметров процесса разделения на ножницах сортовых профилей в горячем состоянии / П. Н. Денищенко, П. В. Боровик, П. А. Петров, С. М. Стриченко // Обработка материалов давлением : сб. науч. тр. – Краматорск ДГМА, 2011. – № 4 (29). – С. 172–176. – ISSN 2076-2151. – Режим доступу: [http://www.dgma.donetsk.ua/science_public/omd/4\(29\)-2011/article/11DPNSHC.pdf](http://www.dgma.donetsk.ua/science_public/omd/4(29)-2011/article/11DPNSHC.pdf)

11. Боровик П. В. Теоретический анализ процесса горячей резки на ножницах / П. В. Боровик // Обработка материалов давлением : сб. науч. тр. – Краматорск ДГМА, 2012. – № 1 (30). – С. 218–222. – ISSN 2076-2151. – Режим доступу: [http://www.dgma.donetsk.ua/science_public/omd/1\(30\)-2012/article/12BPVCPS.pdf](http://www.dgma.donetsk.ua/science_public/omd/1(30)-2012/article/12BPVCPS.pdf)

12. Боровик П. В. Оценка влияния жесткости станины на параметры процесса резки на ножницах / П. В. Боровик // Сборник научных трудов ДонГТУ.

– Алчевск, 2012. – Вып. 36. – С. 269-275. – ISSN 2077-1738. – Режим доступа: <http://sbornik.dstu.education/articles/RU/222.pdf>

13. Боровик П. В. Теоретический анализ взаимосвязи кривой текучести материала и кривых сопротивления срезу процесса резки на ножницах / П. В. Боровик // Обработка материалов давлением : сб. науч. тр. – Краматорск ДГМА, 2012. – № 2 (31). – С. 69–73. – ISSN 2076-2151. – Режим доступа: [http://www.dgma.donetsk.ua/science_public/omd/2\(31\)-2012/article/12BPVCPS.pdf](http://www.dgma.donetsk.ua/science_public/omd/2(31)-2012/article/12BPVCPS.pdf)

14. Боровик П. В. Влияние деформационного нагрева на результаты математического моделирования процесса резки на ножницах / П. В. Боровик // Сборник научных трудов ДонГТУ. – Алчевск, 2012. – Вып. 37. – С. 135-140. – ISSN 2077-1738. – Режим доступа: http://nbuv.gov.ua/UJRN/sntdgtu_2012_37_18.

15. Боровик П. В. Развитие технологии обрезки боковых кромок листового проката дисковыми ножами / П. В. Боровик, М. Е. Селезнев // Сборник научных трудов ДонГТУ. – Алчевск, 2012. – Вып. 37. – С. 156-163. – ISSN 2077-1738. – Режим доступа: http://nbuv.gov.ua/UJRN/sntdgtu_2012_37_21.

16. Боровик П. В. Теоретический анализ процесса разделения при горячей резке на ножницах / П. В. Боровик // Вісник НТУ України “КПІ”. Серія: Машинобудування. – К., – 2012, – №64. – С. 190-195. – ISSN 2305-9001. – Режим доступа: <https://ela.kpi.ua/bitstream/123456789/3073/1/190-64.pdf>

17. Боровик П. В. Экспериментальная оценка влияния сил внешнего сопротивления на скорость резки толстых листов дисковыми ножами / П. В. Боровик, М. Е. Селезнев // Обработка материалов давлением : сб. науч. тр. – Краматорск ДГМА, 2012. – № 3 (32). – С. 181-184. – ISSN 2076-2151. [http://www.dgma.donetsk.ua/science_public/omd/OMD_3\(32\)_2012_HTML/article/12BPVSDK.pdf](http://www.dgma.donetsk.ua/science_public/omd/OMD_3(32)_2012_HTML/article/12BPVSDK.pdf)

18. Боровик П. В. Теоретический анализ бокового усилия при горячей резке параллельными ножами / П. В. Боровик // Обработка материалов давлением : сб. науч. тр. – Краматорск ДГМА, 2012. – № 4 (33). – С. 132-135. – Режим доступа: [http://www.dgma.donetsk.ua/science_public/omd/OMD_4\(33\)_2012_HTML/article/12BPVCPK.pdf](http://www.dgma.donetsk.ua/science_public/omd/OMD_4(33)_2012_HTML/article/12BPVCPK.pdf)

19. Боровик П. В. Анализ влияния химсостава стали на удельное сопротивление резке в процессе горячего разделения на ножницах / П. В. Боровик // Сборник научных трудов ДонГТУ. – Алчевск, 2012. – Вып. 38. – С. 156-162. – ISSN 2077-1738. – Режим доступа: http://nbuv.gov.ua/UJRN/sntdgtu_2012_38_20.

