

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

БОРОВІК ПАВЛО ВОЛОДИМИРОВИЧ



УДК 621.77.01 : 621.965 : 621.967

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

Спеціальність 05.03.05 – процеси та машини обробки тиском

**АВТОРЕФЕРАТ
на здобуття наукового ступеня
доктора технічних наук**

Краматорськ – 2021

Дисертацією є рукопис
Роботу виконано в Донбаській державній машинобудівній академії (ДДМА, м. Краматорськ) Міністерства освіти і науки України.

Науковий консультант: доктор технічних наук, доцент
Грибков Едуард Петрович,
завідувач кафедри «Автоматизовані металургійні машини і обладнання», Донбаська державна машинобудівна академія (м. Краматорськ).

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Іщенко Анатолій Олексійович,
завідувач кафедри «Механічне обладнання заводів чорної металургії», Приазовський державний технічний університет Міністерства освіти і науки України (м. Маріуполь);
доктор технічних наук, професор
Грушко Олександр Володимирович,
в. о. завідувача кафедри «Опір матеріалів та прикладна механіка», Вінницький національний технічний університет Міністерства освіти і науки України (м. Вінниця);
доктор технічних наук, професор
Тараненко Михайло Євгенович,
професор кафедри автомобілів та транспортної інфраструктури, Національний аерокосмічний університет ім. М.Є. Жуковського "Харківський авіаційний інститут"(м. Харків).

Захист відбудеться «07» травня 2021 р. об 11⁰⁰ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 12.105.01 із захисту дисертацій у Донбаській державній машинобудівній академії (84313, м. Краматорськ, вул. Академічна, 72, 1-й навчальний корпус, ауд. 1319).

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Донбаської державної машинобудівної академії (84313, м. Краматорськ, вул. Академічна, 72, 1-й навчальний корпус).

Автореферат розіслано «06» квітня 2021 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради
Д 12.105.01, к.т.н., доцент



Ю. К. Добронос

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

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 багатofакторність 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 розрізаному 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 інструментів 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 0110U000094 (наказ № 686 від 22.07.2009); 0114U002537 (наказ № 1611 від 22.11.2013), госпдоговірної науково-дослідної

роботи 0109U000834. У цих роботах автор брав участь як відповідальний виконавець.

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 моделюванні 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 тривимірного 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 статичної рівноваги виділених елементарних об'ємів.

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 кромek 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 *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 експериментальних 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, восьми 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 7 сторінках і 3 додатки на 21 сторінці, до яких також входять список опублікованих праць за темою дисертації і перелік науково-технічних конференцій.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтована актуальність дисертаційної роботи і показано її зв'язок з науковими програмами, планами і темами. Сформульовані мета і задачі, дана характеристика об'єкту, предмету і методів дослідження. Показані наукова новизна і практична цінність отриманих результатів, а також їх апробація і промислове використання. Відмічений особистий внесок здобувача.

У **першому розділі** проаналізовані технології, обладнання, методи розрахунку і перспективи розділових операцій у прокатному виробництві. Основними перевагами розділових операцій без зняття стружки є відсутність втрат металу; висока пропускна здатність; високий ступінь механізації та автоматизації; здатність охопити переважну більшість прокатного сортаменту.

Виконання операцій розділення на заключних етапах має забезпечити якість і мінімізувати відходи металу, підвищити продуктивності обладнання. Це потребує розвитку і узагальнення теоретичних основ цих процесів, а на їх основі розробки уніфікованих математичних моделей і методів аналізу процесу і обладнання, що його реалізує.

Відзначено, що специфічні аспекти вирішення різноманітних завдань при дослідженні кожного окремо взятого процесу розділення вимагають використання математичних моделей, максимально наближених до реальних умов з різним рівнем композиційної складності, здатних забезпечити найбільш повний обсяг інформації з високим ступенем адекватності.

Встановлено, що поліпшення техніко-економічних показників процесів поздовжнього і поперечного розрізання металопрокату на ножицях можливе на основі розвитку наукових і практичних основ застосування методу скінченних елементів (МСЕ) для вирішення комбінованих задач теорій пружності, пластичності та руйнування з урахуванням змінних умов протікання процесу. Вирішення даної науково-технічної проблеми можливе в двовимірній і тривимірній інтерпретації методу, котрі мають високу інформативність, але разом з тим, трудомісткість і великі витрати машинного часу через ітераційний підхід до вирішення задач розвитку пластичної деформації і руйнування. Це обумовлює необхідність обґрунтування типу скінченних елементів, правил контролю і управління їх геометрією в зоні розділення, процедурою формування та зростання

тріщини, а також врахування впливу пружних характеристик ножиць та термодинамічних ефектів в матеріалі під час розділення.

На основі аналізу стану питання визначено мету і задачі роботи, вказані раніше.

У **другому розділі** обґрунтовано та здійснено вибір напрямку і методів дослідження технологій і обладнання розділових процесів листового і сортового металопрокату.

Максимальна ефективність рішень в області розділових операцій можлива тільки за умови проведення широкого спектру всебічних теоретичних і експериментальних досліджень, спрямованих на розвиток методів розрахунку та розробку рекомендацій щодо вдосконалення конкретних технологій розділення і обладнання. Інформацію для проектування технологій і обладнання розділення металопрокату доцільно отримувати методами математичного моделювання.

В основу теоретичних досліджень процесів розділових операцій були покладені методи теорії пружності і пластичності, а також механіки руйнування, комплексне застосування яких реалізує МСЕ. Для підвищення ефективності моделювання МСЕ доцільно застосовувати елементи теорії планування експерименту та статистичної обробки теоретичних експериментів, а для оцінки адекватності використовувати методи кореляційного і регресійного аналізу.

Адекватність результатів моделювання можлива за умов дотримання: коректного опису умов контакту між інструментом і матеріалом; адекватної функції пластичних властивостей матеріалу; коректної моделі вичерпання матеріалом пластичності і визначення умов руйнування; ефективного керування сіткою та вибору підходів дослідження поведінки суцільного середовища в МСЕ.

Експериментальні дослідження проведено для підтвердження адекватності та достовірності розроблених математичних моделей та розширення і уточнення вихідних даних для їх розробки. Експерименти проводили переважно шляхом фізичного моделювання на лабораторному обладнанні з подальшою статистичною обробкою результатів.

У **третьому розділі** були розроблені прикладні аспекти моделювання процесів розділення методом скінченних елементів.

У рамках проведених теоретичних досліджень були напрацьовані практичні основи моделювання з використанням скінченно-елементного програмного комплексу Abaqus. Загальні вимоги до вибору скінченних елементів і апроксимуючих функцій встановлюють критерії збіжності МСЕ.

При аналізі явищ з утворенням дефектів і руйнування виправдана стратегія використання дрібних стандартних елементів нижчого порядку.

Для моделювання розрізуваних заготовок найбільш ефективними є лінійні ізопараметричні скінченні елементи із редукованою схемою інтегрування, що мають властивості суцільного середовища і контроль зберігання форми.

Первісну область сітки доцільно розбити на підобласті (рис. 1) з різним розміром скінченних елементів, а використання підходу Лагранжа-Ейлера має застосовуватись тільки для підобластей в зоні власне розрізання (рис. 2), з накладанням обмежень.

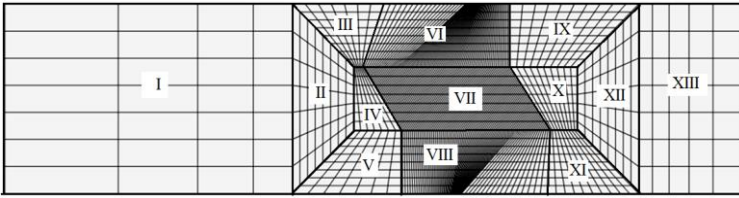
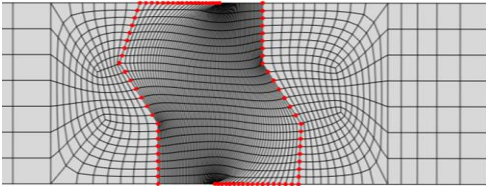
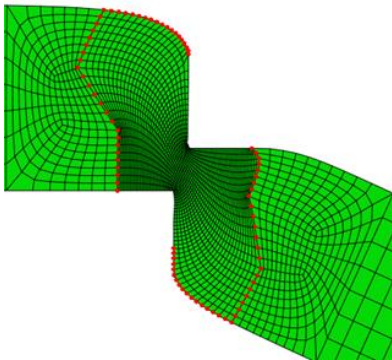


Рис. 1 – Схема розділення модельованої області на підобласті початкової сітки 2D моделей процесів розрізання паралельними ножами



а



б

Рис. 2 – Зміни початкової сітки (див. рис. 1) після адаптації при використанні підходу Лагранжа-Ейлера з обмеженнями (а) поведінки вузлів (•) в формулюванні підходу Лагранжа і її структура (б) в ході моделювання

Виходячи з умови сталості енергії руйнування при збільшенні $\dot{\epsilon} > 0$ мають місце збільшення $\bar{\sigma}$ та зменшення $\bar{\epsilon}_f^{pl}$.

При визначенні $\bar{\epsilon}_f^{pl}$ використовували підхід Хіллерборга (Hillerborg), оснований на концепції крихкого руйнування, коли втрата міцності після виникнення пошкоджень характеризується зниженням напруження.

Закон розвитку пошкоджень в матеріалі визначали через еквівалентне пластичне переміщення \bar{u}^{pl} , що вимагає визначення характеристичної довжини L , пов'язаної з точкою інтегрування. Складність визначення характеристичної

При вивченні НДС інструмент слід приймати абсолютно жорстким, застосовуючи аналітичні поверхні або скінченні елементи.

Оскільки поверхневі шари металу зазнають більш інтенсивної деформації і їх властивості міцності виявляються вищими, ніж у металу

всередині заготовки, тому контактну взаємодію деформованого металу та інструменту слід описувати законом тертя Кулона з обмеженням дотичного контактного напруження.

Пластичні властивості деформованого матеріалу описувалися моделлю пластичності Мізеса, а модель руйнування базувалася на критерії пластичності, що 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 η і швидкості деформації $\dot{\epsilon}^{pl}$, а з початком ушкоджень в матеріалі змінна стану $\omega_D = 1$.

