

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
СХІДНОУКРАЇНСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
імені ВОЛОДИМИРА ДАЛЯ

Факультет інженерії
Кафедра машинобудування та прикладної механіки

ВИПУСКНА КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

Магістр

(освітньо-кваліфікаційний рівень)

на тему: «Рационалізація процесів і обладнання на ділянці поперечного
 листопрокатного цеху зі станом 3000»

Студента _____ **II** _____ **курсу** _____ **групи** **МВС-19зм**
напряму підготовки: _____ **133 Галузеве машинобудування**

Есаулов О.М.

(прізвище та ініціали)

(підпис)

Науковий керівник

к.т.н. Боровік П.В.

(вчене звання, науковий ступінь,
прізвище та ініціали)

(підпис)

Завідувач кафедри

проф., д.т.н. Соколов В.І.

(вчене звання, науковий ступінь,
прізвище та ініціали)

(підпис)

Рецензент

(вчене звання, науковий ступінь,
прізвище та ініціали)

(підпис)

Сєверодонецьк – 2021

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
СХІДНОУКРАЇНСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
імені ВОЛОДИМИРА ДАЛЯ

Факультет інженерії

Кафедра «Машинобудування та прикладної механіки»

Освітньо-кваліфікаційний рівень магістр

Напрямок підготовки 133 галузеве машинобудування

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри
д.т.н., проф. Соколов В.І.

« _____ » _____ 2021 року

ЗАВДАННЯ
НА МАГІСТЕРСЬКУ РОБОТУ СТУДЕНТУ

Есаулову Олександрю Михайловичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи «Рационалізація процесів і обладнання на ділянці поперечного
різання листопрокатного цеху зі станом 3000»

керівник роботи Боровік Павло Володимирович, к.т.н., доц.

(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом по університету від «30» листопада 2020 року № 169/15.28

2. Строк подання студентом роботи січень 2021 року

3. Вихідні дані роботи Матеріали практики.

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити)

Анотація. Введення. Розділ 1. Стан питання. постановка мети і задач досліджень.

Розділ 2. Визначення напрямку та методів досліджень. Розділ 3. Дослідження процесів та
та обладнання поперечного різання товстих листів. Розділ 4. Розробка рекомендацій. Виснов-
ки. Література.

5. Перелік графічного матеріалу: Плакати до презентації

6. Консультанти розділів

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв

7. Дата видачі завдання «14» грудня 2020 року

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів бакалаврської роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
	Згідно з календарним планом – графіком, затвердженим кафедрою «Машинобудування та прикладної механіки», що до виконання бакалаврських робіт		

Студент

.....
(підпис)

Есаулов О.М.

.....
(прізвище та ініціали)

Керівник проекту

.....
(підпис)

Боровік П.В.

.....
(прізвище та ініціали)

АНОТАЦІЯ

Есаулов О.М. Магістерська робота на тему: «Раціоналізація процесів і обладнання на ділянці поперечного різання листопрокатного цеху зі станом 3000». Напрямок підготовки «Галузеве машинобудування», Сєвєродонецьк, 2021 р.

Магістерська робота містить 69 стор., 32 рис., 1 таб; складається із введення, чотирьох розділів, висновку та переліку джерел посилання.

Приведена, стисла розробка щодо вдосконалення поперечного різання на листопрокатном цеху станом 3000, технологічних операцій в цілому за умови мінімізації енерговитрат на їх реалізацію, проведення всебічних теоретичних, технічних досліджень процесів поперечного різання листового металопрокату. Проведення експериментальних досліджень процесів поперечного різання листового металопрокату на ножицях з використанням сучасних підходів до постановки експерименту, зниження величини залишкової деформації листа з шевронним ножем при максимальному значенні сили різання, проведення імітаційного моделювання спектра робочих навантажень процесів поперечного різання листового металопрокату. Підбір шевронного ножа зі скругленням для поперечного різання листового металопрокату виходячи з величини допустимого коефіцієнта короткочасного перевантаження.

МЕТАЛУРГІЯ, МЕХАНІЧНЕ ОБЛАДНАННЯ, ПОПЕРЕЧНЕ РІЗАННЯ, ОБЛАДНАННЯ ПОПЕРЕЧНОГО РІЗАННЯ, ПІДВИЩЕННЯ ЯКОСТІ ГОТОВИХ ЛИСТІВ, ДОСЛІДЖЕННЯ ,.

ЗМІСТ

ВВЕДЕННЯ.....	5
РОЗДІЛ 1. СТАН ПИТАННЯ. ПОСТАНОВКА МЕТИ І ЗАДАЧ ДОСЛІДЖЕНЬ..	7
1.1 Технологічні схеми виробництва товстих листів.....	7
1.2 Застосування та вимоги до готових товстих листів.....	12
1.3 Обладнання поперечного різання листів в умовах прокатного цеху	14
1.4 Висновки.....	17
РОЗДІЛ 2. ВИЗНАЧЕННЯ НАПРЯМКУ ТА МЕТОДІВ ДОСЛІДЖЕНЬ	18
2.1 Підвищення якості готових листів як напрямок досліджень в області процесу та обладнання поперечного різання товстих листів.....	18
2.2 Вибір та обґрунтування методів досліджень	19
2.3 Висновки.....	21
РОЗДІЛ 3. ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСІВ ТА ОБЛАДНАННЯ ПОПЕРЕЧНОГО РІЗАННЯ ТОВСТИХ ЛИСТІВ	22
3.1 Аналіз факторів, що впливають на якість та форму готових листів	22
3.2 Аналіз технічних рішень щодо обладнання поперечного різання листів ..	28
3.3 Дослідження обладнання поперечного різання.....	38
3.4 Висновки.....	48
РОЗДІЛ 4. РОЗРОБКА РЕКОМЕНДАЦІЙ.....	49
4.1 Вдосконалення процесів поперечного різання.....	49
4.2 Вдосконалення обладнання поперечного різання.....	55
4.3 Висновки.....	57
5 Висновки	58
Література	59

ВВЕДЕННЯ

Металургійна промисловість України на даному етапі зазнає якісних змін, пов'язаних з особливостями ринку і підвищенням вимог до продукції. Зокрема, спостерігається зростання попиту на листовий і смуговий металопрокат, що призводить до необхідності вдосконалення існуючого та створення нового обладнання, задіяного в його виробництві, з метою збільшення продуктивності та підвищення якості листа. При цьому процес виробництва листового металопрокату, як правило, включає операції поздовжньої і поперечної різання, що застосовуються для отримання листів заданих розмірів. З цією метою на ділянках різання прокатних станів широко використовуються ножиці різних типів, які дозволяють досягти необхідної якості листа при забезпеченні високої продуктивності операцій різання в цілому. Зокрема, для поперечної різання листового металопрокату широко використовуються ножиці з шевронним ножом, проте, практика застосування класичного шевронного ножа показала наявність дефекту у вигляді залишкової деформації готового листа. У свою чергу для обрізки бічних крайок листа і додання йому заданої ширини широко використовуються високопродуктивні дискові ножиці, серед особливостей роботи яких, слід зазначити можливу появу серповидно розрізається листа. Наявність даних дефектів при застосуванні зазначених способів різання істотно знижує якість прокатної продукції. Це призводить до необхідності розробки нових технічних рішень, спрямованих на підвищення якості листового металопрокату. Ефективне практичне застосування даних рішень можливо тільки при наявності чітких рекомендацій щодо їх технологічних параметрів, розробка яких може бути проведена на базі теоретичних і експериментальних досліджень енергосилових і кінематичних показників зазначених розділових операцій, що і визначає актуальність даної дипломної роботи.

Метою роботи є підвищення якості листового металопрокату шляхом вдосконалення технології та обладнання процесів поперечної різання, на основі розвитку математичних моделей по визначенню енергосилових і кінематичних параметрів даних технологічних процесів і розробки науково обґрунтованих рекомендацій по їх реалізації. Для досягнення зазначеної мети в рамках дипломної роботи були поставлені і вирішені наступні завдання:

- провести аналіз стану питання, визначити основні проблеми, характерні для процесів поздовжньої і поперечної різання листового металопрокату на ножицях, а також намітити шляхи їх вирішення;

- встановити закономірності впливу параметрів ріжучого інструменту на енергосилові показники процесу різання і якість листового металопрокату;
- розробити методики розрахунку енергосилових і кінематичних параметрів процесів поперечного різання листового металопрокату на ножицях;
- провести експериментальну оцінку адекватності використовуваних методик розрахунку енергосилових і кінематичних параметрів процесів поперечного різання листового металопрокату на ножицях;
- розробити практичні рекомендації щодо вдосконалення технології і обладнання процесів поперечного різання листового металопрокату на ножицях.

Оснoву теоретичних досліджень склали метод чисельного рекурентного рішення кінцево-різницевої форми статичної рівноваги виділених елементарних об'ємів вогнища різання, а також метод кінцевих елементів. Експериментальні дослідження включали фізичне моделювання досліджуваних процесів із застосуванням методів тензометрії. Реалізація експериментальних досліджень проводилася з застосуванням підходів до планування експерименту, а при обробці їх результатів були використані методи математичної статистики.