20. Боровик П. В. Особенности процесса холодной резки квадратной заготовки на сортовых ножницах / П. В. Боровик, П. А. Петров // Сборник научных трудов ДонГТУ. – Алчевск, 2012. – Вып. 38. – С. 190-196. – ISSN 2077-1738. – Режим доступа: http://nbuv.gov.ua/UJRN/sntdgtu_2012_38_24.

21. Боровик П. В. К вопросу качества резки шевронными ножами / П. В. Боровик // Обработка материалов давлением : сб. науч. тр. – Краматорск ДГМА, 2013. – № 1 (34). – С. 245-250. – ISSN 2076-2151. – Режим доступа: [http://www.dgma.donetsk.ua/science_public/omd/omd_1\(34\)_2013/article/13BPVPSK.pdf](http://www.dgma.donetsk.ua/science_public/omd/omd_1(34)_2013/article/13BPVPSK.pdf)

22. Боровик П. В. Анализ условий захвата толстолистого проката в процессе резки дисковыми ножницами / П. В. Боровик, П. А. Петров, М. Е. Селезнев // Обработка материалов давлением : сб. науч. тр. – Краматорск ДГМА, 2013. – № 2 (35). – С. 227-231. – ISSN 2076-2151. – Режим доступа: [http://www.dgma.donetsk.ua/science_public/omd/omd_2\(35\)_2013/article/13bpvpds.pdf](http://www.dgma.donetsk.ua/science_public/omd/omd_2(35)_2013/article/13bpvpds.pdf)

23. Боровик П. В. Теоретическое исследование работы дисковых ножниц при увеличенном диаметре верхнего ножа / П. В. Боровик, М. Е. Селезнев // Сборник научных трудов ДонГТУ. – Алчевск, 2013. – Вып. 39. – С. 135-140. – ISSN 2077-1738. – Режим доступа: http://nbuv.gov.ua/UJRN/sntdgtu_2013_39_21.

24. Боровик П. В. Математическое моделирование процесса резки толстолистных раскатов в горячем состоянии на дисковых ножницах / П. В. Боровик // Ресурсозберігаючі технології виробництва та обробки тиском матеріалів у машинобудуванні: Зб. наук. пр. – Луганськ: Вид-во СНУ ім. В. Даля., 2013. – №1(14). – С. 69-76. – ISSN 2218-1806. – Режим доступа: http://nbuv.gov.ua/UJRN/rtvotmm_2013_1_10.

25. Боровик П. В. Теоретическое определение силы резки ножницами фасонных профилей / П. В. Боровик, П. А. Петров // *Металлургическая и горнорудная промышленность*. – 2013. – № 5 (284). – С.41-44. – ISSN 0543-5749. – Режим доступа: http://nbuv.gov.ua/UJRN/MGRP_2013_5_15

26. Боровик П. В. Повышение качества толстых листов за счёт применения шевронного ножа новой конструкции / П. В. Боровик, М. Е. Селезнев // *Зб. наук. пр. "Вісник НТУ "ХПІ" : Нові рішення в сучасних технологіях*, – Харьков, 2013, – №43 (1016). – С. 41-46. – ISSN 2079-5459. – Режим доступа: <http://archive.kpi.kharkov.ua/files/35657/>

27. Боровик П. В. 3D модель процесса поперечного разделения на ножницах непрерывнолитых сортовых заготовок / П. В. Боровик, П. А. Петров // *Сборник научных трудов ДонГТУ*. – Алчевск, 2013. – Вып. 41. – С. 151-155. – ISSN 2077-1738. – Режим доступа: http://nbuv.gov.ua/UJRN/sntdgtu_2013_41_26

28. Боровик П. В. Метод построения кривых сопротивления резке в процессе горячего разделения металла на ножницах / П. В. Боровик // *Металлургическая и горнорудная промышленность*. – 2014. – № 2 (287). – С.25-29. – ISSN 0543-5749. – Режим доступа: http://nbuv.gov.ua/UJRN/MGRP_2014_2_10

29. Боровик П. В. Трёхмерное моделирование процесса разделения круглого профиля на ножницах / П. В. Боровик // *Сборник научных трудов ДонГТУ*. – Алчевск, 2014. – Вып. 1(42). – С. 102-106. – ISSN 2077-1738. – Режим доступа: http://nbuv.gov.ua/UJRN/sntdgtu_2014_1_17