На рис. 3,а продемонстровано характерну поведінку в ході деформації матеріалу з ізотропним зміцненням без пошкоджень ($D = 0$) та при наявності пошкоджень ($D > 0$). Еквівалентну пластичну деформацію руйнування $\bar{\epsilon}_f^{pl}$ визначали з діаграми пластичності (рис. 3,б) в залежності від показника напруженого стану та швидкості деформації $\dot{\epsilon}$.

довжини L при моделюванні процесів розділення полягає в тому, що розмір цих елементів поступово зменшується (див. рис. 2, б), особливо в умовах гарячого розрізання. Аналіз результатів свідчить, що площа елементів S_e перед руйнуванням відповідає нормальному розподіленню, найбільш тісним є зв'язок із відносним проникненням ε_H .

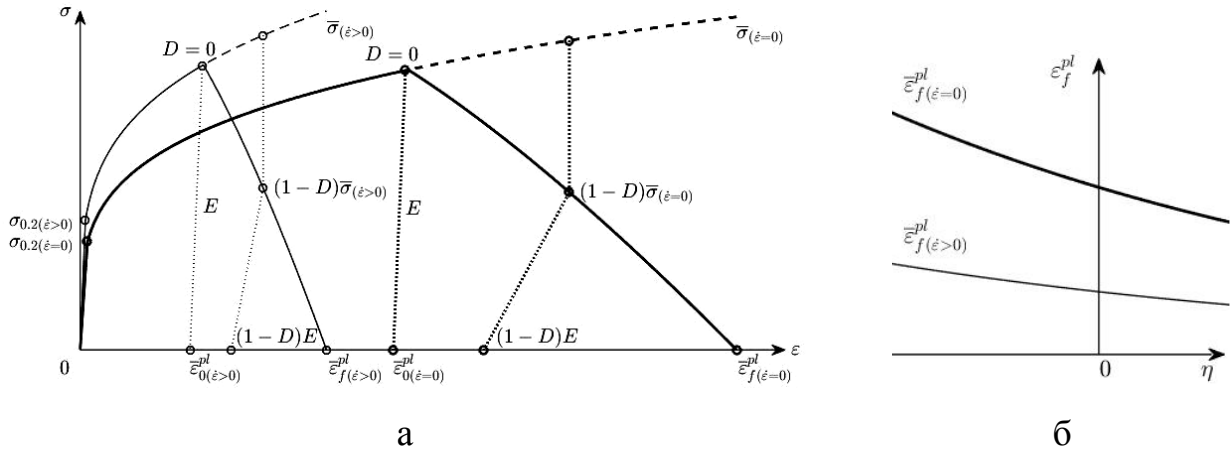


Рис. 3 – Характерні криві деформації матеріалу (а) з ізотропним зміцненням без пошкоджень (---) та при наявності пошкоджень (—) при статичній швидкості деформації ($\dot{\varepsilon} = 0$) та швидкості, більшій за статичну ($\dot{\varepsilon} > 0$) та характерні криві діаграми пластичності (б) пластичного матеріалу при статичній швидкості деформації ($\dot{\varepsilon} = 0$) та швидкості, більшій за статичну ($\dot{\varepsilon} > 0$)

Накопичення пошкоджуваності, засноване на ефективному пластичному переміщенні \bar{u}^{pl} , використовуване в Abaqus, представляє собою залежність критерію початку в'язкого руйнування d від \bar{u}^{pl} .

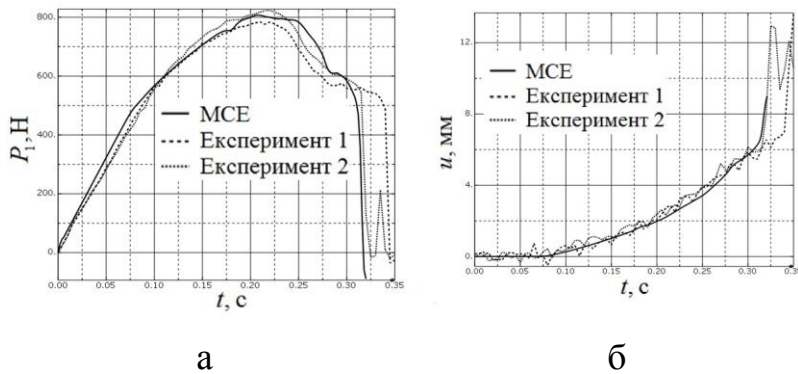


Рис. 4 – Залежності зміни в часі t сили розрізання P_1 на 1 мм ширини (а) та зближення ножів (б) за результатами експериментів і моделювання МСЕ

Також важливим аспектом процесів розділення металопрокату є термодинамічні ефекти в металі під час деформування, що призводить до зростання температури в локальних зонах (рис. 5), а її врахування підвищує точність визна-

Аналіз результатів математичного моделювання і експериментальних даних процесу розрізання на ножицях з паралельними ножами свідчить, що, за розглянутих умов, на етапі вмінання ($t = 0,0 \dots 0,8$ с на рис. 4,а) спостерігається зростання сили розрізання, проте в той же час зближення ножів майже не відбувається, внаслідок пружної деформації станини (рис. 4,б).

чення максимального значення сили розрізання до 7%, оскільки зміни температури впливають на напруження течії металу.

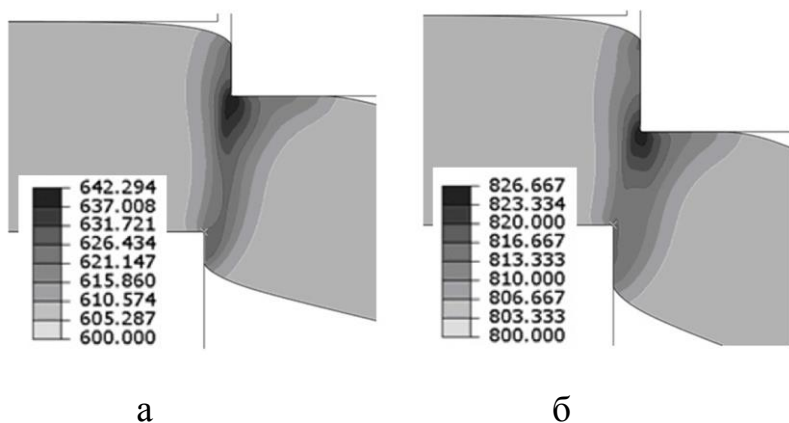


Рис. 5 – Розподіл температури в осередку розрізання при моделюванні процесу з урахуванням деформаційного нагріву при температурі початку процесу: а – 600°C ; б – 800°C

Результатів симуляції з подальшим перетворенням їх до формату, придатного для обробки з використання програмних засобів; 5) розробка програмних засобів для обробки результатів симуляції. В такий спосіб був встановлений зв'язок між відносною глибиною проникнення ножів в метал ε і величиною пластичної деформації $\bar{\varepsilon}$ (рис. 6,а) в процесі розрізання.

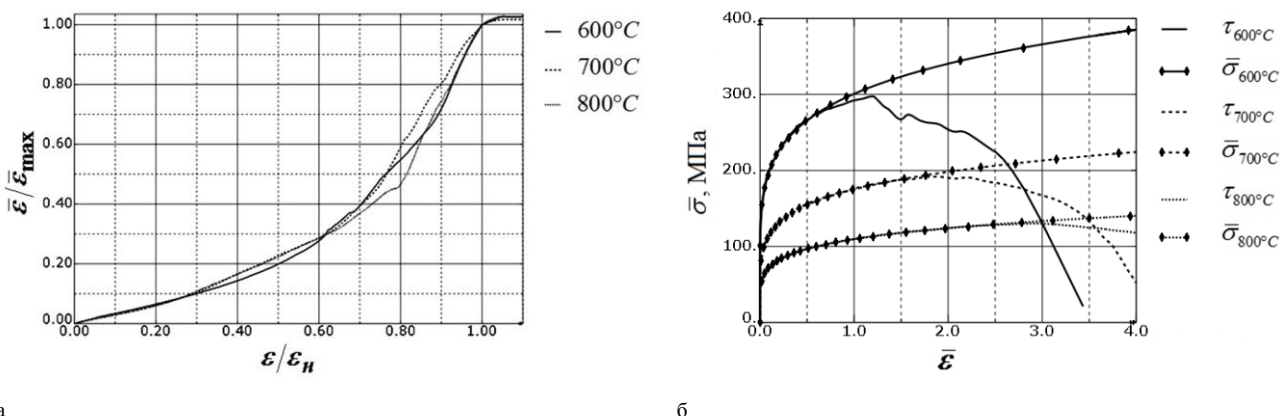


Рис. 6 – Залежності, усереднені для всіх елементів, що руйнуються: а – накопичення пластичної деформації $\bar{\varepsilon}$ від відносної глибини проникнення ε перетворені до відносних (одиничних) координат; б – напруження-деформація $\bar{\sigma}(\bar{\varepsilon})$, використовувані при моделюванні (•) в порівнянні з кривими опору розрізання $\bar{\tau}(\bar{\varepsilon})$, отриманими за його результатами на базі кривих сили розрізання на ножицях за допомогою виразу (1) при різних температурах

Аналіз результатів дозволив виявити функціональний зв'язок між $\bar{\sigma}$ та істинним опором зрізу $\tau_{\bar{\varepsilon}}$, котрий при врахуванні температури різання та термодинамічних явищ має вигляд:

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

де $\bar{\varepsilon}_{\max}$ та ε_n – відповідно ступінь пластичної деформації при руйнуванні та відносне проникнення ножів в метал до сколювання для певної температури.

Отримані залежності відповідають характерним кривим деформації матеріалу з ізотропним зміцненням з пошкодженням та без (див. рис. 3).

За базову модель визначення інтенсивності напружень для гарячого розрізання було обрано методику Андреюка-Тюленєва, котра при визначенні дійсного опору деформації σ_u , щодо СЕ моделювання процесів розділення, потребує врахування коефіцієнта адаптації k_n :

$$\bar{\sigma} = \sigma_u k_n. \quad (2)$$

Повну відповідність максимального опору розрізанню розрахункових та експериментальних даних отримали при $k_n = 0,52 \dots 0,583$, а найбільший ступінь збіжності ($\pm 10\%$) з фіксованим значенням k_n був отриманий при $k_n = 0,53$.

Механічні властивості холодного металопрокату в значній мірі залежать від способу виробництва і термічної обробки, а отже доцільно використовувати 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.