1 РОЗДІЛ 1. СТАН ПИТАННЯ. ПОСТАНОВКА МЕТИ І ЗАДАЧ ДОСЛІДЖЕНЬ.

1.1 Технологічні схеми виробництва товстих листів

Основним завданням технологічного процесу виробництва товстолистого металопрокату є отримання готового листа товщиною до 50 мм високої якості з мінімальними витратами і максимальною продуктивністю. При цьому розвиток виробництва товстого листа обумовлено потребою галузей промисловості, які виробляють труби великого діаметра, великі судна, ядерні реактори і ін. В даний час в світі експлуатується понад 170 товстолистових станів [1-17].

При виробництві товстолистого металопрокату використовуються прокатні стани різноманітних конструкцій, при цьому, для реалізації даної завдання набули поширення двох і трехклетьевие стани великої одиничної потужності, обладнані клітями кварто в чорнової і чистової лініях на яких катають листи товщиною від 5 до 50 мм, шириною від 600 до 3800 мм і плити товщиною до 200 мм. До таких станів відносяться стан 3000 Маріупольського комбінату і стан 3600 комбінату "Азовсталь" продуктивністю 1,7 млн. т. на рік [18]. При цьому в залежності від різних умов (наприклад, марки стали) технологічний процес виробництва товстолистого металопрокату може мати відчутні відмінності (рис. 1.1), включаючи в себе різні додаткові операції по обробці та підвищенню якості готової металопродукції. У той же час незалежно від обраної технологічної схеми виробництва товстого листа, вона, як правило, включає операції різання, що входять в основну частину технологічного процесу і проводяться з метою додання готовому листу встановлених форми і розмірів.

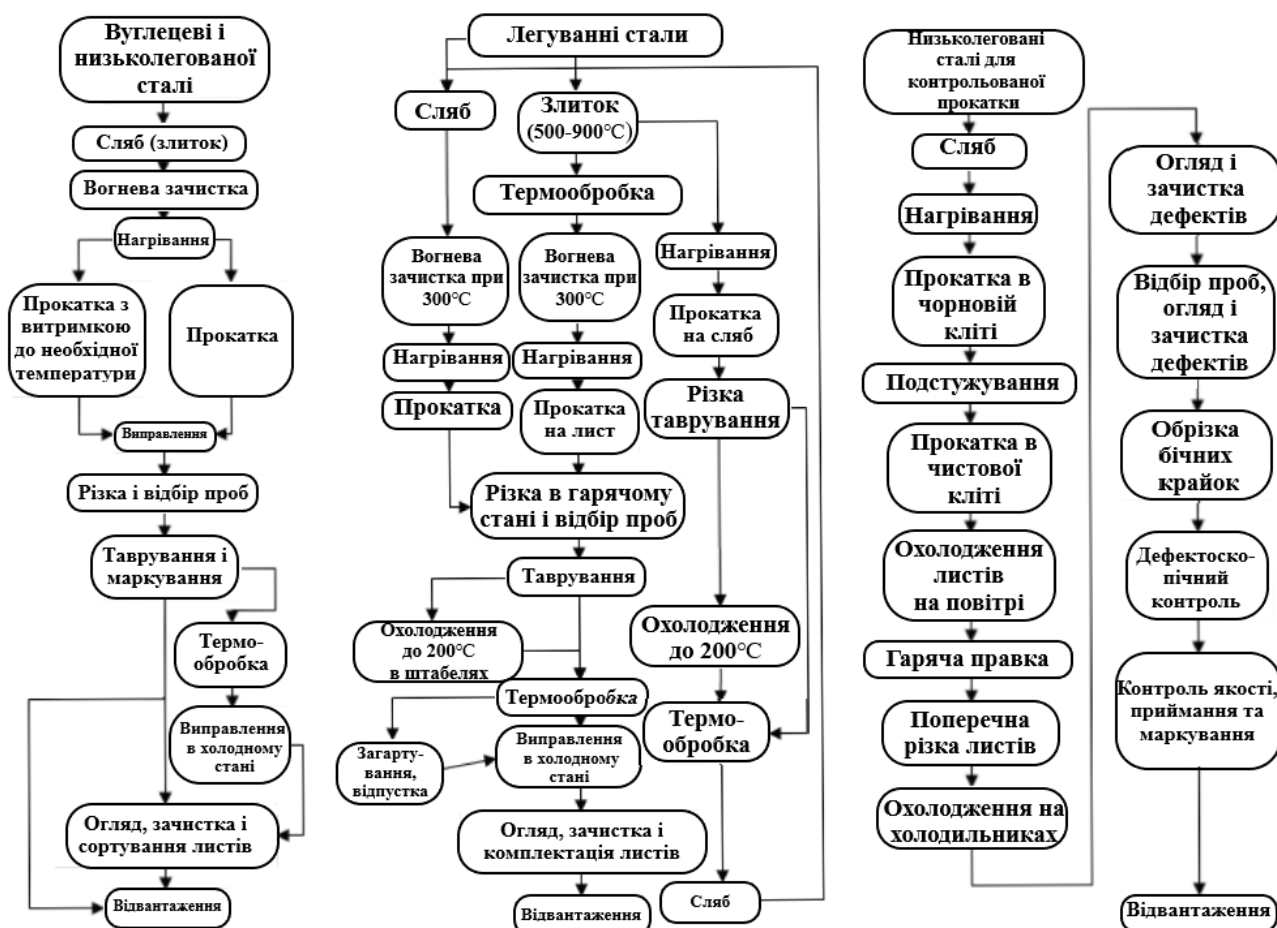


Рисунок 1.1 - Схеми технологічних процесів виробництва товстих листів [2]

Зокрема при виробництві товстолистового металопрокату розділові операції застосовують для обрізки переднього (рис. 1.2, а) і заднього (рис. 1.2, б) решт листового розкату, які після прокатки в горизонтальних валках мають веерообразную форму (див. Рис. 1.2), що викликане теченням металу в напрямках найменшого опору [18; 19]. Крім того дані операції застосовуються для обрізки бічних крайок товстого листа (на яких може утворюватися «захід», пов'язаний з нерівномірним проникненням деформації по висоті гуркату), а також для різання на мірні довжини і подовжнього розпуску смуг.



а)



б)

Рисунок 1.2 - Фото переднього (а) і заднього (б) кінця листового розкату

Для реалізації операцій різання, до складу сучасних прокатних станів включають різноманітне обладнання, при цьому розділовий процес може здійснюватися такими способами: механічним без зняття стружки (Поділ здійснюється шляхом зсуву, розтягування, зламу або скручування однієї частини листа щодо іншої); механічним зі зняттям стружки (Поділ відбувається за рахунок видалення ріжучим інструментом частини металу між розділяються частинами) і термічним (поділ реалізується шляхом плавлення металу за заданою лінії за рахунок його локального нагріву).

При цьому найбільш перспективним серед перерахованих представляється механічний спосіб поділу без зняття стружки, оскільки дозволяє отримувати готову металопродукцію високої якості з максимальною виводительності і мінімальними втратами металу, крім того застосування даного способу реалізації розділової операції дозволяє виключити нерівномірність механічних властивостей листа, яка має місце при застосуванні термічного способу поділу.

Для реалізації механічного способу поділу без зняття стружки як правило застосовують ножиці різного типу, які в свою чергу, є одними з найбільш складних з кінематики та конструкції машинами, що входять в комплекс обладнання прокатних станів. Так, наприклад, схема розташування обладнання товстолистового стану 3600 «Азовсталь», має в своєму складі дві чотирех валкових кліті і вертикальну двовалкової кліть, передбачає прокатку листів і плит товщиною 5 ... 200 мм, шириною до 3200 мм, при цьому листи товщиною 5 ... 50 мм після прокатки в чорновій і чистовій клітях, редагування і контролю якості поверхні надходять на дві лінії різання, обладнані дисковими ножицями, здвоєними кромкообрізних ножицями і ножицями поперечного різання.