30. Боровик П. В. Анализ процесса разделения металла в холодном состоянии на ножницах с параллельными ножами / П. В. Боровик // *Сборник научных трудов ДонГТУ*. – Алчевск, 2014. – Вып. 2(43). – С. 36-42. – ISSN 2077-1738. – Режим доступа: http://nbuv.gov.ua/UJRN/sntdgtu_2014_2_8

31. Боровик П. В. Анализ напряженно-деформированного состояния металла при разделении квадратного профиля на ножницах / П. В. Боровик // *Обработка материалов давлением : сб. науч. тр.* – Краматорск ДГМА, 2014. – № 2

(39). – С. 17-23. – ISSN 2076-2151. – Режим доступа: http://nbuv.gov.ua/UJRN/omd_2014_2_5

32. Сатонин А. В. Имитационное моделирование спектра рабочей нагрузки процесса поперечной резки сортовых профилей на ножницах / В. А. Сатонин, П. В. Боровик, П. А. Петров // Обработка материалов давлением : сб. науч. тр. – Краматорск ДГМА, 2014. – № 2 (39). – С. 53-59. – ISSN 2076-2151. – Режим доступа: http://nbuv.gov.ua/UJRN/omd_2014_2_11

33. Боровик П. В. Метод построения кривых текучести материала при моделировании процесса холодного разделения на ножницах / П. В. Боровик // Ресурсозберігаючі технології виробництва та обробки тиском матеріалів у машинобудуванні. – 2014. – № 1. – С. 54-60. – ISSN 2218-1806. – Режим доступа: http://nbuv.gov.ua/UJRN/rtvotmm_2014_1_9

34. Боровик П. В. Оценка скорости резки листа дисковыми ножами / П. В. Боровик, М. Е. Селезнёв // Вестник Нац. техн. ун-та "ХПИ" : сб. науч. тр. Темат. вып. : Инновационные технологии и оборудование обработки материалов в машиностроении и металлургии. – Харьков : НТУ "ХПИ". – 2014. – № 44 (1087). – С. 15-21. URI: <http://repository.kpi.kharkov.ua/handle/KhPI-Press/10927>

35. Ульяницкий В. Н. Экспериментальная оценка стойкости инструмента при резке высокопрочных сталей / В. Н. Ульяницкий, П. В. Боровик, М. Е. Селезнев // Обработка материалов давлением. – 2015. – № 1(40). – С. 227-230. – ISSN 2076-2151. – Режим доступа: http://nbuv.gov.ua/UJRN/omd_2015_1_40

36. Боровик П. В. Трёхмерная модель процесса продольной резки на сдвоенных кромкообрезных ножницах с катящимся резом / П. В. Боровик, М. Е. Селезнев // Вестник Нац. техн. ун-та "ХПИ" : сб. науч. тр. Темат. вып. : Инновационные технологии и оборудование обработки материалов в машиностроении и металлургии – Харьков : НТУ "ХПИ". – 2015. – № 47 (1166). – С. 15-20. – URI: <http://repository.kpi.kharkov.ua/handle/KhPI-Press/21441>

37. Селезнёв М. Е. Сравнительный теоретический анализ эффективности применения шевронных ножей со сложной формой режущей кромки / М. Е. Селезнёв, П. В. Боровик // Научный вестник Донбасской государственной

машиностроительной академии. – 2015. – № 2. – С. 148-153. – ISSN 2219-7869. – Режим доступа: http://nbuv.gov.ua/UJRN/nvdgma_2015_2_24

38. Боровик П. В. Особенности двухмерного моделирования методом конечных элементов процесса резки параллельными ножами / П. В. Боровик, Т. И. Греновецкая // Збірник наукових праць Донбаського державного технічного університету. – 2017. – Вип. 1(46). – С. 72-77. – ISSN 2077-1738. – Режим доступа: http://nbuv.gov.ua/UJRN/sntdgtu_2017_1_12

39. Боровик П. В. Относительное внедрение до скола при резке металла на ножницах в холодном состоянии / П. В. Боровик // Обработка материалов давлением. – 2018. – № 1. – С. 59-65. – ISSN 2076-2151. – Режим доступа: http://nbuv.gov.ua/UJRN/omd_2018_1_11

40. Боровик П. В. 3D моделирование процессов поперечного разделения сортовых профилей на ножницах / П. В. Боровик // Збірник наукових праць Дніпровського державного технічного університету. Технічні науки. – 2018. – Вип. Тем. вип. – С. 11-16 – Режим доступа: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Znpddtu_2018_Tem.