Для кривих пластичності при розрахунку інтенсивності напружень використовували відому залежність, проте було відзначено, що у всіх випадках моделювання МСЕ мають місце завищені результати в діапазоні 7,7...42%. Аналіз цього факту дозволив уточнити значення використовуваного показника зміцнення, для якого було отримано рівняння:

$$m_1 = \ln(\sigma_b/\sigma_{0,2}) / \ln[500 \cdot \ln(1 + \delta)]. \quad (3)$$

Для визначення пластичної деформації руйнування $\bar{\varepsilon}_f$ при відомій швидкості деформації була отримана наступна залежність:

$$\bar{\varepsilon}_{f(\dot{\varepsilon}>0)}^{pl} = \bar{\varepsilon}_{f(\dot{\varepsilon}=0)}^{pl} / K_v^{\frac{1}{m_1+1}} = 2 \ln(1 + \delta) e^{-2,16\eta} / K_v^{\frac{1}{m_1+1}}. \quad (4)$$

де K_v – швидкісний коефіцієнт.

Було встановлено, що результати СЕ моделювання залежать від значення швидкості деформації при статичних випробуваннях, котра зазвичай знаходиться в межах $10^{-3} \dots 10^{-5} \text{ c}^{-1}$. Для її розрахунку була отримана залежність:

$$\dot{\varepsilon}_s = e^{-3,5-21\delta}. \quad (5)$$

Таким чином, було отримане уточнене рівняння для побудови кривих пластичності при розрахунку $\bar{\sigma}$, в залежності від $\bar{\varepsilon}^{pl}$ та $\dot{\varepsilon}$:

$$\bar{\sigma} = \sigma_{0,2} \left(\bar{\varepsilon}^{pl} / 0,002 \right)^{m_1} \left(\dot{\varepsilon} / e^{-3,5-21\delta} \right)^m, \quad (6)$$

де m – показник швидкісного зміцнення.

Використання рівняння (6) при моделюванні МСЕ дозволило зменшити відносну похибку по енергосилових параметрах до $\pm 7\%$.

В четвертому розділі на основі розроблених підходів було вирішено ряд задач з аналізу процесів поперечного розрізання для деяких типів ножиць з точки зору енергосилових параметрів та показників якості розрізаного металопрокату.

Зокрема, результати двовимірного моделювання МСЕ поперечного гарячого розрізання на ножицях з паралельними ножами (рис. 7) свідчать, що опір розрізанню для конкретної марки сталі може змінюватися в широкому діапазоні за рахунок варіювання вмісту хімічних елементів (в межах стандарту) і різних швидкостях розрізання. При цьому діапазон опору розрізанню при зменшенні температури металу розширюється.

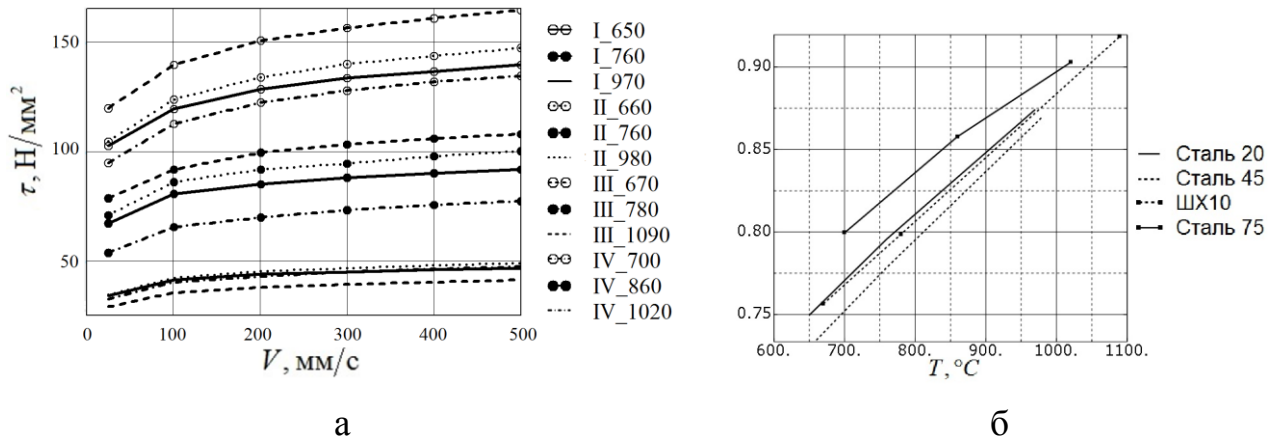


Рис. 7 – Залежності максимальних значень питомого опору зрізу для зразків I-IV від швидкості розрізання (а) та співвідношення питомого опору розрізанню, при мінімально допустимому вмісті хімічних елементів до максимально припустимого, в залежності від температури для досліджуваних марок сталі (б)

В ході дослідження процесу розрізання паралельними ножами в холодному стані вивчали якісний та кількісний частинний (всі інші параметри відповідали експериментальним даним) вплив $V_h = V/h = 1 \dots 20 \text{ c}^{-1}$; $h = 1 \dots 25 \text{ мм}$; $\pm 10\% \sigma_{0,2}$; $\pm 20\% \delta$ на τ_{\max} та ε_H . За результатами встановлено, що додатково до відомих факторів існує функціональний зв'язок $\tau_{\max} = f(V_h, h)$ і $\varepsilon_H = f(V_h, h, \sigma_{0,2}, \delta)$, а отже відомі методики визначення τ_{\max} та ε_H потребують уточнення, що було зроблено в розділі 7.

З метою оцінки адекватності результатів моделювання МСЕ формоутворення реальному процесу, в зоні зрізу та прилеглих до неї, була розроблена тривимірна СЕ модель процесу поперечного розділення на ножицях квадратних сортових заготовок в гарячому стані ножами трикутної форми з траєкторією

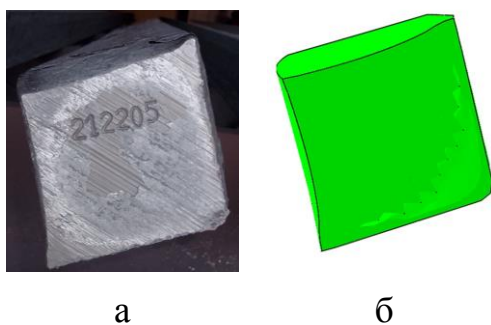


Рис. 8 – Форма торцевої поверхні безперервнолитої заготовки після поперечного розділення на ножицях (а) і за результатами моделювання (б)

переміщення під кутом $\pi/4$ до горизонталі. За результатами моделювання процесу для заготовки перерізом 120×120 мм зі сталі 20 при температурі 970°C зі швидкістю 70 мм/с були отримані геометричні параметри перерізу (рис. 8). В порівнянні з виробничими даними форма реальної заготовки і отриманої в результаті моделювання мали досить близьку конфігурацію, а розбіжність за максимальним значенням сили розрізання не перевищила 5% .

За результатами моделювання напружено-деформованого стану металу при поперечному розрізанні квадратних профілів в холодному стані порівнювались розрахункові і експериментальні залежності сили при використанні паралельного і фасонного ножів.

Величина коефіцієнта кореляції становила $0,874 \dots 0,960$ при розрізанні паралельними ножами і $0,908 \dots 0,978$ фасонними.

Обробка результатів по ширині перерізу (при розрізанні на кут – горизонтальна діагональ) надала розподіли максимальних значень $\bar{\varepsilon}^{pl}$, σ і η . При цьому величина $\bar{\varepsilon}^{pl}$ при повному руйнуванні перерізу (розрізання паралельними ножами) збільшувалася від периферії до вертикальної осі (середнє значення $1,519$), а фасонними ножами мала дещо коливальний характер відносно середньої величини ($1,747$). Можна відзначити, що при використанні фасонних ножів більший ступінь $\bar{\varepsilon}^{pl}$ досягається за менший проміжок часу, тобто при меншому ході ножа до $12,5\%$ (≈ 4 мм паралельними, $\approx 3,5$ мм фасонними ножами), проте спостерігається збільшення ($< 7\%$) максимального значення сили розрізання. Крім того, по краях перерізу спостерігається практично 4-х кратне збільшення η , при близьких значеннях $\bar{\varepsilon}^{pl}$, бо змінюється відносне проникнення ножів ε .

На рис. 9 представлені розподіли $\bar{\varepsilon}^{pl}$, σ і η по ширині перерізу (діагональ квадрата) при ε для елементів, коефіцієнт пошкоджуваності яких $D < 1$. При цьому маємо $\varepsilon > 1$ в крайніх перерізах, що саме і вказує на відмінність умов процесу, пов'язану з висотою розрізуваного перерізу.

Розроблений підхід дозволив проаналізувати вплив особливостей геометричної форми в вершині сходження різальних кромek шевронного ножа на силу і показники якості процесу поперечного розрізання листових заготовок. Встановлено, що застосування радіусу $R \leq 75h$ округленої ділянки в вершині сходження різальних кромek призводить до збільшення максимальної сили розрізання не більше ніж на 10% . При цьому вертикальне залишкове зміщення (залишкова деформація) у вертикальній площині знижується на $11 \dots 18\%$.

Процес розрізання на ножицях з криволінійним (дуговим) ножем досліджували на предмет зменшення сили розрізання та її рівномірного розподілу протягом циклу розрізання. При рекомендованому радіусу дуги ножа максимальне значення сили розрізання в $\approx 1,6$ рази більше сталого процесу. При не-

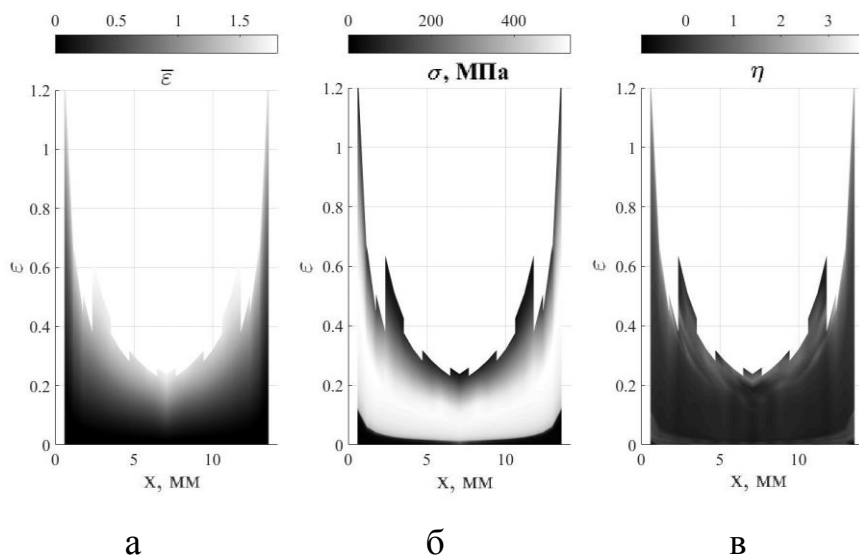


Рис. 9 – Розподіли пластичних деформацій (а), напружень (б) і показника напруженого стану(в) вздовж горизонтальної діагоналі квадрата при відповідних значеннях відносного проникнення ножів

80...200 м має місце більша стабілізація кута нахилу дотичної ножа та розмірів осередку розрізання і, як наслідок, більш рівномірний розподіл сили розрізання по ходу процесу, а її зниження становить 25...30%.