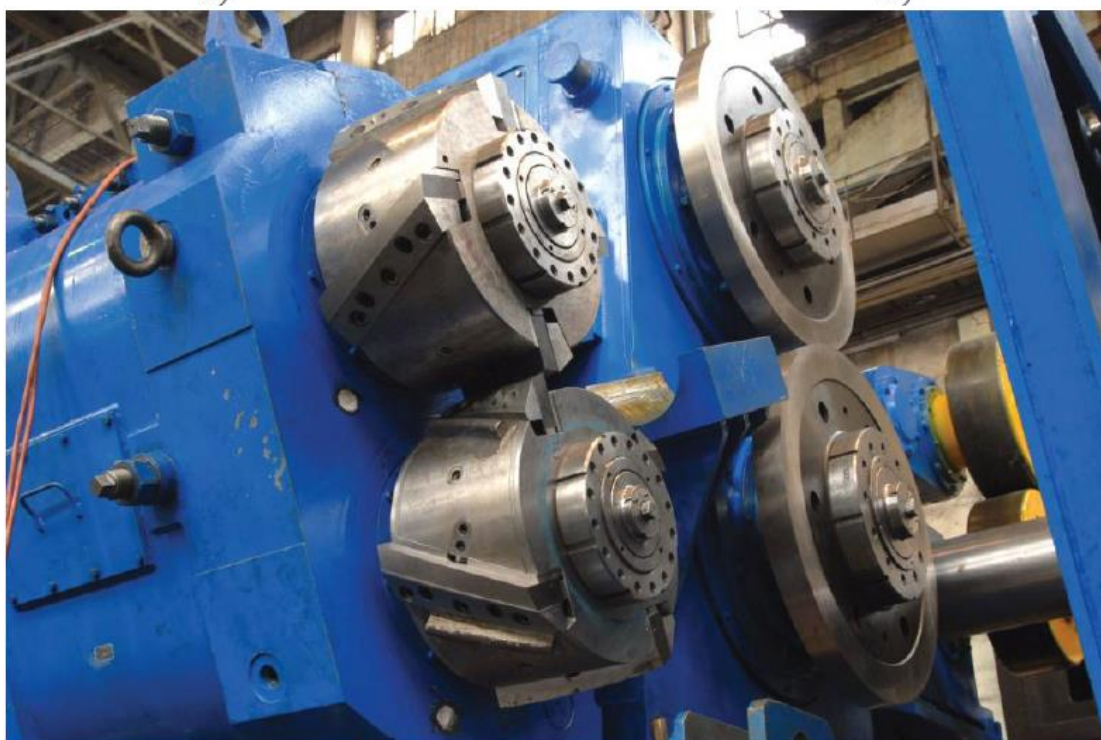
У той же час механічне обладнання для виробництва товстих листів вдосконалюється в напрямку збільшення потужності і продуктивності агрегатів з метою отримання листів з високою якістю поверхні і точністю розмірів [18-27]. Так для реконструкції стану 2500 гарячої прокатки, а також нового агрегату поперечного різання ВАТ «ММК», (м Магнітогорськ, Росія) з метою розширення сортаменту продукції, що випускається (смуг і листів), співробітниками «НКМЗ» (м.Краматорськ, Україна) був проєктований і виготовлений комплекс обладнання, що включає в себе сучасні барабанні летючі, гільйотини гідравлічні (рис. 1.3, а), гільйотини летючі ножиці (рис. 1.3, б), а також дискові кромкообрізні ножиці з кромкокрошітелем (рис. 1.3, в), які призначені для обрізки крайок з отриманням смуги мірної ширини і дроблення обрізаних кромок в скрап. Відмінною особливістю даних кромкообрізних ножиць є наявність ріжучого механізму, виконаного одним блоком з механізмом для дроблення крайок, що дозволяє максимально наблизити кромкокрошітельні барабани до ножів і значно скоротити довжину проводок [28].



а)



б)



в)

Рисунок 1.3 – Ножиці конструкції ПАТ «НКМЗ» встановлені при модернізації стану 2500 ВАТ «ММК» (гільйотинні гідравлічні (а), летючі гильотинні (б), дискові кромкообрізні з кромкокрошівелем (в)) [28]

Таким чином, можна стверджувати, що операція різання є однією з найбільш важливих складових технологічного процесу виробництва товстолистого металопрокату, а від складу і технологічних можливостей обладнання ділянки різання безпосередньо залежить продуктивність стану.

1.2 Застосування та вимоги до готових товстих листів

В умовах сучасного ринку металопродукції постійно зростає попит на листовий металопрокат, також підвищуються вимоги до якості готового листа [63-68], що вимагає як розвитку технології його виробництва в цілому, так і окремо взятих операцій. У той же час робота ножиць існуючих конструкцій [28; 67] характеризується періодичним або постійним проявом різних дефектів готового листа.

Зокрема практика застосування для поперечного різання листових розкатів шевронного ножа з класичною формою ріжучої кромки показала наявність залишкової деформації частини листа, що знаходиться під ножом в момент різання. В основному, даний дефект не перевищує вимог до площинності готового листа, проте істотно псує його товарний вигляд і, в ряді випадків, вимагає додаткової обробки (рис. 1.4, а, б) [64].

Існує кілька технічних рішень [53; 54], спрямованих на зниження даного дефекту. Так співробітниками НКМЗ [53] пропонується знизити величину залишкової деформації листа шляхом виконання східчастих знижень в центральній частині ріжучої кромки щодо її вертикальної осі симетрії (рис. 1.5), однак, з причини відсутності конкретних рекомендацій щодо параметрів запропонованих конструктивних елементів, не представляється можливим оцінити ефективність даного рішення.



а)



б)

Рисунок 1.4 - Вид торцевої поверхні листів, порізаних класичним шевронним ножом: загальний (а) і в області змикання ріжучих крайок (б)

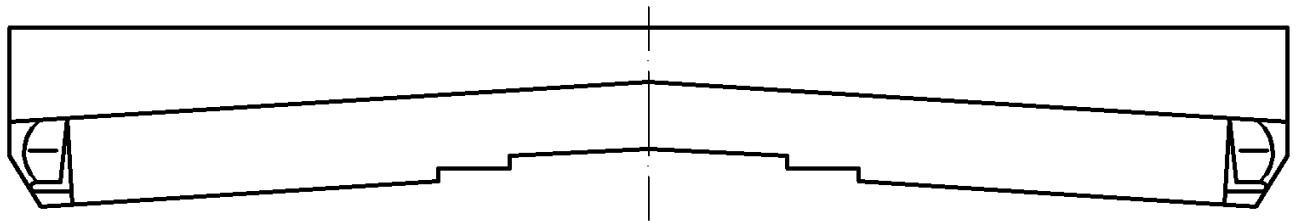


Рисунок 1.5 - шеврон ніж зі складною формою ріжучої кромки конструкції «НКМЗ» [53]

В роботі [54] передбачається виконання горизонтального майданчика, в вершині сходження ріжучих крайок (рис. 1.6), довжина якої l визначається з наступного виразу:

$$l = \frac{1.973 \cdot \sigma_T \cdot b}{\sigma_b \cdot \cos(\alpha)},$$

де σ_T — межа плинності матеріалу, що розрізає, МПа;

b — товщина ножедержателя з ріжучої пластиною, мм;

σ_b — межа міцності матеріалу, що розрізає, МПа;

α — кут нахилу прямолінійних площин торцевої поверхні пластини до горизонтальної площини.

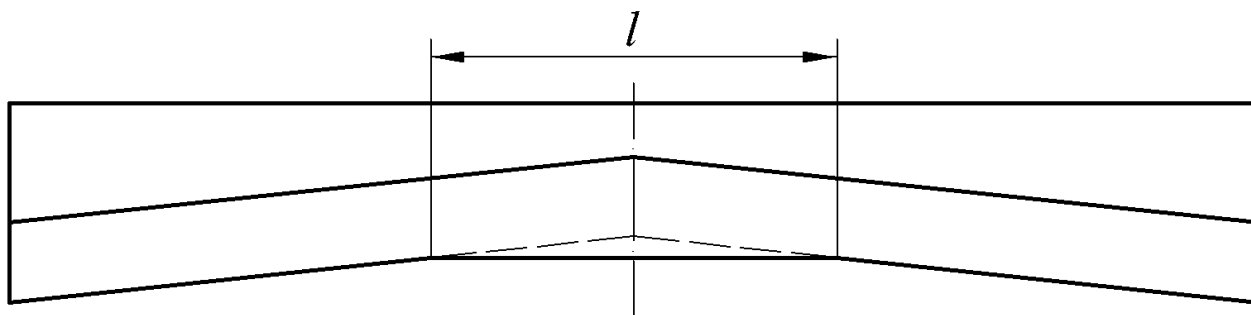


Рисунок 1.6 - шеврон ніж зі складною формою ріжучої кромки конструкції «Северсталь» [54]

Відомо, що застосування ножа конструкції «Северсталь» супроводжується істотним збільшенням прикладається сили на завершальній стадії різання [64]. У той же час теоретична оцінка даної величини, для ножів розглянутих конструкцій на даному етапі можлива тільки шляхом математичного моделювання із застосуванням методу скінченних елементів (МСЕ), що вимагає значних тимчасових і трудовитрат, а також високою обчислювальної потужності застосовуваних ЕОМ.

Таким чином, одним з перспективних напрямків для подальшого розвитку процесу поперечного різання листового металопрокату може послужити розробка нової конструкції ножа, що дозволяє знизити величину залишкової деформації відрізуваної частини листа, при цьому дана задача може бути вирішена, тільки при відповідному розвитку методик по визначенню енергосилових показників даної розділової операції.

1.3 Обладнання поперечного різання листів в умовах прокатного цеху

Ножиці, що застосовуються для різання товстолистого прокату, розрізняють за призначенням, конструкції і принципу дії. Так за призначенням існують ножиці для поперечної і поздовжньої різання, до першої групи належать ножиці з паралельними і похилими ножами, а також ножиці з катящимся різом, до другої дискові і здвоєні кромкообрізні ножиці.