41. Боровик П. В. Обоснование профилировки фасонного ножа для разделения квадратной заготовки в горячем состоянии / П. В. Боровик // Обработка материалов давлением. – 2019. – № 1. – С. 179-185. – Режим доступа: http://nbuv.gov.ua/UJRN/omd_2019_1_28.

42. Боровік П. В. Задача оптимізації профілювання фасонного ножа / П. В. Боровік // Вісник Національного технічного університету "ХПІ". Сер. : Інноваційні технології та обладнання обробки матеріалів у машинобудуванні та металургії: зб. наук. пр. – Харків : НТУ "ХПІ", 2019. – № 12 (1337). – С. 15-19. – Режим доступа: <http://repository.kpi.kharkov.ua/handle/KhPI-Press/44342>

43. Боровик П. В. Выбор метода расчета механических свойств при моделировании процесса горячей резки на ножницах / П. В. Боровик // Актуальные вопросы современной техники и технологии [Текст]: Сборник докладов IX-й Международной научной конференции (г. Липецк, 27 октября 2012

г.). / Отв. ред. А.В. Горбенко. – Липецк: Издательский центр «Гравис», 2012. – С. 45-52.

44. Боровик П. В. Оценка влияния схемы привода дисковых ножниц при резке боковых кромок толстолистовых раскатов / П. В. Боровик, М. Е. Селезнев // Актуальные вопросы современной техники и технологии [Текст]: Сборник докладов X-й Юбилейной Международной научной конференции (г.Липецк, 26 января 2013 г.). / Отв. ред. А.В. Горбенко. – Липецк: Издательский центр «Гравис», 2013. – 204 с. – С. 18-21.

45. Боровик П. В. Аппроксимация механических свойств при математическом моделировании процесса горячей резки на ножницах / П. В. Боровик, В. А. Луценко // Metallurgical processes and equipment – Donetsk, – 2011, – 2(24) – С. 5-9. – ISSN 1816-1200. – Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=16375878>

46. Селезнев М. Е. Расширение технологических возможностей операции продольной резки за счет совершенствования конструкции дисковых ножниц / М. Е. Селезнев, П. В. Боровик // Сборник научных работ студентов ДонГТУ. – Алчевск, 2011. – Вып. 4 (ч. 1). – С. 100-108.

47. Пат. 63571 Україна, МПК В23D19/00. Дискові ножиці / Боровік П. В., Селезньов М.Є.; заявник і патентовласник Донбаський державний технічний університет. – №201103732; заявл. 28.03.11; опубл. 10.10.11, Бюл. №19.

48. Пат. 72820 Україна, МПК В23D19/00. Спосіб розташування дискових ножиць в потоці прокатного стану / Боровік П. В., Селезньов М.Є.; заявник і патентовласник Донбаський державний технічний університет. – №201202702; заявл. 06.03.2012, опубл. 27.08.2012, Бюл №16.

49. Пат. 87339 Україна, МПК В23D19/00. Спосіб подачі листа в дискові ножиці гарячого різання / Боровік П. В., Селезньов М.Є.; заявник і патентовласник Донбаський державний технічний університет. – №201306139; заявл. 17.05.2013, опубл. 10.02.2014, Бюл №3.

50. Пат. 90094 Україна, МПК В23D35/00. Комплект ножів для поперечного різання листового матеріалу / Боровік П. В., Селезньов М.Є.; заявники і

патентовласники Боровік П. В., Селезньов М.Є. – №201314896; заявл. 19.12.2013, опубл. 12.05.2014, Бюл №9.

51. Пат. 90095 Україна, МПК В23D35/00. Комплект ножів для поперечного різання листового матеріалу / Боровік П. В., Селезньов М.Є.; заявники і патентовласники Боровік П. В., Селезньов М.Є. – №201314897; заявл. 19.12.2013, опубл. 12.05.2014, Бюл №9.

52. Пат. 104285 Україна, МПК В23D35/00. Ніж шевронний / Коваленко В.І., Барабаш А.В., Калашников А.А., та ін.; заявник і патентовласник ПАТ «Новокраматорський машинобудівний завод» – №201506097; заявл. 19.06.2015, опубл. 25.01.2016, Бюл №2.

53. Пат. 122009 Україна, МПК В23D19/00. Спосіб розташування дискових ножиць в потоці прокатного стана / Боровік П. В.; заявник і патентовласник Донбаський державний технічний університет. – №201706423; заявл. 23.06.2017, опубл. 26.12.2017, Бюл №24.