змінному зазорі між ножами і кінематиці руху системи встановлено, що збільшення радіусу дуги ножа сприяє зменшенню сили на початку розрізання і одночасному її збільшенню в кінцевій фазі (рис. 10,а).

На рис. 10,б показано, що для дослідженої конструкції ножиць за умови розрізання листів максимальною товщиною 50 мм при радіусі дуги ножа в діапазоні

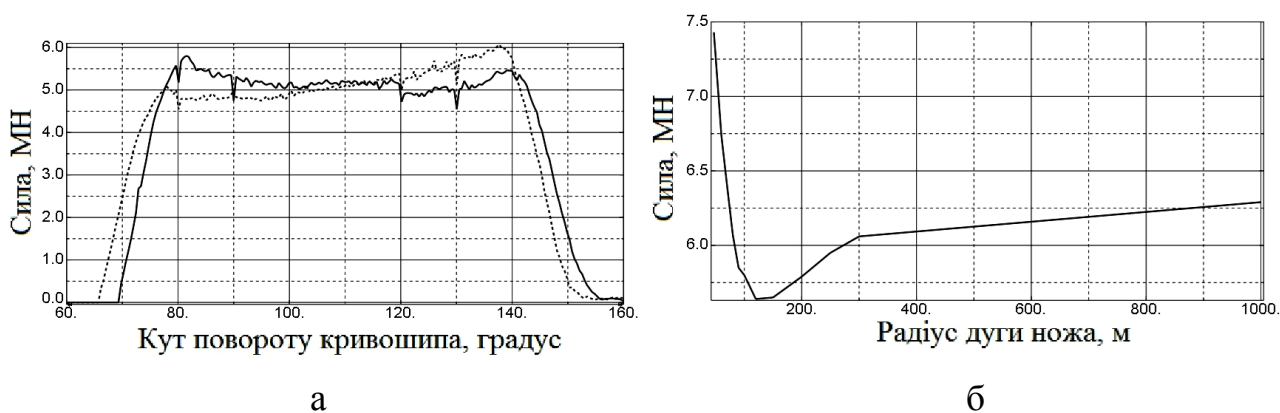


Рис. 10 – Вплив радіусу дуги ножа на силу розрізання: а – характерні залежності сили розрізання при радіусі 80 м (—) і 200 м (---) дуги ножа; б – залежність максимальної сили розрізання від радіуса дуги ножа

Математичне моделювання НДС металу і основних показників якості при розрізанні профілів зі складною формою поперечного перерізу складалось з процесу розділення круглого профілю ножами різної форми і наступного аналізу НДС металу при розрізанні кутика та швелера.

Матеріал досліджуваних зразків профілів – алюмінієвий сплав АА6066 з механічними властивостями: $\sigma_{0,2} = 360$ МПа, $\sigma_b = 395$ МПа, $\delta = 0,18$.

Для круглого профілю мінімальне значення сили розрізання має місце на паралельних ножах, а її збільшення для інших форм не перевищило 7%. Розрахункові і експериментальні залежності сили показали коефіцієнт кореляції на

рівні 0,927...0,962 при розрізанні фасонними кутовими, 0,932...0,973 паралельними і 0,856...0,966 фасонними дуговими ножами. Процес поперечного розділення кутика розглядали за двома схемами його розташування I – «вершиною вниз» та II – «вершиною вгору». Результати показали, що обидві схеми, в першому наближенні, практично ідентичні, проте при розділенні кутика по схемі II потрібно до 5% більше часу, що пояснюється зменшенням η з 0,4 до 0,15 та відповідним збільшенням усередненого значення $\bar{\varepsilon}^{pl}$ при повному розділенні перерізу з 1,2 до 1,4.

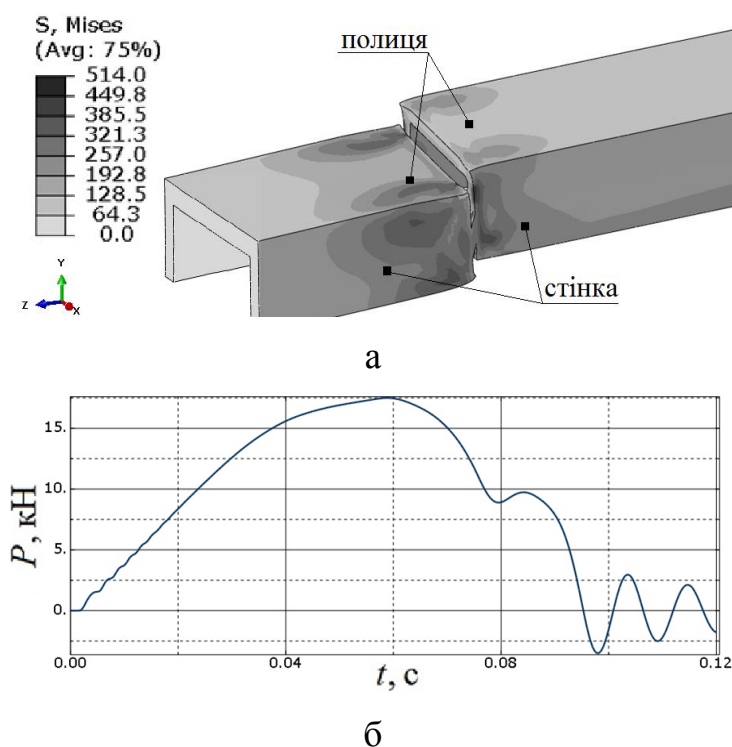


Рис. 11 – НДС швелера перед розділенням стінок (а), а також зміна сили розрізання P в часі t реалізації процесу (б)

від ширини полиці на величину зазору між бічними поверхнями ножа і швелера. Отже по ширині полиці спостерігали суттєві локальні зростання $\bar{\varepsilon}^{pl}$ (до 3,91 рази) з помітним збільшенням ε , при якому відбувається повне розділення. Така ж картина має місце для співвідношень напруження-деформація, бо змінюється відносне проникнення ножів

Проведено аналіз впливу геометричної форми поперечних перерізів різних профілів на силові параметри процесу розділення при однакових значеннях площі поперечного перерізу та розрізанні відповідними профільованими ножами. Зокрема моделювали процес розділення квадрата, круга, кутика рівнобокого та швелера. Результати показали, що в переважній більшості випадків сила розрізання менша (для швелера на 18,9%) за силу розрізання квадрату паралельними ножами, проте розрізання квадрату по діагоналі фасонними ножами дає збільшення сили на 7%. Зазначене свідчить про необхідність уточнення методики з визначення сили розрізання для кожного окремого профіля.

В процесі розділення швелера руйнування полки відбувається раніше, ніж стінок, оскільки, потребує меншого зміщення ножа (рис. 11).

Детальний розгляд НДС засвідчив, 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 (різниця до 7%). Аналогічні співвідношення мають напруження-деформація.

Картина на полиці швелера пояснюється двома причинами. Перше, полиця нерозривно пов'язана зі стінками і, друге, ширина нижнього ножа менша

П'ятий розділ присвячений розвитку методів математичного моделювання і основних показників якості при реалізації процесів поздовжнього розрізання листового металопрокату.

Зокрема виконували моделювали НДС металу при поздовжньому розрізанні товстих листів в гарячому стані. Встановлено, що сила зовнішнього опору в момент захоплення листа ножами має яскраво виражений негативний сплеск, що пояснюється стиканням рухомого розкату з ножами і падінням швидкості його руху. Надалі зовнішній вплив на систему припиняється, і швидкість стабілізується на величині меншій ($\approx 5...7\%$), ніж окружна швидкість ножів. При зростанні сили зовнішнього опору швидкість знижується до повної зупинки.

Зростання сили зовнішнього опору практично не впливає на радіальну силу, але призводить до зростання крутних моментів на ножах, при цьому більш інтенсивним є збільшення моменту на верхньому ножі, котрий загалом є недовантаженим. 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.

Моделювання НДС металу при поздовжньому розрізанні товстих листів в холодному стані містило дослідження двопарних кромкообрізних дискових ножиць та здвоєних кромкообрізних з дуговим ножем (з перекочуванням ножа).

В першому випадку, для визначення граничних навантажень процес був розділений на два етапи, коли лист рухався вільно до настання сталого стану процесу, а потім на торцеву поверхню листа накладали силу зовнішнього опору, протилежну за напрямом руху і лінійно зростаючу у часі.

Загальна картина подібна до умов гарячого розрізання. Проте при порівнянні умов розрізання металу співвідношення моментів між верхнім і нижнім ножами в сталому стані для холодного металу становить 0,4...0,45, а в гарячому – 0,6...0,65. Цю відмінність можна пояснити як різними значеннями коефіцієнту тертя, так і різними налаштуваннями ножиць при реалізації процесу.

Стала швидкість листа в ножах майже збігається в умовах гарячого і холодного розрізання і становить 0,9...0,95 окружної швидкості диска.

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, розглядали на здвоєних кромкообрізних ножицях стану 2800. При моделюванні в якості розрізуваного матеріалу були розглянуті чотири марки сталі 45, 75, 28X3CHMBFA і 18X2H4BA.

Отримані результати показали, що при визначенні граничної товщини розрізуваного металу на ножицях, необхідно мати уточнені математичні моделі розрахунку ε_n , оскільки від нього залежить розмір осередку різання, а відповідно й значення сили розрізання.

Математичне моделювання поздовжнього розрізання тонких листів і смуг розглядали на прикладі багатодискових ножиць конструкції ПрАТ «НКМЗ», які

розпускають смуги на більш вузькі і обрізають бічні кромки при товщині листів і смуг 3...12 мм, ширині 700...1850 мм, з $\sigma_b = 650$ МПа і $\sigma_{0,2} = 400$ МПа. Максимальна кількість осередків розділення при товщині 12 мм становить 4, а при товщині 3 мм – 20. Діаметр дискових ножів – 650 мм.