Ножиці з похилим ножем (гільйотинні) застосовуються для поперечного різання листів в холодному, полуостившем або гарячому стані. Конструктивно вони бувають двох типів: відкритого (рис. 1.7, а) і закритого (1.4 б) [29-33]

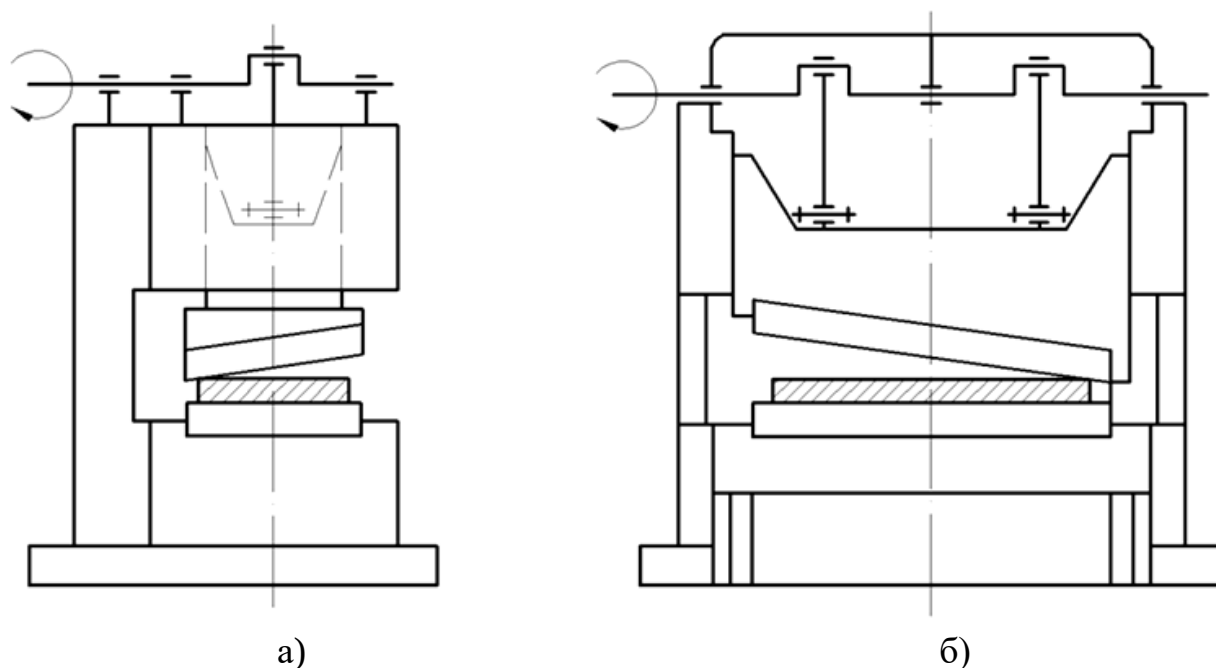


Рисунок 1.7 - Схеми гільйотинних ножиць відкритого (а) і закритого (б) типів

На ділянках різання товстолистових станів застосовують, переважно, ножиці другого типу, вони мають дві станини, з'єднані знизу траверс. У просвіті між станинами переміщається супорт з ножем, при цьому рухомим може бути як верхній, так і нижній ніж.

У ножицях з верхнім рухомим ножем нижній ніж, нерухомо закріплений в станині, розташований горизонтально, а верхній похило. У разі застосування конструкції з нижнім рухомим ножем цей ніж встановлюють похило, таким чином, при різанні лист притискається до верхнього прямого ножа і рез виходить більш прямим (перпендикулярним) [34].

Кут нахилу ножа α (рис. 1.8, а) приймається рівним $1^\circ \dots 6^\circ$ (залежно від товщини листа), завдяки чому різання відбувається не по всій площі розрізається листа одночасно, а тільки за деякою частини $abcd$.

У деяких випадках вважають за краще застосовувати більш складний у виготовленні двухнаклонний (шеврон) ніж (рис. 1.8, б). При різанні таким ножем лист займає більш стійке становище внаслідок врівноваження горизонтальних складових сили різання, що дозволяє збільшити кут нахилу різальних крайок [1; 29].

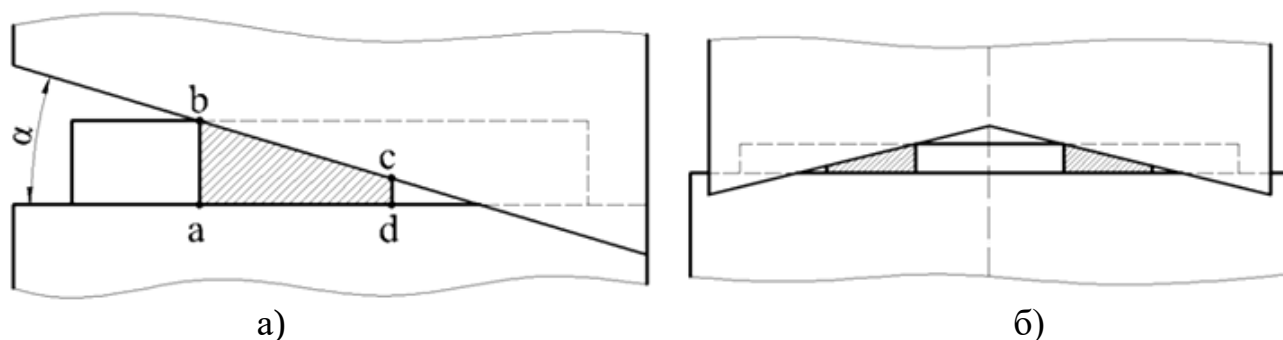


Рисунок 1.8 - Схема різання гільйотинних (а) і шевронним (б) ножем

На сучасних товстолистових станах поперечного різання листів також здійснюють на ножицях з катящимся різом [35-49]. Переваги ножиць даного типу, в порівнянні з гільйотинних, полягають в малому куті різання, а також мінімальному перекритті ножів по всій довжині різку, що призводить до зменшення деформації відрізається листа.

Зазвичай на лініях різання товстолистових станів встановлюються ножиці з двохкривошипний приводом (рис. 1.9, а), недолік яких полягає в складній кінематиці [40-43]. У той же час перспективною, на сьогоднішній день, є конструкція однокривошипний ножиць КО ВНИИМЕТМАШ [44-49] (рис. 1.9, б), які мають ряд істотних переваг в порівнянні з двохкривошипний ножицями, а саме:

- працюють реверсивно;
- мають один вал, встановлений на дві опори, що дозволяє використовувати в якості опор підшипники кочення, а не ковзання;
- оснащені механізмом врівноваження супорта з верхнім ножем, що забезпечує вибірку зазорів в напрямку дії сили різання і тим самим знижує динамічні навантаження на підшипникові опори і станину.

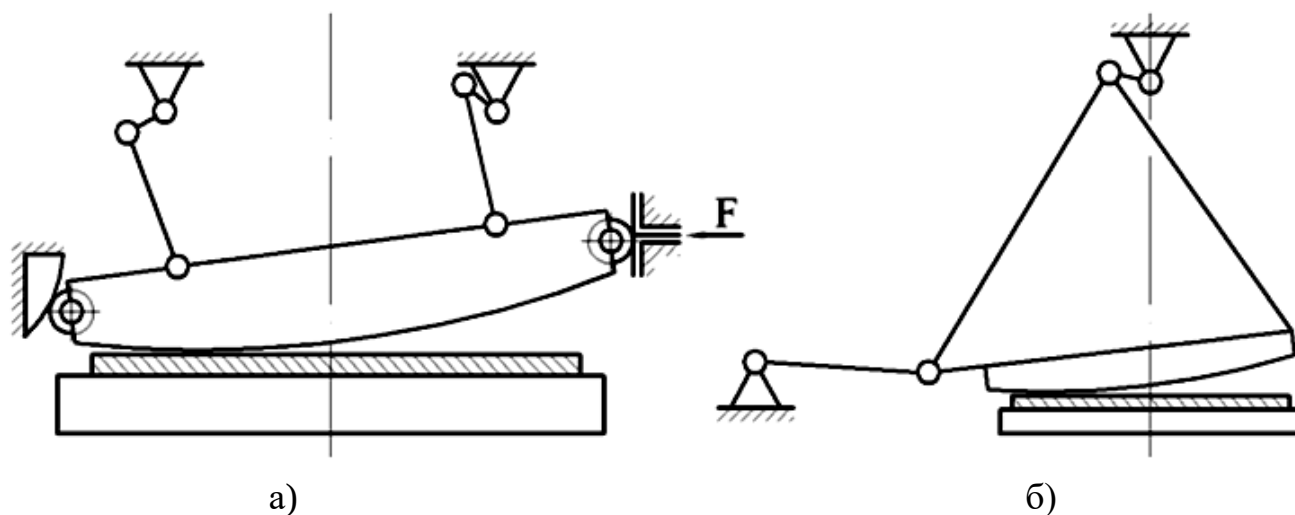


Рисунок 1.9 - Кінематична схема ножиць з катящимся різом: двохкривошипний (а) і однокривошипний (б)

1.4 Висновки

1. Подальший розвиток виробництва товстих листів обумовлено тенденцією, спрямованою на підвищення якості готової металопродукції, зокрема шляхом розширення можливостей існуючого і знову проєктованого устаткування, яке застосовується для поздовжнього й поперечного різання листового металопрокату, а також вдосконалення даних технологічних операцій в цілому за умови мінімізації енерговитрат на їх реалізацію.