54. Пат. 122024 Україна, МПК В23D35/00, В23F7/00. Спосіб поперечного різання листового матеріалу ножицями з шевронним ножем / Боровік П. В.; заявник і патентовласник Донбаський державний технічний університет. – №201706464; заявл. 23.06.2017, опубл. 26.12.2017, Бюл №24.

Особистий внесок автора в роботах, які опубліковані в співавторстві:

[1,8,10,17,35] – розробка плану та методики проведення досліджень; [1,17,20,22,23,25,27,36,38,44,46] – постановка задачі та аналіз результатів досліджуваного процесу розділення; [3] – аналіз технологічних можливостей реалізації розділових операцій в гарячому стані в товстолистовому виробництві; [4,6,26,27,34,36,38,45] – обґрунтування та розробка скінченно-елементної моделі досліджуваного процесу; [4,20,25,45] – обґрунтування моделі механічних властивостей матеріалу; [6,45] – аналіз функціонального зв'язку опору розрізанню з напруженням безпосередньо в зоні розрізання; [8] – дослідження впливу форми ножів на енергосилові параметри розділення гарячих квадратних заготовок; [10] – дослідження впливу форми ножів на розділення квадратних та круглих профілів в

гарячому стані; [15,22,23,25,37,44,46] – розробка технологічних та конструктивних схем досліджуваного процесу розділення; [32] – розробка математичних моделей та програмних засобів процесу поперечного розрізання фасонних профілів; [35] – аналіз впливу зношення ножів на силу та якість розрізання; [47-52] – формування основних ідей корисних моделей, теоретичне обґрунтування та експериментальне підтвердження їх ефективності.

ДОДАТОК Б

АПРОБАЦІЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДИСЕРТАЦІЙНОЇ РОБОТИ
НА МІЖНАРОДНИХ ТА ВСЕУКРАЇНСЬКИХ КОНФЕРЕНЦІЯХ

№	Назва конференції	№ конференції	Місто проведення	Дата	Форма участі
1	2	3	4	5	6
Міжнародні науково-технічні конференції					
1	Нові наукомісткі технології отримання матеріалів і виробів підвищеної якості методами обробки тиском		Краматорськ	25-28 квітня 2011	очна
2		XV		23-26 квітня 2012	очна
3		XVI		22-25 квітня 2013	очна
4		XVII		22-25 квітня 2014	очна
5		XVIII		27-29 квітня 2015	очна
6		XX		22-25 квітня 2017	очна
7		XXI		23-26 квітня 2018	очна
8		XXII		22-25 квітня 2019	очна
9		XXIII		13-15 жовтня 2020	дист.
10	Ресурсозбереження та енергоефективність процесів та обладнання обробки тиском в машинобудуванні і металургії	III	Харків	15-17 листопада 2011	очна
11		IV		23-25 листопада 2012	очна
12		V		20-22 листопада 2013	очна
13		VI		19-21 листопада 2014	очна
14		VII		18-20 листопада 2015	очна
15		X		21-23 листопада 2018	очна
16		XI		20-22 листопада 2019	очна
1	2	3	4	5	6

17			III	Запоріжжя	16-19 листопада 2015	очна
18	Машини та пластична деформація металів		IV	Кам'янське, Дніпро	18-20 жовтня 2018	очна
19	Теорія, технологія та машини обробки металів		–	Кам'янське	8-10 жовтня 2020	дист.
20	Теоретичні та практичні проблеми в обробці матеріалів тиском та якості фахової освіти		III	Київ	14-16 травня 2012	очна
21	Актуальні питання сучасної техніки і технології		IX	Липецьк, Росія	27 жовтня 2012	заочна
22			X		26 січня 2013	заочна
23	Металургійні процеси і обладнання		V	Донецьк	4 вересня 2013	очна
Міжнародні науково-практичні конференції						
24	Сучасні технології промислового комплексу		VI	Херсон	8-12 вересня 2020	дист.
Всеукраїнські науково-технічні конференції						
25	Механічне та мехатронне обладнання заводів чорної металургії			Донецьк	6-7 квітня 2011	очна

ДОДАТОК В

АКТИ ВИКОРИСТАННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДИСЕРТАЦІЙНОЇ РОБОТИ

А К Т

внедрения в промышленность результатов докторской диссертационной работы Боровика Павла Владимировича