Послідовність встановлення ножів на валах, дозволяє реалізувати дві схеми: I – ножі встановлюються попарно, що призводить до почергового відгину відрізуваних смуг; II – ножі встановлюються у шаховому порядку для виходу смуг з ножів в одній площині, але з поворотом відносно поздовжньої осі.

В умовах максимальної кількості осередків розділення схема II розпуску смуг на дискових ножицях, з точки зору навантаження на ножиці, є менш прийнятною, оскільки потребує додаткових енерговитрат на скручування смуги в поперечній площині, котрі зростають зі зменшенням її товщини, оскільки збільшуються кут повороту і максимально можлива кількість смуг на виході. Так при товщині 3 мм, в порівнянні зі схемою I, мають місце зростання сили розрізання на 70% та моменту на 28%, а при товщині 12 мм – 7% і 8,6% відповідно, а отже можна стверджувати, 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.

Шостий розділ містить результати експериментальних досліджень процесів розділення листового і сортового металопродукату.

Експериментальні дослідження процесу поперечного розрізання паралельними ножами проводили на трьох різних експериментальних установках для розширення діапазону досліджуваних параметрів і вирішували задачу оцінювання адекватності розроблених СЕ моделей шляхом співставлення та оцінки ступеня збіжності кривих сили розрізання, отриманих експериментально та за результатами математичного моделювання.

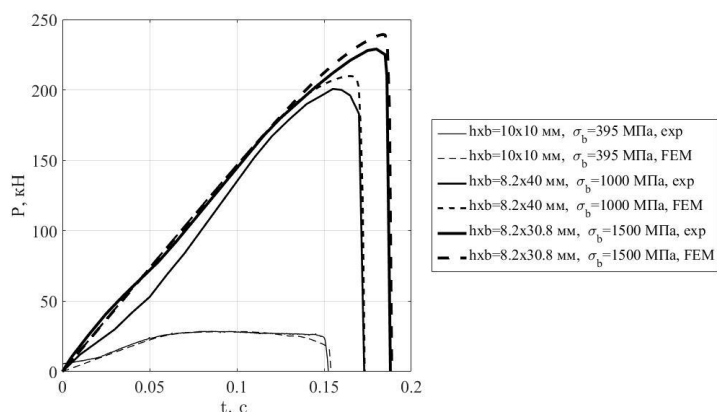


Рис. 12 – Порівняння експериментальних залежностей (exp) сили розрізання в часі t з моделюванням МСЕ (FEM) при розрізанні заготовок перерізом $h \times b$ з σ_b

Коефіцієнти кореляції між експериментальними і змодельованими кривими сили розрізання склали 0,874...0,994, а похибка менше 7% (рис. 12), а їх характер залежить від конструкції ножиць, бо на стадії вминання (див. рис. 4) інтенсивність зростання сили в часі залежить від жорсткості станини ножиць. Так при розрізанні заготовки перерізом 10×10 мм (див. рис. 12), з метою підвищення чутливості аналого-

цифрового перетворювача, встановлювали месдозу жорсткістю, меншою в ≈ 4 рази.

Послідовне встановлення месدوزи в ланцюг жорсткості ножиць призвело до зменшення еквівалентної жорсткості, про що свідчить кут нахилу ділянки сили розрізання на етапі вмінання. 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.

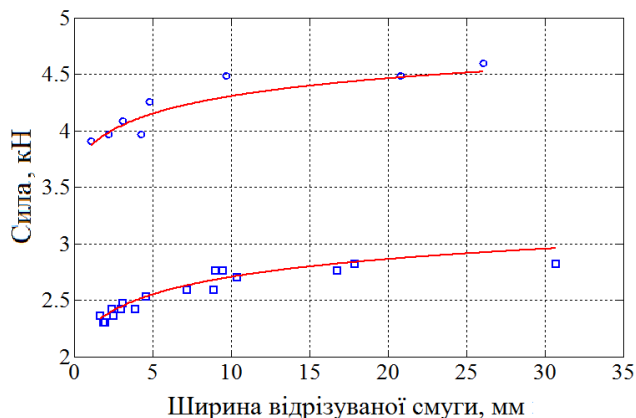


Рис. 13 – Порівняння експериментальних даних і результатів моделювання МСЕ за максимальним значенням сили розрізання в залежності від ширини відрізуваної смуги на прикладі розрізання заготовок з алюмінієвого сплаву Д16Т (AA2024-T3) (□) і сталі ВСт2кп (о) при куті нахилу ножа 5°

"НКМЗ" (м. Краматорськ, Україна) з метою вивчення факторів впливу на дефект у вигляді «галочки» (або «будиночок»), який формується на відрізуваній частині, що розташована під шевронним ножом. В ході експерименту від пластин відрізували смуги, використовуючи ножі двох типів (рис. 14).

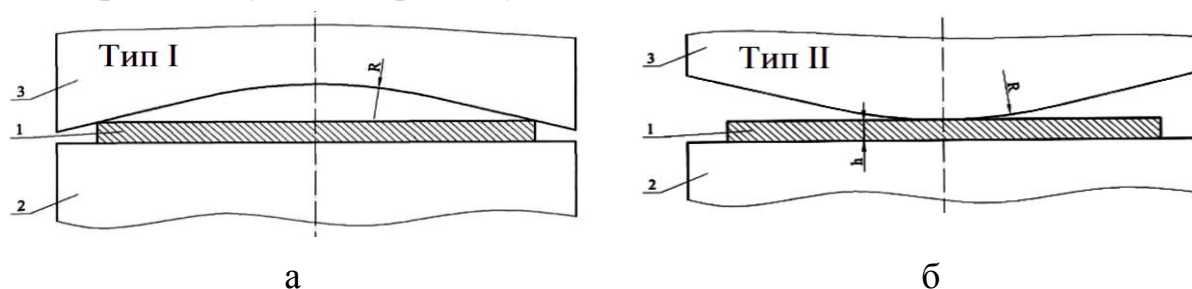


Рис. 14 – Конфігурації виконання експериментальних ножів

На рис. 15 представлено загальний вигляд смуг товщиною 5 мм, відрізуваних ножами I і II типів з кутом нахилу різальних кромки 3° без заокруглення. Як можна бачити, застосування шевронного ножа II-го типу (V-шеvronний ніж),

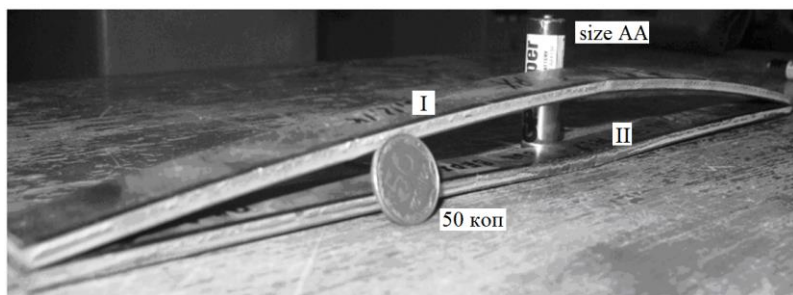


Рис. 15 – Загальний вигляд відрізаних смуг на прикладі пластин товщиною 5 мм, порізаних ножами I і II типів з кутом нахилу різальних кромки 3° без округлення

тя наче стискається з боків, а при II 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,б) отримаємо $\bar{\varepsilon}_{fI}^{pl} > \bar{\varepsilon}_{fII}^{pl}$, тобто для руйнування потрібна більша пластична деформація.

Для оцінки адекватності СЕ моделей процесів гарячого розділення квадратної і круглої заготовок була проведена серія лабораторних дослідів на експериментальних установках. Зокрема вимірювали сили розрізання і досліджували питання геометрії формоутворення поверхні зрізу заготовок круглого та квадратного поперечного перерізу при розрізанні фасонними та паралельними ножами заготовок зі свинцю. Також здійснювали розрізання квадратних зразків зі сталей А36 і 28Х3СНМВФА при температурі 800°C. Коефіцієнт кореляції експериментальних даних з результатами симуляцій МСЕ становив понад 0,88.

При розрізанні фасонних профілів в холодному стані використовували спеціально профільовані ножі, що дозволило здійснювати розділення заготовок в різних положеннях.

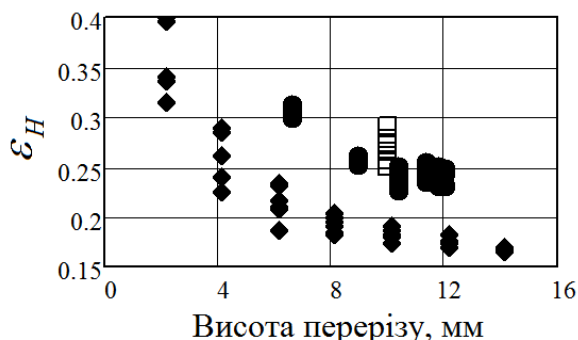


Рис. 16 – Експериментальні значення відносного проникнення до сколювання по перерізу заготовок при розділенні квадратної заготовки паралельними (□) і кутовими (♦) ножами, а також круглої (●) заготовки дуговими ножами

дозволяє істотно (на 60...85%) знизити залишковий прогин смуги, проте має місце збільшення сили розрізання до 10%. Такий ефект досягається за рахунок різних η , оскільки при використанні ножів I типу розрізання листа відбувається від його країв до центру тобто відрізувана частина за рахунок сил тер-

З метою оцінки адекватності розроблених СЕ моделей на предмет моделювання геометрії формоутворення, в зоні розрізання та прилеглих до неї, здійснювали розділення квадратного і круглого профілю ножами різної форми. Отримані результати показали високий ступінь збіжності експериментальних та змодельованих даних, а коефіцієнт кореляції склав 0,856...0,978.

Також проводили аналіз поверхні зрізу з метою оцінки впливу на ε_H висоти перерізу металу та НДС в осередку розрізання ножами різної конфігурації. Встановлено (рис. 16), що значення ε_H збільшується при зменшенні висоти ви-

хідного перерізу, а також залежить від кута нахилу твірної ножа до горизонталі. Крім того, можна відзначити нелінійний характер впливу, що було враховано при регресійному аналізі відносного проникнення до сколювання в розділі 7.