2. Одним з перспективних напрямків для подальшого розвитку процесу поперечного різання листового металопрокату може послужити розробка нової конструкції ножа, що дозволяє знизити величину залишкової деформації відрізуваної частини листа, при цьому дана задача може бути вирішена, тільки при відповідному розвитку методик по визначенню енергосилових показників даної технологічної операції.

2 РОЗДІЛ 2. ВИЗНАЧЕННЯ НАПРЯМКУ ТА МЕТОДІВ ДОСЛІДЖЕНЬ

2.1 Підвищення якості готових листів як напрямок досліджень в області процесу та обладнання поперечного різання товстих листів

Виходячи з аналізу, проведеного в розділі 1, очевидно, що виробництво товстолистового прокату існує низка проблем, що стосуються процесів поздовжньої і поперечної різання листа, серед яких можна виділити:

- залишкову деформацію листа при застосуванні для поперечного різання шевронного ножа класичної конструкції;
- обмеження сортаменту листів, що розрізають на дискових ножицях;
- можлива серповидність листа після різання на дискових ножицях;
- явище прикрайкового утонення листа при різанні в гарячому стані.

Крім того, недосконалість існуючих методів розрахунку енергосилових параметрів процесу різання листового металопрокату може вплинути на точність обчислень, а також вони можуть виявитися незастосовні для нових способів реалізації даної операції. Зазначені проблеми, в рамках даної роботи, можуть бути вирішені шляхом виконання наступних завдань:

- провести аналіз стану питання, визначити основні проблеми, характерні для процесів поздовжньої і поперечної різання листового металопрокату на ножицях, а також намітити шляхи їх вирішення;
- встановити закономірності впливу параметрів ріжучого інструменту на енергосилові показники процесу різання і якість листового металопрокату;
- розробити методики і програмні засоби для автоматизованого розрахунку енергосилових і кінематичних параметрів процесів поздовжньої і поперечної різання листового металопрокату на ножицях;
- провести експериментальну оцінку адекватності використовуваних методик розрахунку енергосилових і кінематичних параметрів процесів поздовжньої і поперечної різання листового металопрокату на ножицях;
- розробити практичні рекомендації щодо вдосконалення технології та обладнання процесів поздовжньої і поперечної різання листового металопрокату на ножицях.

Застосування математичного моделювання при визначенні енергосилових параметрів дозволяє істотно скоротити час, що витрачається на обчислення, а також дає можливість попередньої оцінки прийнятих проектно-конструкторських рішень. Однак необхідно проведення експериментальних досліджень з метою оцінки ступеня достовірності отриманих результатів при цьому слід використовувати максимально доступні засоби, що дозволяють отримувати необхідні результати при мінімальних витратах.

2.2 Вибір та обґрунтування методів досліджень

Розробка комплексу теоретичних методів дослідження, поєднання яких дасть можливість з найбільшою вірогідністю оцінювати ефективність прийнятих рішень, а також всебічно вивчити досліджувану проблему, є однією з найбільш важливих завдань.

Основною метою теоретичного дослідження процесів різання листового металопрокату на ножицях є оцінка впливу основних технологічних і конструкційних параметрів розділового процесу на його якісні та енергосилові показники. При цьому, з урахуванням сучасного рівня розвитку обчислювальної техніки, досягнення зазначеної мети може бути виконано за допомогою математичного моделювання, зокрема, із застосуванням методу скінченних елементів (МСЕ), який широко використовується для вирішення завдань обробки металу тиском [69-74], що обумовлено розвитком його теоретичних основ і достатньою потужністю сучасних ЕОМ. Суть даного методу полягає в дискретизації досліджуваної області шляхом її розбиття на кінцеве число елементів, причому для моделювання процесів обробки металів тиском найбільш застосовні кінцеві елементи, що моделюють поведінку суцільний деформируемой середовища [69]

Одним з переваг застосування МСЕ для моделювання процесів обробки металів тиском є можливість визначення енергосилових показників процесу поділу металу в разі застосування нових способів реалізації даної операції, для яких не підходять існуючі методики. Також даний підхід дозволяє істотно розширити число чинників, що враховуються. При цьому адекватність результатів моделювання може бути забезпечена тільки в разі правильного вибору способу, що враховує вичерпання матеріалом здатності до деформування і настання початку руйнування, а також коректного опису умов контакту між інструментом і матеріалом за умови адекватного підходу до чисельної реалізації. Виконання зазначених умов вироблялося на підставі результатів проведених раніше досліджень процесів по-

ділу металу на ножицях [75-127]. При цьому дані завдання, як правило, вирішуються із застосуванням формулювання Лагранжа-Ейлера [70], в якій забезпечується можливість безперервного перестроювання (адаптації) сітки. Процес руйнування металу розглядається як в'язке руйнування - необоротне порушення суцільності металу, що супроводжується помітною пластичною деформацією і значним витратою енергії, при якому відбувається поділ деформованого твердого тіла на частини внаслідок поширення в тілі макроскопічних тріщин. При цьому в матеріалі спостерігається накопичення пошкоджень - порушення пластичного рівноваги, обумовлене розпушення матеріалу, яке веде до локалізації деформації і подальшого руйнування, моделюваному методом виключення елементів з розрахунку, після вичерпання ресурсу пластичності [70; 71]. При цьому для опису умов контакту між інструментом і матеріалом може бути використаний закон тертя Амонтона-Кулона, на основі відомих аналітичних описів [3; 62].

З урахуванням специфіки процесів, що розглядаються поділу при розробці моделі із застосуванням МСЕ доцільно використовувати тривимірний підхід, при цьому з метою скорочення обсягів обчислення, в розгляді може знаходитися тільки одна симетрична частина моделі. Як середовище для моделювання із застосуванням МСЕ може бути використаний програмний комплекс ABAQUS на увазі достатньої кількості довідкової інформації щодо його застосування [70-73].

Однак варто вказати, що практичне застосування МСЕ пов'язане з певними труднощами, пов'язаними з необхідністю використання ЕОМ високої обчислювальної потужності, а також достатньою кваліфікацією користувачів, що призводить до необхідності розробки альтернативних методик розрахунку, що дозволяють відмовитися від МСЕ на користь більш доступних засобів математичного моделювання, які більш підходять до застосування в умовах виробництва.

З огляду на досвід попередніх досліджень [51] при виборі методик і підходів до двовимірного математичного моделювання з метою підвищення точності розрахунку енергосилових параметрів дотримувалися наступних основних тенденцій: облік реальної форми використовуваного інструменту і адекватний опис зміни механічних властивостей металу, що розрізає в міру впровадження ножа в залежності від вихідних параметрів процесу поділу. Даний підхід, стосовно до процесів різання листового металопрокату на ножицях, має на увазі використання (в якості основного методу опису напружено-деформованого стану металу) чисельного рекурентного рішення конечно разностной форми умови статичної рівноваги

виділених елементарних об'ємів вогнища різання шляхом його розбиття на кінцеве безліч даних елементарних обсягів [51; 119; 128].

Як середовище для створення математичних моделей процесів, що розглядаються поздовжньої і поперечної різання був обраний програмний комплекс MATLAB на увазі його доступності та наявності достатнього функціоналу для вирішення поставлених завдань [129-131].

2.3 Висновки

1. Основним напрямком для подальших досліджень процесів різання листового металопрокату на ножицях слід вважати підвищення якості готової продукції та розширення технологічних можливостей обладнання, що застосовується, що має на увазі комплексний підхід, що включає теоретичні та експериментальні дослідження процесів поперечного різання листового металопрокату на ножицях, ґрунтуючись на результатах яких представляється можливим пропозиція нових технічних рішень, спрямованих на вдосконалення даних розділових операцій, а також розробка конкретних рекомендацій щодо їх застосування.

2. Проведення всебічних теоретичних досліджень процесів поперечного різання листового металопрокату на ножицях має на увазі застосування сучасних методик розрахунку енергосилових параметрів даних разделительних операцій, при цьому ефективне їх застосування часто фактично пов'язане зі створенням математичних моделей описуваних процесів. При цьому найбільш сучасними підходами до математичного моделювання процесів різання листового металопрокату на ножицях є застосування методу скінченних елементів, а також чисельного рекурентного рішення кінцево-різницевої форми умови статичної рівноваги виділених елементарних об'ємів вогнища різання, однак існуючі методики, що використовують даний підхід не завжди застосовні для коректного опису випадків застосування нових способів різання і, отже, вимагають доопрацювання з метою адаптації і уточнення.

3. Проведення експериментальних досліджень процесів поперечного різання листового металопрокату на ножицях передбачає використання сучасних підходів до постановки експерименту і подальшої обробки виходимих даних, які в свою чергу необхідно піддавати кореляційному і регресійному аналізу при порівнянні з відповідними результатами, отриманими розрахунковим шляхом, при цьому ступінь їх достовірності може бути визначена із застосуванням методів математичної статистики.