Мы, представители Государственного предприятия «Украинский научно-технический центр металлургической промышленности «Энергосталь» (ГП «УкрНТЦ «Энергосталь», г. Харьков) Министерства промышленной политики Украины, настоящим актом подтверждаем, что результаты докторской диссертационной работы Боровика Павла Владимировича, а именно:

- конечно-элементные математические модели процессов продольного и поперечного разделения металлопроката на ножницах в горячем и холодном состоянии;
- уточненные методики по распределению энергосиловых параметров в процессах резки металлопроката на ножницах с дуговым ножом;
- уточненные методики по определению показателей качества готового листа при поперечной резке на ножницах с шевронным ножом;
- расширенные представления о напряженно-деформированном состоянии металла в области среза при реализации разделительных операций металлопроката на ножницах;
- комплексы программных средств по автоматизированному расчету энергосиловых параметров и показателей качества в процессе разделения металлопроката на ножницах;
- технические решения, направленные на совершенствование конструкций машин для продольного и поперечного разделения металлопроката, использованы ГП «УкрНТЦ «Энергосталь» в научных исследованиях, при проектировании технологии и оборудования для резки металлопроката на специализированных отделочных участках прокатных станов.

Использование данных результатов способствовало улучшению технико-экономических показателей работы новых и реконструкции действующих прокатных станов, экономии материальных ресурсов, снижению себестоимости и обеспечению высокого качества готовой продукции, повышению надежности оборудования прокатных цехов.

Зам. генерального директора
ГП «УкрНТЦ «Энергосталь» по НТР -
директор НИИ «УкрНТИМет»,
канд. техн. наук

Главный научный сотрудник,
доктор техн. наук



А.С. Рудюк

В.С. Медведев

УТВЕРЖДАЮ:



Директор ПАО «НИИПТМаш»

г. Крайовск

В. В. Тимченко

2013 г.

АКТ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ

Результаты диссертационной работы Боровика Павла Владимировича, представленной на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.03.05 «Процессы и машины обработки давлением», а именно математические модели и методы расчета процессов операций разделения в прокатном производстве, были использованы на ПАО «Научно-исследовательском и проектно-технологическом институте машиностроения» при разработке ряда технико-коммерческих предложений и технических проектов оборудования для операций разделения в прокатном производстве.

Использование результатов данной диссертационной работы позволило снизить трудоемкость проектно-технологических и проектно-конструкторских работ при одновременном расширении сортамента и повышении качества готовой металлопродукции.

Главный инженер проекта

В. И. Ромашов

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Генеральний директор

ТОВ НВП «Дніпроенергосталь»,

Осипенко В.В.

« _ » _____



АКТ ВПРОВАДЖЕННЯ

Комісія у складі:

заступника генерального директора Семірягін С.В.,

технічного директора Безбабного С.Г.

начальника проектно-конструкторського управління Бубунця Ю.В.,

склала цей акт про те, що за результатами наукових досліджень *Боровіка Павла Володимировича*, доцента кафедри «Машинознавство та обладнання промислових підприємств» Східноукраїнського національного університету ім. В. Даля (м.Сєвєродонецьк), на ТОВ НВП «Дніпроенергосталь» введено наступні результати:

- рекомендації з профілювання шевронних ножів при поперечному різанні листового металопрокату;
- рекомендації з профілювання фасонних ножів при поперечному різанні безперервнолитих квадратних заготовок у гарячому стані;
- методики з розрахунку енергосилових параметрів в процесах різання металопрокату на ножицях з криволінійним (дуговим) ножом;
- методики по визначенню показників якості готового листа при поперечному різанні на ножицях з шевронним ножом;
- алгоритм визначення розподілу енергосилових параметрів в процесах різання металопрокату на ножицях з дисковими ножами;

- комплекси програмних засобів з автоматизованого розрахунку енергосилових параметрів і показників якості в процесі поділу металопрокату на ножицях;

- технічні рішення, спрямовані на вдосконалення конструкцій машин для поздовжнього і поперечного поділу металопрокату.

Використання даних результатів сприяло вдосконаленню технологічних режимів, поліпшенню показників якості і підвищенню виходу придатного, а також підвищенню надійності обладнання для поперечного та поздовжнього різання прокату.

Реальний економічний ефект становив 250 тис. грн. за рівнем цін 2018 року. Очікуваний економічний ефект від впровадження складає 800 тис. грн. за рівнем цін 2018 року.

Розрахунок економічного ефекту не викладено, оскільки містить елементи комерційної таємниці ТОВ НВП «Дніпроенергосталь».