В ході дослідження кінематичних і енергосилових параметрів процесу подовжнього розрізання дисковими ножами в гарячому стані різали пластини товщиною 8, 10 і 12 мм зі сплаву свинцю з сурмою. Результати підтвердили, що зниження швидкості руху відбувається зі збільшенням співвідношення моментів верхнього та нижнього ножів, тобто зі збільшенням сил зовнішнього опору.

Також було встановлено при розрізанні товстолистових розкатів в гарячому стані, що рівень подавального рольганга повинен виключати можливість твірній верхнього ножа першою контактувати з розкатом. А за умови одночасного контакту розкату з ножами при діаметрі 250 мм і рекомендованій максимальній товщині пластин 12 мм, гранична товщина розрізання склала 22 мм. Таким чином, можна зробити висновок, що за умови можливості регулювання рівня подавального рольгангу підвищити надійність захоплювання прокату дисковими ножами та збільшити товщину розрізуваних листів.

При дослідженні кінематичних і енергосилових параметрів процесу подовжнього розрізання дисковими ножами в холодному стані реалізація процесу здійснювалася дисковими ножами діаметром 155 мм з кутовою швидкістю $0,538 \text{ c}^{-1}$. При цьому різали смуги з алюмінієвого сплаву Д16Т (AA2024-T3) товщиною 2 мм і сталі ВСт2кп товщиною 1 мм.

Були реалізовані дві схеми розділення: I – аналог процесу обрізання кромки товстих листів і смуг (зі «зваленим» на 9° верхнім ножем); II – процес розпуску смуг на смуги меншої ширини (симетричне розташування ножів).

За схемою I експериментальна реалізація дозволила встановити, що: при збільшенні сили зовнішнього опору до критичного значення (20...25% сили розрізання), при якому смуга вже не втягується ножами, сила розрізання збільшується до 10%, тоді як момент на верхньому ножі – в 2...3 рази; після досягнення силою зовнішнього опору значень 30...40% її критичного значення, подальше її зростання призводить до інтенсивного зниження швидкості руху смуги аж до повної зупинки. А за схемою II, при розрізанні тих же зразків сила і сумарний момент розрізання залишалися на однаковому рівні, а моменти між верхнім і нижнім диском розподілялися більш рівномірно з поперемінним перевищенням одного над іншим. Проте за схемою I середня суга виходила прямою після різання і деформувалися лише кромки, котрі загиналися донизу, а за схемою II деформацію спостерігали як середньої так і крайніх частин смуги. Таким чином можна стверджувати, що більший момент спостерігається на ножі, який контактує з частиною яка менше деформується, бо саме він виконує функцію втягування.

Також виконували експериментальні дослідження процесу обрізання кромки на ножицях з перекочуванням дугового ножа, які здійснювали з перекриттям ножів 0,5 мм і 0,1 мм, що відповідає кутам розрізання $8,885^\circ$ і $7,607^\circ$. За результатами були отримані момент розрізання, а також форма відрізаних кромки, котрі добре корелюють з результатами СЕ моделювання.

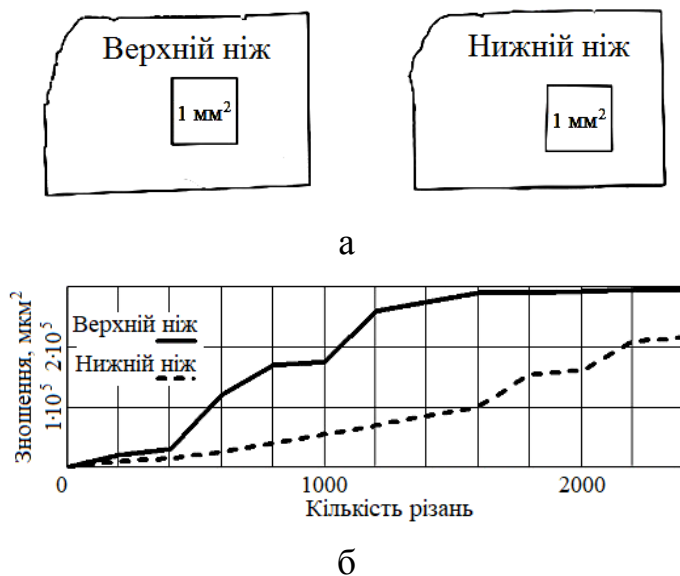


Рис. 17 – Скановані зображення різальних кромок ножів (а) після 2400 різань та динаміка зношування (б) при розрізанні матеріалу з $\sigma_b = 1500$ МПа, ножами зі сталі 6XB2С з міцністю 60 HRC

сталі конструкційної високоміцної високолегованої 28X3СНМВФА (СП28; ЕП326А) в двох станах – після прокатки з границею міцності $\sigma_b = 1000$ МПа і термозміцненому – $\sigma_b = 1500$ МПа.

Кожні 200 різань робили гіпсові відбитки різальної кромки з наступним скануванням та обробкою графоаналітичним методом. Приклад зображення різальних кромок ножів після 2400 розрізань представлено на рис. 17,а, а на рис. 17,б величина зношування різальних кромок ножів від кількості розрізань.

В умовах дослідження встановлено, що максимально допустима величина зношення різальних кромок ножів, при якій на поверхні зрізу утворюються задирки, для верхнього ножа склала $0,3 \text{ мм}^2$, 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, тобто подальша експлуатація ножів є недоцільною і відповідно дані значення коефіцієнтів можна вважати максимальними і застосовувати при розрахунку максимальних навантажень з урахуванням уточнених методик розрахунку опору розрізанню.

Загалом експериментальні дослідження дозволили встановити високий ступінь адекватності результатів СЕ моделювання, а також уточнити ряд важливих факторів для підвищення точності розрахунків при проектуванні обладнання розділових операцій на ножицях.

Сьомий розділ присвячено автоматизованому проектуванню та розробці практичних рекомендацій щодо вдосконалення технологічних режимів та обладнання для реалізації процесів поперечного і поздовжнього розрізання листового і сортового металопродукату

Додатково було проведено експериментальні дослідження стійкості інструменту на прикладі розрізання високоміцних сталей з метою встановлення впливу зношування ножів на силу та якість розрізання, оскільки його досить складно оцінити моделюванням МСЕ, а врахування коефіцієнтів збільшення сили розрізання через знос різальних кромки і збільшення бічного зазору є необхідним при проектуванні ножиць. В умовах експерименту ножі були виготовлені зі сталі 6XB2С в двох варіантах термообробки, які дозволили забезпечити твердість 56 и 60 HRC відповідно. В якості розрізуваного матеріалу використовували смуги товщиною 8 мм, виготовлені зі

Через аналіз НДС результатів двовимірного скінченно-елементного моделювання та експериментальних даних процесу паралельними ножами в гарячому стані розроблена методика та програмні засоби визначення опору гарячого розрізання, що дозволяє врахувати вплив змін хімічного складу розрізуваних сталей та швидкості розрізання на силові характеристики процесів. Зокрема порівняння експериментальних даних максимального значення питомого опору з розрахунковими вказує, що розбіжність не перевищує 9%, а відхилення від МСЕ – 4%. Отже розроблена методика дозволяє поліпшити точність розрахунку опору гарячого розрізання і сприяє підвищенню наукової обґрунтованості при прийнятті проектно-конструкторських рішень.

Загалом результати розрахунків при варіюванні хімічного складу між мінімальним і максимальним вмістом елементів в межах, регламентованих стандартами, швидкості руху ножа 25...500 мм/с, товщини розрізуваних заготовок 10...50 мм свідчать, що відхилення по максимальній силі розрізання в даному діапазоні параметрів не перевищила 6,5%.

Стосовно холодного розрізання паралельними ножами отримано регресійну модель розрахунку відносного проникнення до сколювання, шляхом симуляцій МСЕ з реалізацією повного факторного експерименту 2^5 (табл. 1).

За умови, встановленого раніше нелінійного впливу, використовували лінеаризацію через застосування показників ступеня факторів (див. табл. 1), через функцію переходу до кодованих значень факторів:

Табл. 1 – Параметри переходу до кодованих значень факторів планованого експерименту

Фактор та його позначення	σ_b	h	V/h	δ	$\sigma_{0,2}/\sigma_b$
	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5
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

$$x_i = \left(X_i^{n_i} - \left[\max(X_i^{n_i}) + \min(X_i^{n_i}) \right] / 2 \right) / \left(\left[\max(X_i^{n_i}) - \min(X_i^{n_i}) \right] / 2 \right). \quad (7)$$

Рівняння регресійної моделі відносного проникнення до сколювання при холодному розрізанні паралельними ножами, що дозволяє оцінювати лінійні ефекти спільно з ефектами всіх можливих взаємодій має вигляд:

$$\begin{aligned} \varepsilon_H = & b_0 + \sum b_i x_i + \sum b_{ij} x_i x_j + \sum b_{ijk} x_i x_j x_k + \\ & + \sum b_{ijklm} x_i x_j x_k x_m + b_{ijkln} x_i x_j x_k x_m x_n, \end{aligned} \quad (8)$$

де $b_0, b_i, b_{ij}, b_{ijk}, b_{ijklm}, b_{ijkln}$ – коефіцієнти, значення яких при відповідних комбінаціях параметрів наведені в таблиці 2.

Табл. 2 – Коефіцієнти до рівняння регресії при кодovаних значеннях факторів (див. рівняння (7))

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. 18 представлені ефекти частинного впливу кожного з факторів на величину ε_H в центрі плану, коли кодovані значення інших факторів дорівнюють 0. Відхилення від прогнозних показників становить в межах $\pm 5\%$.

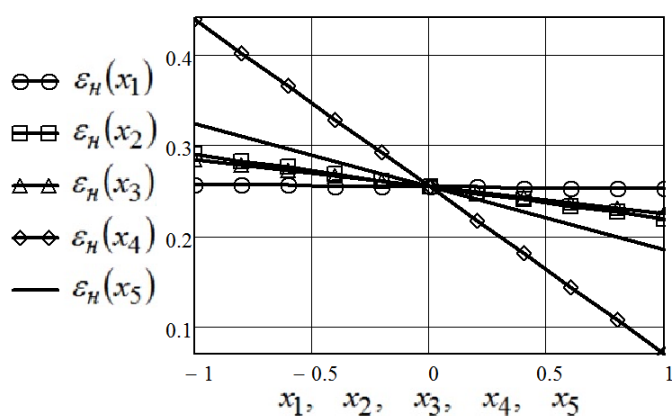


Рис. 18 – Ефекти частинного впливу факторів на ε_H в центрі плану

Для оцінки впливу геометрії шевронного ножа і механічних властивостей матеріалів був розроблений план і отримані результати моделювання процесу розрізання шевронним ножом листів товщиною 5...25 мм і шириною 2000 мм. При цьому варіювали два параметри: границя міцності матеріалу $\sigma_b = 330...1000$ МПа і кут нахилу ножів $\alpha = 1...3^\circ$.