3 РОЗДІЛ 3. ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСІВ ТА ОБЛАДНАННЯ ПОПЕРЕЧНОГО РІЗАННЯ ТОВСТИХ ЛИСТІВ

3.1 Аналіз факторів, що впливають на якість та форму готових листів

Як вказувалося в підрозділі 1.3, застосування шевронного ножа з класичною формою ріжучої кромки супроводжується наявністю залишкової деформації частини листа, що знаходиться під ножом в момент різання. При цьому можна припустити, що застосування ножів зі складною формою ріжучої кромки (див. підрозд. 1.3) дійсно дозволяє знизити величину залишкової деформації, однак наявність конструктивного елементу у вигляді майданчика в ножі конструкції «Северсталь» (див. рис. 1.6), очевидно, призведе до істотного збільшення значення сили різання в завершальній стадії розділового процесу. Тому в рамках даної роботи було вирішено розглянути альтернативну конструкцію шевронного ножа, характерною особливістю якого є наявність заокруглення в вершині сходження похилих прямолінійних площин ріжучої кромки (рис. 3.1).

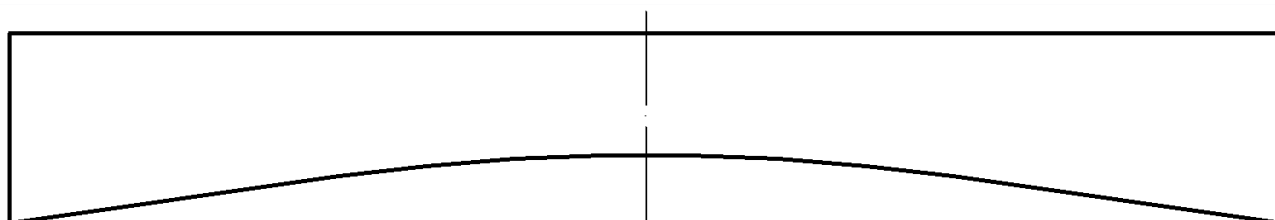


Рисунок 3.1 — Конструкція шевронного ножа зі скругленням в вершині сходження похилих прямолінійних площин ріжучої кромки

Однак обґрунтований вибір на користь будь-якої зі згаданих конструкцій шевронних ножів, на початкових етапах представляється скрутним через відсутність достатніх відомостей, для проведення порівняльного аналізу. Зокрема теоретична оцінка енергосилових параметрів процесу різання в цих випадках на даному етапі можлива шляхом математичного моделювання із застосуванням методу скінченних елементів.

На підставі вищесказаного метою даного теоретичного дослідження було проведення порівняльного теоретичного аналізу ефективності застосування двох різних конструкцій шевронних ножів зі складною формою ріжучої кромки для визначення найбільш перспективної з точки зору якості готового листа та енергосилових параметрів процесу різання.

Для досягнення зазначеної мети, на базі програмного комплексу ABAQUS, в рамках даного дослідження була розроблена тривимірна кінцево-елементна математична модель (з використанням підходу Лагранжа [71] і урахуванням сили тяжіння), процесу поперечного різання листів шевронними ножами. Дана модель (рис. 3.2) складається з деформованого бруса 1 (Моделює розрізається лист) і чотирьох абсолютно жорстких недеформівних тіл: верхній 2 і нижній 3 ножі, притиск 4 і стіл 5. рез здійснюється шляхом переміщення у вертикальній площині нижнього ножа і притиску, по відношенню до нерухомого верхньому ножа [64; 134; 135].

Деформується брус (рис. 3.3), являє собою нерівномірну ((згущується в області різку) сітку з ізопараметричних шестигранних восьми вузлових лінійних елементів з скороченої схемою інтегрування, мають властивості суцільного деформованого середовища [71].

В якості матеріалу, що розрізає, моделювалася сталь Ст2пс ($\sigma_{0.2} = 215$ МПа, $\sigma_b = 330$ МПа), при цьому криву плинності $\sigma = f(\bar{\epsilon})$ будували за відомою апроксимації [136]:

$$\sigma = \sigma_{0.2} \left(\frac{\bar{\epsilon}_p}{0} / 0.002 \right)^{m_0} \quad (3.1)$$

де m_0 - показник зміцнення:

$$m_0 = \begin{cases} \frac{\ln(\sigma_b / \sigma_{0.2}) + 0.058}{3.44} & \text{при } \sigma_b / \sigma_{0.2} \leq 1.32; \\ \frac{\ln(\sigma_b / \sigma_{0.2}) + 0.216}{4.78} & \text{при } \sigma_b / \sigma_{0.2} > 1.32. \end{cases} \quad (3.2)$$

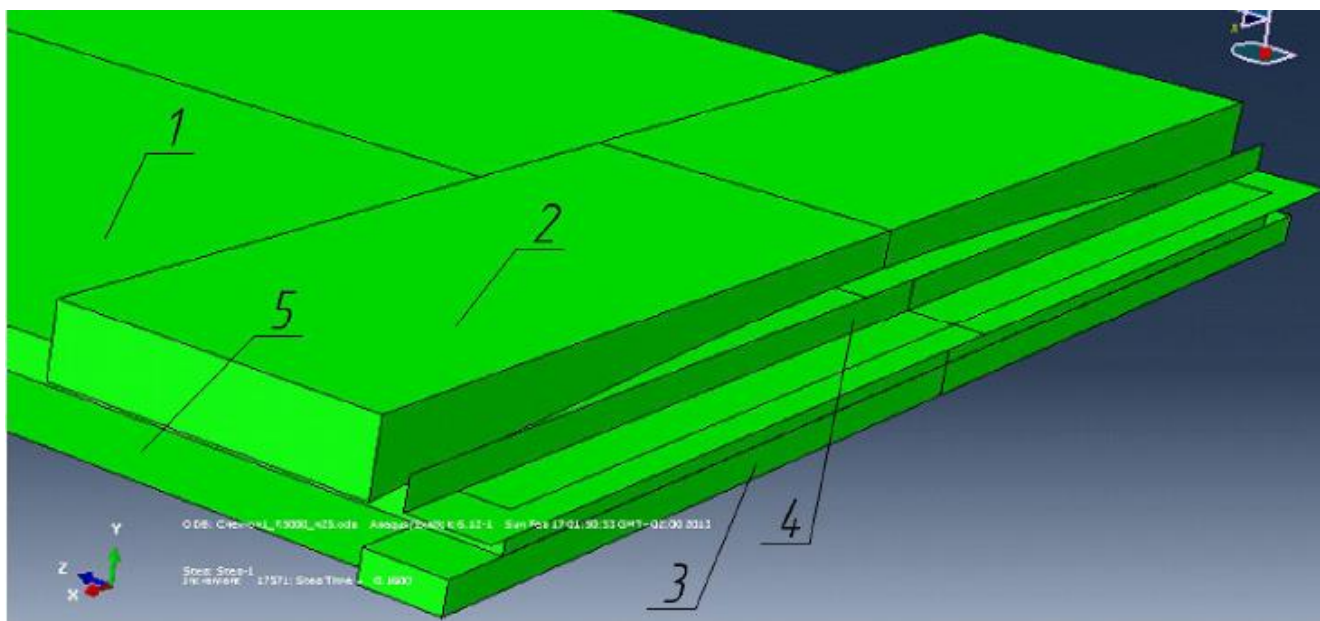
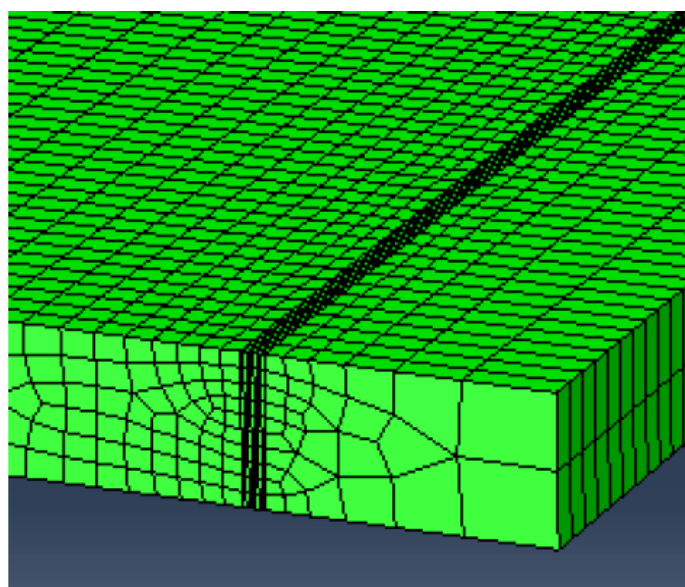
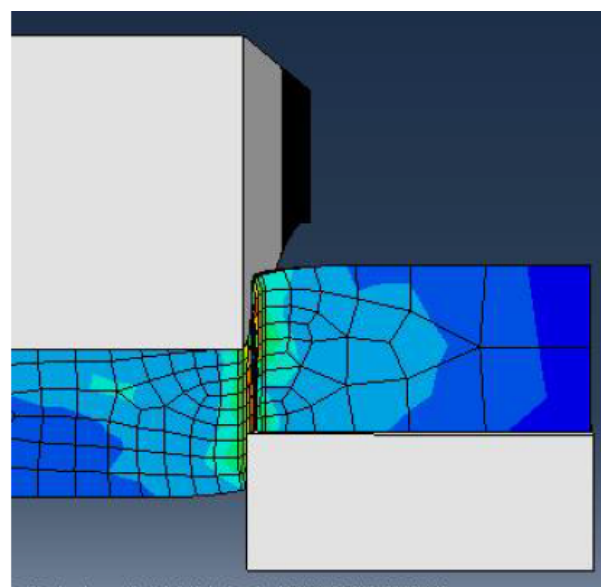