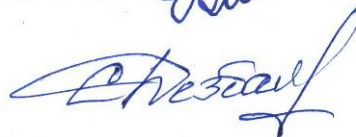
Даний «Акт впровадження» призначений для надання до спеціалізованої вченої ради із захисту докторських та кандидатських дисертацій, а тому не є основою для висування фінансових вимог.

Заступник генерального директора



Семірягін С.В.

Технічний директор



Безбабний С.Г.

Начальник

проектно-конструкторського управління



Бубунець Ю.В.

УТВЕРЖДАЮ:

Директор производства
металлургического и шахтно-
проходческого оборудования

Новокраматорский
машиностроительный завод»



И. И. Итаренко А. И.

АКТ

использования результатов комплекса научно-исследовательских работ по совершенствованию технологий и оборудования для производства горячекатаных и холоднокатаных листов и полос, выполненных совместно ПАО «Новокраматорский машиностроительный завод» и Донбасской государственной машиностроительной академией в рамках договора о совместном сотрудничестве, а также в рамках филиала кафедры «Автоматизированные металлургические машины и оборудование» (ДГМА) на ПАО «НКМЗ» и ряда хоздоговорных научно-исследовательских работ.

Основные результаты данного комплекса научно-исследовательских работ, а именно:

- уточненные инженерные, численные и регрессионные математические модели напряженно-деформированного состояния металла и основных показателей качества при реализации процессов горячей и холодной прокатки, правки, резки и отделки листов и полос;
- программные средства по автоматизированному расчету и проектированию технологических режимов процессов горячей и холодной прокатки на толстолистовых, широкополосных и реверсивных станах;
- практические рекомендации по выбору состава основного и вспомогательного оборудования толстолистовых, широкополосных и реверсивных станов горячей и холодной прокатки, а также уточненные исходные данные на их проектирование;

- уточненные методы расчета и рекомендации по выбору электроприводов основного и вспомогательного оборудования толстолистовых и широкополосных станов горячей прокатки;

- уточненные методы автоматизированного расчета и проектирования, а также практические рекомендации по совершенствованию состава и конструктивных параметров механического оборудования приводов, узлов рабочих и опорных валков, нажимных механизмов, устройств уравнивания, узлов станин и других механизмов рабочих клетей станов горячей и холодной прокатки.

Положенные в основу результаты данного комплекса научно-исследовательских работ были использованы в течение 2009–2012 гг. на ПАО «НКМЗ» при проектировании, изготовлении и вводе в эксплуатацию целого ряда прокатного оборудования.

Использование данных материалов позволило снизить себестоимость поставляемой продукции для Изготовителя и, как следствие, снизить цену продукции для Заказчиков.

За счет снижения трудоемкости проектно-конструкторских и проектно-технологических работ, а также за счет расширения сортамента, повышения качества и увеличения выхода годной металлопродукции, экономический эффект составил 18800 тыс. (восемнадцать миллионов восемьсот тысяч) грн. по ценам 2012 года.

Настоящий акт предназначен для предъявления в специализированные ученые советы по защите кандидатских и докторских диссертаций и не является основанием для предъявления финансовых требований.

Расчет экономического эффекта не прилагается, так как содержит элементы коммерческой тайны ПАО «НКМЗ».

Главный конструктор производства
металлургического и
шахтно-проходческого оборудования



Ю. В. Сусь

ДОВІДКА

про дольову участь *Боровика Павла Володимировича* в економічному ефекті, отриманому при використанні результатів науково-дослідних робіт з удосконалення технологій і обладнання для виробництва гарячекатаних листів і штаб, виконаних в Донбаській державній машинобудівній академії (ДДМА) спільно з ПАТ «Новокраматорський машинобудівний завод»

Результати дисертаційної роботи *Боровика Павла Володимировича*, отримані в рамках договору Тс-12-2008 про партнерство, співробітництво та науковий обмін між Донбаською державною машинобудівною академією (м. Краматорськ) і Донбаським державним технічним університетом (м. Алчевськ), а саме:

- скінченно-елементні математичні моделі процесів поздовжнього і поперечного поділу металопрокату на ножицях в гарячому і холодному стані;
- уточнені методики з розподілу енергосилових параметрів в процесах різання металопрокату на ножицях з дуговим ножом;
- уточнені методики з визначення показників якості готового листа при поперечному різанні на ножицях з шевронним ножом;
- розподілу енергосилових параметрів в процесах різання металопрокату на ножицях з дуговим ножом;
- розширені уявлення про напружено-деформований стан металу в області зрізу при реалізації розділових операцій металопрокату на ножицях;
- комплекси програмних засобів з автоматизованого розрахунку енергосилових параметрів і показників якості в процесі поділу металопрокату на ножицях;
- скінченно-елементні математичні моделі процесу поздовжнього поділу металопрокату в ході багатострумкової прокатки-розділення реалізованого прокатними валками і неприводними ділильними пристроями;
- уточнені методики з визначення енергосилових параметрів і геометричних характеристик металопрокату при реалізації багатострумкової прокатки-розділення;
- комплекси програмних засобів з автоматизованого розрахунку енергосилових параметрів процесу поздовжнього поділу металопрокату