Для істотного зниження, а можливо і повного усунення дефекту залишкової деформації (у вигляді «галочка» або «будиночок») можна передбачити в конструкції ножиць механізм регулювання кута нахилу шевронних ножів, з налаштуванням за формулою:

$$\alpha_{\min} = \begin{cases} \left[9,36 \cdot 10^{-4} h \sigma_b^{0,892} / P_{\max} \right]^{1/(0,093 \ln(\sigma_b) + 0,34)} & \text{при } P_{\max} < 9,36 \cdot 10^{-4} h \sigma_b^{0,892}; \\ 1^\circ & \text{при } P_{\max} \geq 9,36 \cdot 10^{-4} h \sigma_b^{0,892}, \end{cases} \quad (9)$$

де P_{\max} – максимально допустиме значення сили розрізання для ножиць, що конструюються або удосконалюються.

Визначення оптимальної форми профілювання фасонного ножа для поділу квадратної заготовки в гарячому стані здійснювали на базі МСЕ з використанням повного факторного експерименту 2^4 . За результатами були розраховані відносні параметри форми, що характеризують зминання і загин кінців заготов-

ки k_b і k_e та ромбічність k_d торцевої поверхні й були отримані лінійні регресійні рівняння як функція 4-х параметрів: температури T ; розміру квадрату h ; кута розкриття ножів α трикутної форми та ухилу β їх контактних поверхонь.

Для вирішення задачі пошуку оптимальних значень α та β використовували метод узагальненого приведенного градієнта шляхом використання надбудови «Пошук рішення» в Excel.

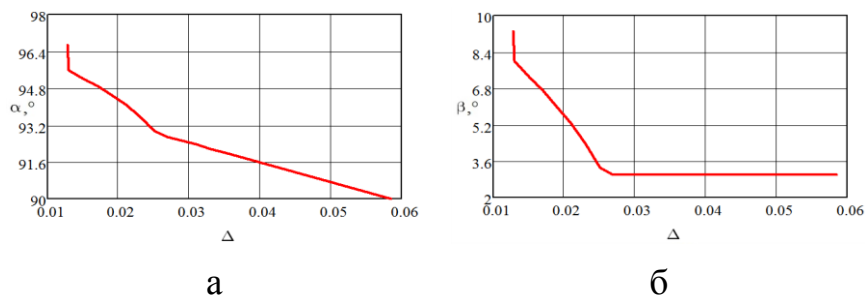


Рис. 19 – Залежності оптимальних значень кутів α (а) та β (б) профілювання ножів від граничного відхилення зминання і загину кінців Δ

довиди «Пошук рішення» в Excel. За результатами були отримані значень кутів α (рис. 19, а) та β (рис. 19, б) профілювання ножів в залежності від граничного відхилення зминання і загибу кінців Δ , котре має суттєвий вплив на оптимальне рішення.

Вочевидь, за умови мінімізації граничного відхилення зминання і загибу кінців Δ за даних умов, оптимальними значеннями 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.

Стосовно процесу поздовжнього розрізання листового металопрокату отримана умова захоплювання дисковими ножами:

$$f' > [1 - \cos(\alpha_1 + \alpha_2)] / \sin(\alpha_1 + \alpha_2), \quad (10)$$

де f' – усереднений коефіцієнт тертя-ковзання; α_1 та α_2 – кутові координати точок захоплювання відносно центрів ножів.

Взаємозв'язок кінематичних і енергосилових параметрів реалізації процесу поздовжнього розрізання дисковими ножами дає залежність швидкості руху листа V_d :

$$V_d = \frac{N_1 f_1 + N_2 f_2 [1 - \cos(\gamma_2)(a + bf + cf^2)]}{N_1 f_1 \cos(\gamma_1) + N_2 f_2 \cos(\gamma_2) [1 - (a + bf + cf^2)]} V_o \quad (11)$$

де N_1 і N_2 – відповідно радіальні сили на верхньому і нижньому ножі; f_1 і f_2 – відповідно приведені значення коефіцієнтів тертя; γ_1 і γ_2 – відповідно кути, що визначають напрямки радіальних сил по відношенню до вертикальної осі диска; f – коефіцієнт тертя між ножем і листом; a, b, c – коефіцієнти регресії, які за результатами моделювання, для діапазону коефіцієнта тертя $f = 0,3 \dots 0,55$, склали: $a = 2,76$; $b = -3,44$; $c = 4,69$; V_o – окружна швидкість ножа.

Порівняння результатів моделювання МСЕ із рівнянням (11) показала різницю, що не перевищила 3%, а даний алгоритм є необхідним для синхронізації швидкості машин при комбінуванні процесів поздовжнього розрізання з правкою.

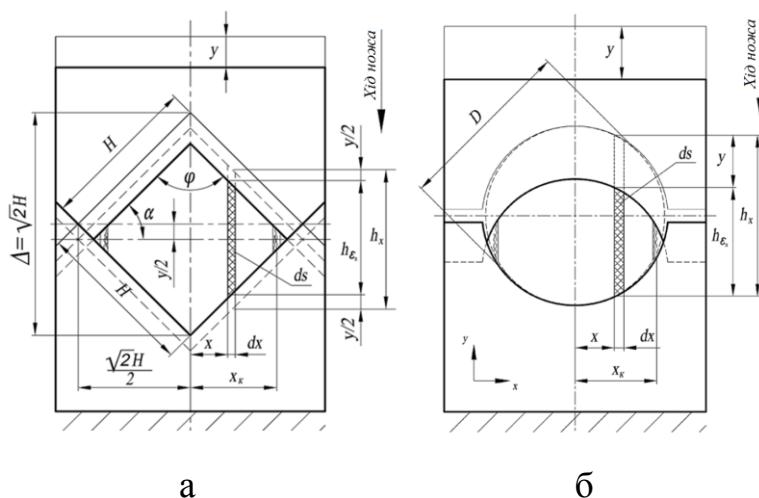


Рис. 20 – Приклади схем до визначення сили розрізання квадратної (а) на кут та круглої (б) заготовки фасонними ножами

елементарного об'єму осередку розрізання (рис. 20), поділеного на ділянки відносно простої форми (прямокутник, трикутник, половина круга, паралелограм і т.ін.). За таких умов можна аналітичними виразами або з використанням чисельних рішень визначити інтегральне значення сили розрізання для даної ділянки в залежності від абсолютного зміщення (зближення) ножів, завдяки відомим значенням опору зрізу τ_ε при відносній глибині проникнення ε в умовах кожного виділеного елементарного об'єму (площею ds) певної ділянки. Таким чином, фактична сила розрізання буде сумою сил всіх виділених ділянок.

При цьому, з огляду на експериментальні дані та результати скінченно-елементного моделювання, була запропонована наступна формула для відносного проникнення ε_{h_x} розрізуваної ділянки перерізу з вихідною висотою h_x :

$$\varepsilon_{h_x}(h_x, \alpha) = 1 - \frac{1 - e^{-A(h_x/h_{\max})^{0,625}}}{1 - e^{-A}} \cdot (1 - \varepsilon_n(\cos \alpha)^2) \quad (12)$$

де A – емпіричний коефіцієнт, який визначається властивостями розрізуваного матеріалу; 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. 20,а), що при розрізанні квадрата паралельними ножами становить $\alpha = 0^\circ$, а фасонними – $\alpha = 45^\circ$.

Дана методика розрахунку, дозволяє отримати залежність сили розрізання при розділенні профілів різного перерізу в функції зближення ножів, зокрема, на прикладі розрізання алюмінієвого сплаву АА6063 ($\sigma_\varepsilon = 390 \text{ МПа}$, $\varepsilon_n = 0,25$),

Отримала розвиток методика розрахунку силових параметрів процесу розділення фасонних профілів на ножицях, в основу якої була покладена одновимірна математична модель 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

розроблена методика має найменшу похибку (до 10%) в порівнянні з експериментальними даними.

Стосовно процесу поперечного розрізання листів шевронними ножами, для вдосконалення процесу розроблено конструкцію шевронного ножа з регульованим кутом похилих поверхонь (рис. 21,а). Слід зазначити, що в кінематичній схемі двокривошипного механізму обидва кривошипи є приводними. За результатами кінематичного аналізу даного механізму було розроблено алгоритм визначення кута нахилу різальних поверхонь від повороту кривошипів та розробити конструкцію шевронного ножа з регульованим кутом нахилу різальних площин (рис. 21,б).

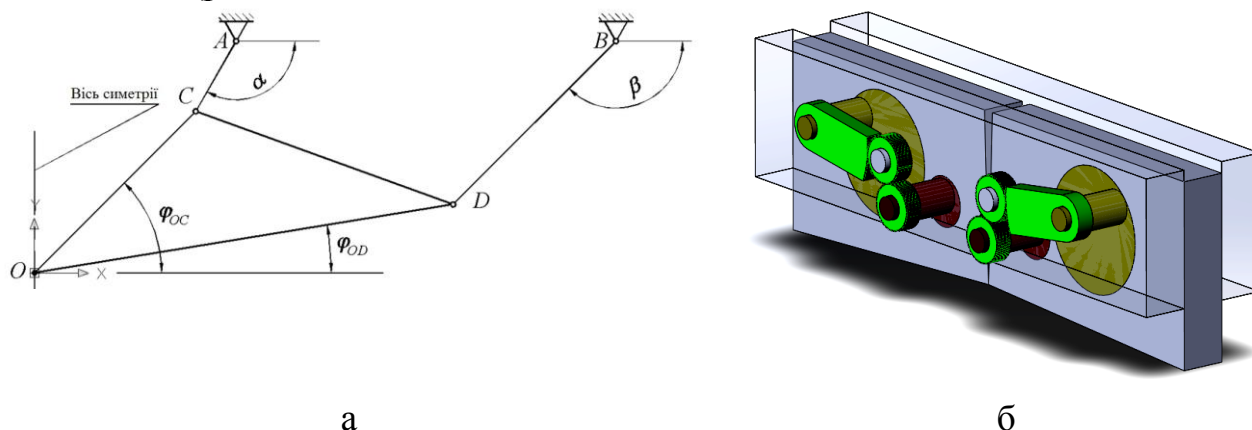


Рис. 21 – Кінематична схема (а) механізму регулювання та конструктивне виконання (б) шевронного ножа з регульованим кутом нахилу різальних площин

Крім того, досить ефективним є рішення, спрямоване на підвищення якості розрізання комплектом V-шеvronних ножів (див. рис. 14,б) для поперечного розрізання листового матеріалу. Результати показують, що при рівних 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.