Рисунок 3.2 — Загальний вигляд тривимірної моделі різання шевронним ножом



а)



б)

Рисунок 3.3 — Конфігурація сітки листа в початковій стадії (а) і при різанні(б)

Для проведення порівняльної оцінки ножів розглянутих конструкцій реалізовувалося моделювання відповідних процесів різання, при цьому довжина гори-

зонтального майданчика ножа конструкції «Северсталь» приймалася, виходячи з виразу (1.1), стосовно до ножиць конструкції НКМЗ і становила $l = 283$ мм. У свою чергу радіус округлення шевронного ножа альтернативної конструкції підбирався експериментально виходячи з умови рівності максимального значення сили різання для обох випадків і склав для даних умов $R = 5000$ мм. Ширина ножів в обох випадках становила 50 мм. Загальний вигляд модельованих ножів представлений на малюнку 3.4.

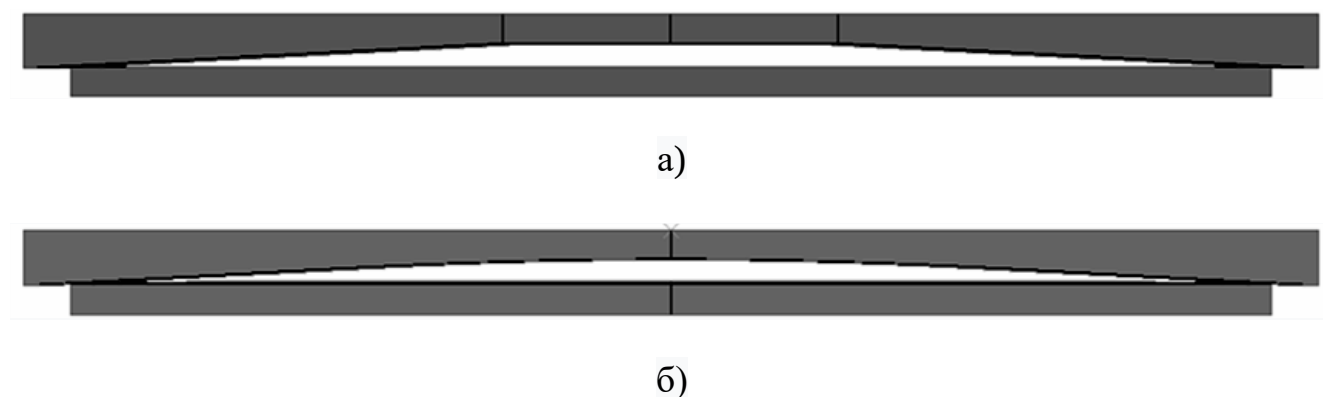
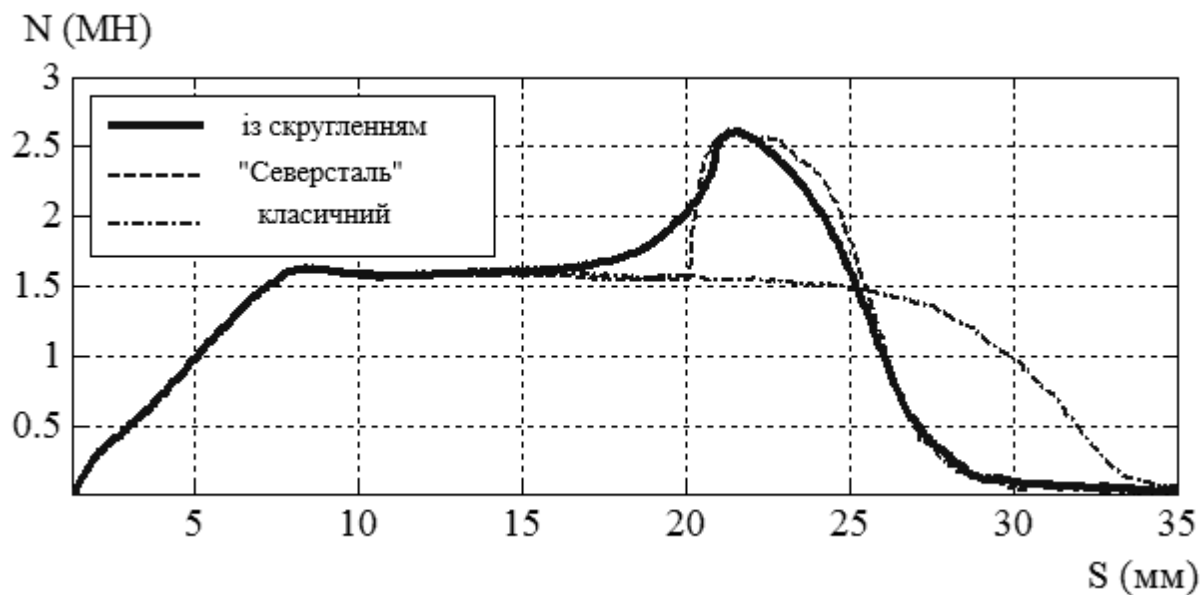


Рисунок 3.4 — Загальний вигляд модельованих ножів (конструкції «Северсталь» (а) і з округленими (б))

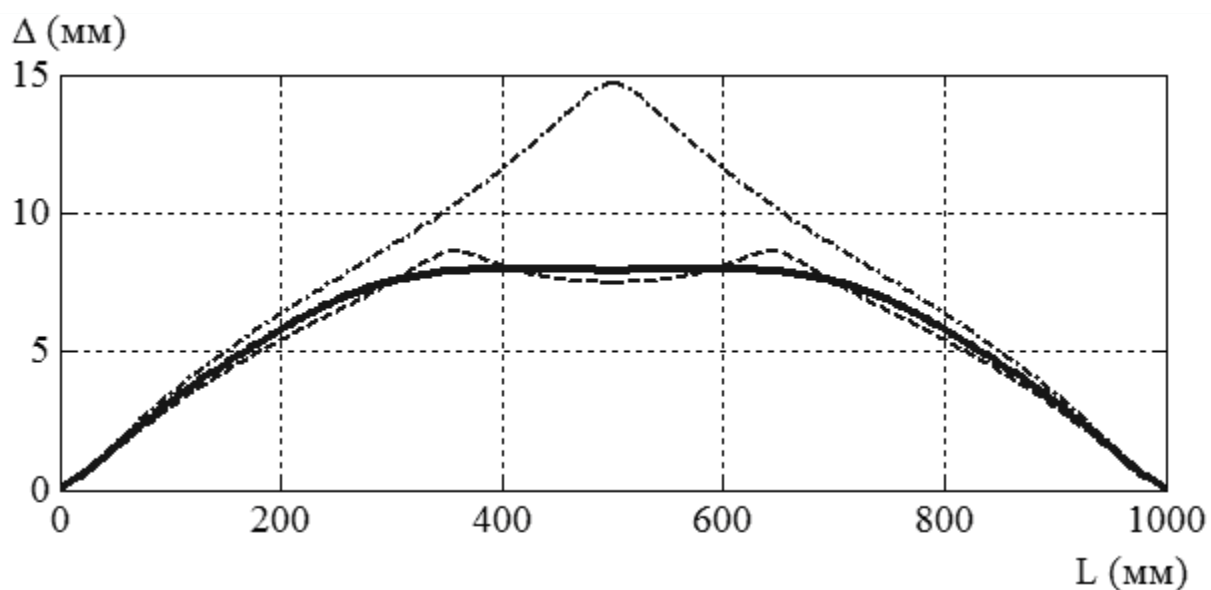
Також в рамках даного дослідження моделювався процес різання шевронним ножом класичної конструкції, при цьому кут нахилу прямолінійних площин різальних крайок для всіх ножів приймався рівним 3° , товщина листа становила $h = 25$ мм. Швидкість переміщення ножа приймалася 70 мм / с. На рисунку 3.5 представлені результати моделювання розглянутих розділових процесів, зокрема, показані розподілу значень сили різання N в залежності від переміщення ножа S (рис. 3.5, а) і відповідні розподілу величини залишкової деформації по ширині листа L , яка становила 1000 мм (рис. 3.5, б).