прокатними валками і неприводними ділильними пристроями в ході багатострумкової прокатки-розділення;

- технічні рішення, спрямовані на удосконалення конструкцій машин для поздовжнього і поперечного поділу металопрокату були використані в рамках комплексу науково-дослідних робіт з вдосконалення технологічних режимів, поліпшення показників якості та підвищення виходу придатного, а також з підвищення надійності обладнання виробництва ПАТ «Новокраматорський машинобудівний завод».

Загальний економічний ефект, за рахунок зниження трудомісткості проектно-конструкторських і проектно-технологічних робіт, а також, за рахунок удосконалення методики визначення основних технологічних параметрів розділових операцій і збільшення виходу придатної металопродукції, склав 18800 тис. (вісімнадцять мільйонів вісімсот тисяч) гривень за цінами 2012 року.

Дольова участь *Боровика П.В.* при виконанні даних робіт в якості виконавця склала 10%, що відповідає економічному ефекту від впровадження результатів його дисертаційної роботи на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.03.05 «Процеси та машини обробки тиском», в обсязі 1880000 (один мільйон вісімсот вісімдесят тисяч) гривень за цінами 2012 року.

Науковий керівник комплексу науково-дослідних робіт з удосконалення технологій і обладнання для виробництва гарячекатаних листів і штаб, виконаних спільно з ПАТ «НКМЗ»,

д-р. техн. наук, доц., зав. каф. «Автоматизовані металургійні машини та обладнання»



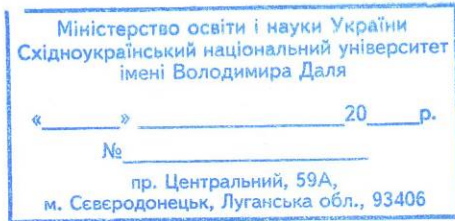
Е.П. Грибков

Підпис д-ра техн. наук Грибкова Е.П. завіряю:

проректор з наукової роботи, управління розвитком та міжнародних зв'язків Донбаської державної машинобудівної академії,
д-р. хім. наук, професор




М.А. Турчанін



Затверджую:

Ректор Східноукраїнського
Національного університету
ім. В. Даля,
проф. О. В. Поркуян

«_____» _____ 2020 р.



ДОВІДКА ПРО ВПРОВАДЖЕННЯ

Дисертаційна робота Боровіка Павла Володимировича подавана на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук на тему: «Розвиток теоретичних основ та вдосконалення технології і обладнання процесів операцій розділення в прокатному виробництві» містить наступні практичні результати, що використовуються на кафедрі «Машинобудування та прикладна механіка»:


- скінченно-елементні математичні моделі процесів поздовжнього і поперечного розділення металопрокату на ножицях в гарячому і холодному стані;
- уточнені методики з розподілу енергосилових параметрів в процесах розрізання металопрокату на ножицях з дуговим ножом;
- уточнені методики по визначенню показників якості готового листа при поперечному розрізанні на ножицях з шевронним ножом;
- уточнення розподілу енергосилових параметрів в процесах розрізання металопрокату на ножицях з дуговим ножом;
- розширені уявлення про напружено-деформований стан металу в зоні розділення при реалізації операцій розрізання металопрокату на ножицях;
- комплекси програмних засобів з автоматизованого розрахунку енергосилових параметрів і показників якості в процесах розділення металопрокату на ножицях.

Зокрема ці матеріали отримали практичне застосування у вигляді методичних та лекційних матеріалів в рамках викладання наступних дисциплін:

- «Конструювання, розрахунок та САПР машин і обладнання»;
- «Дослідження, випробування та діагностика машин і обладнання».

А також при виконанні курсових робіт та проєктів, випускних кваліфікаційних робіт бакалаврів і магістрів за спеціальностями 133 «Галузеве машинобудування» та 131 «Прикладна механіка».

Перший проректор Східноукраїнського
Національного університету ім. В. Даля

 Д.М. Марченко