Технічне завдання вдосконалення процесу поздовжнього розрізання товстих листів дисковими ножами щодо розширення сортаменту розрізуваних листів може бути вирішене за рахунок конструкції дискових ножиць багатостадійного обрізання бічних кромки, що дозволить проводити розрізання в кілька стадій, при цьому кількість стадій визначається товщиною листа, який ріжеться, і енергосиловими параметрами процесу.

Також, з урахуванням сучасних тенденцій розвитку обладнання, були запропоновані схеми поєднання процесів правлення і подовжнього розрізання товстолистового металопрокату на дискових ножицях, що сприятиме підвищенню якості готового листа за рахунок обмеження його свободи в горизонтальній площині та дозволить виключити можливість появи викривлення кромки.

Ефективність технічних рішень підтверджується практичними результатами та актами використання результатів дисертаційної роботи.

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 розрізання 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 скінченних 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 кромки 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 кромки 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 підвищення 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 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.
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.
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
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.
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.
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
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.
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.
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.

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.*
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.*
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.*
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.*
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.*
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.*
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.*
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.*
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.*
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.*
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.*
22. Боровик П. В. Анализ условий захвата толстолистового 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.*

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.

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.

25. 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.

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 "ХП" : Нові рішення в сучасних технологіях, – Харьков, 2013, – №43 (1016). – С. 41-46. – ISSN 2079-5459.

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.

28. Боровик П. В. Метод построения кривых сопротивления резке в процессе горячего разделения металла на ножницах / П. В. Боровик // Metallurgicheskaya i gornorudnaya promyshlennost'. – 2014. – № 2 (287). – С.25-29. – ISSN 0543-5749.

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.

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.

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.

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.

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.

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.

35. Ульяницкий В. Н. Экспериментальная оценка стойкости инструмента при резке высокопрочных сталей / В. Н. Ульяницкий, П. В. Боровик, М. Е. Селезнёв // Обработка материалов давлением. – 2015. – № 1(40). – С. 227-230. – ISSN 2076-2151.

36. Боровик П. В. Трёхмерная модель процесса продольной резки на сдвоенных кромкообрезных ножницах с катящимся резом / 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". – 2015. – № 47 (1166). – С. 15-20.

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.

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.

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.

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

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.

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.

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 – Донецк, – 2011, – 2(24) – С. 5-9. – ISSN 1816-1200.

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. – 54. Пат. Україна № 63571, 72820, 87339, 90094, 90095, 104285, 122009, 122024.

Особистий внесок автора в роботах, які опубліковані в співавторстві:

[1,4,6,26,27,35,38,40,44] – обґрунтування та розробка скінченно-елементної моделі досліджуваного процесу; [1,6] – аналіз функціонального зв'язку опору розрізанню з напруженням безпосередньо в зоні розрізання; [2] – аналіз технологічних можливостей реалізації розділових операцій в гарячому стані в товстолистовому виробництві; [3,14,18,19,21,22,25,27,37,38,40] – постановка задачі та аналіз результатів досліджуваного процесу розділення; [3,12,19,21,22,25,39] – розробка технологічних та конструктивних схем досліджуваного процесу розділення; [4,18,25,44] – обґрунтування моделі механічних властивостей матеріалу; [5,8,14,36,37] – розробка плану та методики проведення досліджень; [5] – дослідження впливу форми ножів на енергосилові параметри розділення гарячих квадратних заготовок; [8] – дослідження впливу форми ножів на розділення квадратних та круглих профілів в гарячому стані; [33] – розробка математичних моделей та програмних засобів процесу поперечного розрізання фасонних профілів; [36] – аналіз впливу зношення ножів на силу та якість розрізання; [47-52] – формування основних ідей корисних моделей, теоретичне обґрунтування та експериментальне підтвердження їх ефективності.

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 ін-

женерія). – Донбаська державна машинобудівна академія, Міністерство освіти і науки України, Краматорськ, 2021.

Дисертація спрямована на вирішення актуальної науково-практичної проблеми поліпшення техніко-економічних показників процесів 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.

Аналітичний огляд дозволив виявити шляхи та напрями подальшого розвитку розділових операцій та обладнання, шляхом уточнення опору зрізу, поліпшення технологічних режимів та інструментів, підвищення якості на основі аналізу даних експериментів та моделювання методом скінченних елементів.

Встановлені типи скінченних елементів, правила контролю розмірів сітки в зоні розділення, процес формування та зростання тріщини, вплив жорсткості ножиць та термодинамічних процесів. Розроблені моделі механічних властивостей гарячого та холодного матеріалу, а також відносного проникнення до сколювання при холодному розрізанні.

Визначено вплив геометрії різальних інструментів на силу та якість розрізання шевронними ножами листового прокату та фасонними ножами квадратної заготовки. Встановлено вплив сил опору на швидкість листа в дискових ножах, що дозволяє розробляти технологічні схеми суміщення процесів розрізання і правлення.

Розширено уявлення щодо процесів розділення. Розроблені, вдосконалені та доповнені методики і програмні засоби розрахунку, а також заходи щодо розширення сортаменту та підвищення якості металопрокату операцій розрізання.

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 the current scientific and practical problem of improving technical and economic indicators of metal separation processes based on the development of scientific and practical bases of application of the finite element method to solve combined problems of elasticity, plasticity and fracture taking into account changing process conditions.

Analytical review revealed ways and directions of further development of separation operations and equipment, by high accuracy of computation the shear

resistance, improving technological modes and tools, improving quality based on the analysis of experimental data and finite element simulation.

The types of finite elements, the rules of mesh size control in the separation zone, the process of crack formation and growth, the influence of shears stiffness and thermodynamic processes are established. Models of mechanical properties of hot and cold material, and also relative penetration to fracture at cold shearing are developed.

The influence of the geometry of shearing tools on the force and quality of cutting with chevron knives of sheet metal and shaped knives of square billet is determined. The sheet speed in the disc knives is determined, which allows to develop technological schemes for combining shearing and straightening processes.

The understanding of separation processes is expanded. Developed, improved and supplemented methods and calculating software, as well as measures to expand the range and improve the quality of metal rolling shearing operations.

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

АННОТАЦИЯ

Боровик П.В. Развитие теоретических основ и совершенствование технологии и оборудования процессов операций разделения в прокатном производстве. – Квалификационная научная работа на правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.03.05 – Процессы и машины обработки давлением (13 - Механическая инженерия). – Донбасская государственная машиностроительная академия, Министерство образования и науки Украины, Краматорск, 2021.

Диссертация направлена на решение важной научно-технической проблемы улучшения технико-экономических показателей процессов продольного и поперечного разделения листового и сортового металлопроката за счет повышения их энергоэффективности и качества готовых изделий, на основе развития научных и практических основ применения метода конечных элементов для решения комбинированных задач теорий упругости, пластичности и разрушения с учетом меняющихся условий протекания процесса.

На основе аналитического обзора выявлены пути и направления дальнейшего развития разделительных операций и совершенствование оборудования, за счет разработки новых алгоритмов расчета сопротивления срезу, улучшения технологических режимов и инструментов, повышения основных показателей качества на основе применения анализа экспериментальных данных и моделирования методом конечных элементов.

В работе установлены практически-научные условия применения метода конечных элементов для решения комбинированных задач разделения для плоских и объемных моделей. Проанализированы типы конечных элементов, правила контроля размеров сетки в зоне разделения, процесс формирования и роста трещины в пластическом материале с изотропным упрочнением, упругие

характеристики конструкций ножниц, а также термодинамические эффекты в материале при разделении, что способствовало обобщению математических моделей для условий горячего и холодного разделения. Разработан алгоритм получения и обработки числовых данных, который позволяет оперировать, как локальными данными о выделенных элементах или группах элементов, так и их обобщенными значениями.

Предложены модели механических свойств материала, как в горячем так и в холодном состояниях, позволяющие для горячего металла учитывать химический состав, температуру, степень и скорость деформации разрезаемых стали, тогда как в холодном состоянии – предел прочности и текучести материала при растяжении и относительное удлинение после разрыва, а также скорость деформации.

Установлена скорость листа в условиях установившегося процесса резки на дисковых ножницах, что позволяет разрабатывать технологические схемы производства толстых листов с совмещением процессов резки и правки.

Установлены факторы, влияющие на относительное внедрение до скола при холодной резке и разработана модель расчета относительного внедрения до скола при холодной резке, как функция предела прочности материала при растяжении; высоты сечения; отношения скорости движения ножа к высоте сечения; относительное удлинение после разрыва; отношение предела текучести к пределу прочности материала при растяжении.

На основе анализа конечно-элементных моделей и экспериментальных данных определено влияние на энергосиловые параметры и показатели качества резки геометрических параметров шевронных ножей для резки листового проката и фасонных ножей для резки квадратной заготовки.

Расширено представление о закономерностях процессов разделения, что позволило разработать, усовершенствовать и дополнить методики и программные средства расчета энергосиловых параметров процессов разделения: поперечного параллельными ножами в горячем состоянии; поперечного фасонными ножами сортовых профилей в горячем и холодном состоянии; продольного и поперечного дугowymi ножами в холодном состоянии; продольного дисковыми ножами в горячем и холодном состоянии; поперечного шевронными ножами в холодном состоянии.

Разработаны и запатентованы конструкция и способы установки дисковых ножниц толстолистового проката, конструкции шевронного ножа с округлением в вершине восхождения режущих плоскостей и с регулируемым углом наклона режущих кромок, направленные на расширение сортамента и повышение качества металлопроката процессов разделения на ножницах в холодном и горячем состоянии. Результаты работы в виде программных средств, а также технологических и конструктивных рекомендаций переданы в промышленное внедрение, а также используются в учебном процессе студентов.

Ключевые слова: разделительные операции, резка на ножницах, математическое моделирование, метод конечных элементов, модель механических свойств, напряженно-деформированное состояние.