З отриманих розподілів видно, що для обох розглянутих випадків застосування шевронного ножа зі складною формою ріжучої кромки, спостерігається характерне збільшення значення сили різання в завершальній стадії розділового процесу ($> 50\%$), при цьому, дійсно, досягається істотне зниження величини залишкової деформації листа ($> 40\%$). Однак варто зазначити, що в порівнянні з ножом конструкції «Северсталь», при рівному значенні максимальної сили різання, застосування шевронного ножа зі скругленням дозволяє домогтися більшого (на

7,4%) зниження величини залишкової деформації з причини відсутності локалізації дефекту, що робить дану конструкцію ножа більш перспективною.



а)



б)

Рисунок 3.5 — Розрахункові розподілу значень сили різання N в залежності від переміщення ножа S (а) і відповідні розподілу величини залишкової деформації по ширині листа L (б)

З метою оцінки впливу величини радіуса заокруглення на якість готового листа та енергосилові параметри процесу різання в рамках даного дослідження, було

отримано розподіл величини залишкової деформації листа Δ , представленої в ставленні до її максимального значення Δ_{max} , що досягається при різанні класичним шевронним ножом (рис. 3.6), а також відповідні розподілу величини відносини максимальної сили різання N_{max} , до її величині при сталому процесі N_{steady} (рис. 3.7). Дані розподілу представлені в залежності від величини відносини радіуса заокруглення R до товщини розрізається листа h .

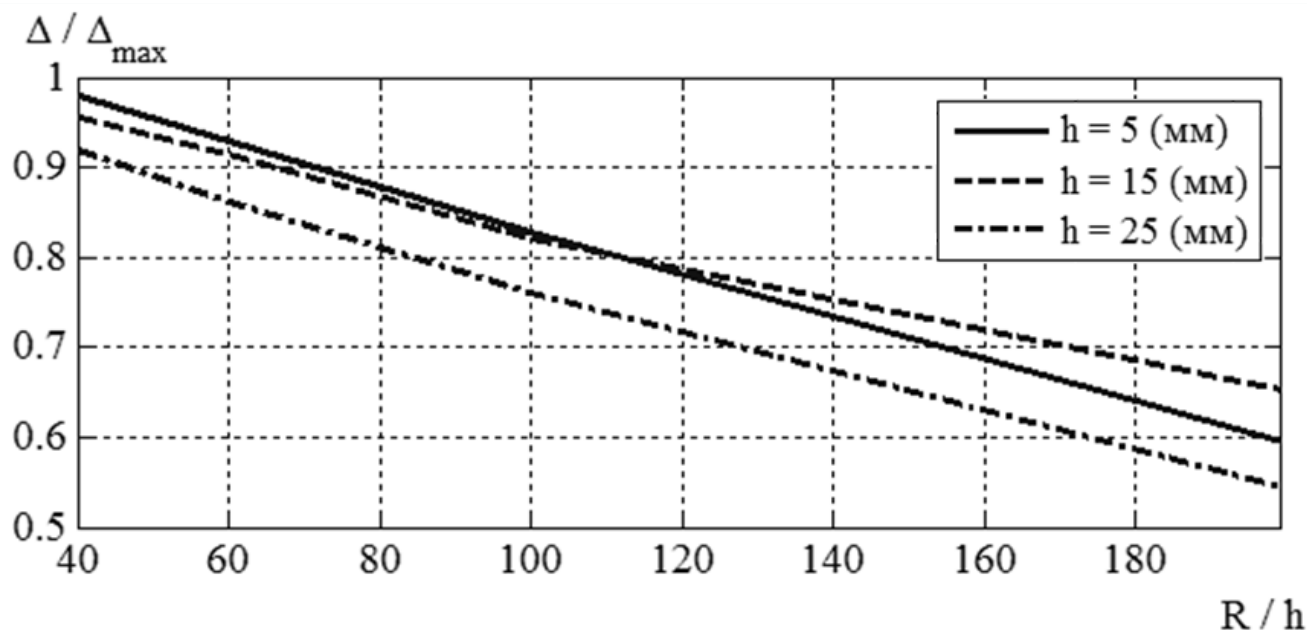


Рисунок 3.6 — Розрахунковий розподіл величини Δ/Δ_{max} від величини відносини радіуса заокруглення R до товщини розрізаємого листа h

На підставі отриманих залежностей можна стверджувати, що збільшення радіуса заокруглення до $200h$ для зазначених товщин дозволяє домогтися зниження величини залишкової деформації на 35 ... 55%, однак сприяє істотного збільшення сили різання в завершальних стадіях розділового процесу ($< 65\%$), отже, величина радіуса заокруглення повинна підбиратися виходячи з умови допустимого перевантаження стосовно конкретних ножиць.

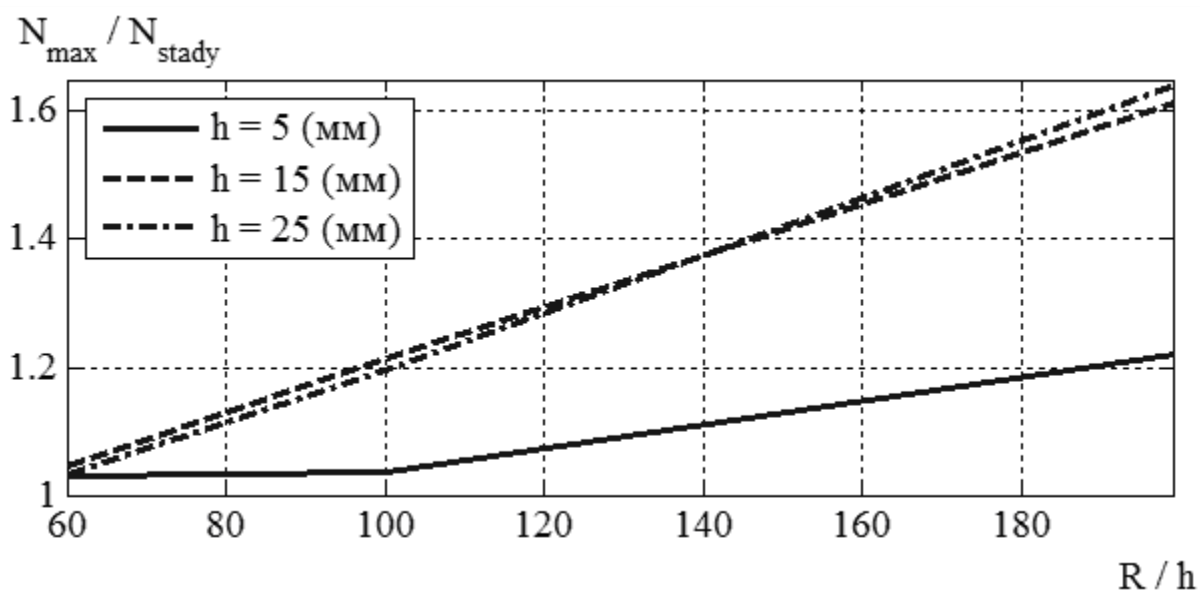


Рисунок 3.7 — Розрахункові розподілу величини $\Delta_{max} / N_{steady}$ від величини відносини радіуса закруглення R до товщини розрізаємого листа h

3.2 Аналіз технічних рішень щодо обладнання поперечного різання листів

Виходячи з результатів кінцево-елементного моделювання, наведених в попередньому підрозділі, застосування для поперечного різання листового металопрокату шевронного ножа зі складною формою ріжучої кромки супроводжується істотним збільшенням сили на завершальній стадії розділового процесу. При цьому найбільш ефективним з точки зору якості готового листа є застосування шевронного ножа зі скругленням. У той же час теоретична оцінка енергосилових параметрів процесу різання на даному етапі можлива тільки шляхом математичного моделювання із застосуванням МСЕ, що вимагає значних тимчасових і трудовитрат, а також застосування ЕОМ високої обчислювальної потужності. Таким образом, існує необхідність розробки методики та алгоритму автоматизованого розрахунку енергосилових параметрів процесу різання листового металопрокату шевронним ножом зі скругленням, яка могла б стати альтернативою МСЕ, дозволяючи використовувати менш витратні методи математичного моделювання, що і послужило метою даного теоретичного дослідження.

В основу отриманої одновимірної математичної моделі процесу поперечного різання товстолистового металопрокату шевронним ножом зі скругленням було покладено чисельне рекурентне рішення кінцево-різницевої форми статичної рів-

новаги за визначенням геометричних характеристик і енергосилових параметрів в рамках кожного окремо виділеного елементарного обсягу вогнища різання. При цьому використання рекуррентної схеми вирішення даного завдання передбачало напрямок розбиття, відповідне переміщення ножа, на підставі чого початкового стану ножа відповідали точки ABC (рис. 3.8, а). Далі, з урахуванням обраного підходу, необхідно прийняти в розгляд m положень ножа в напрямку його переміщення при різанні з деяким дискретним кроком:

$$ds = \frac{S}{m} \quad (3.2)$$

Величину повного ходу ножа S до поділу заготовки, виходячи з даної розрахункової схеми, можна визначити як:

$$S = h_n + h \cdot \varepsilon_n \quad (3.3)$$

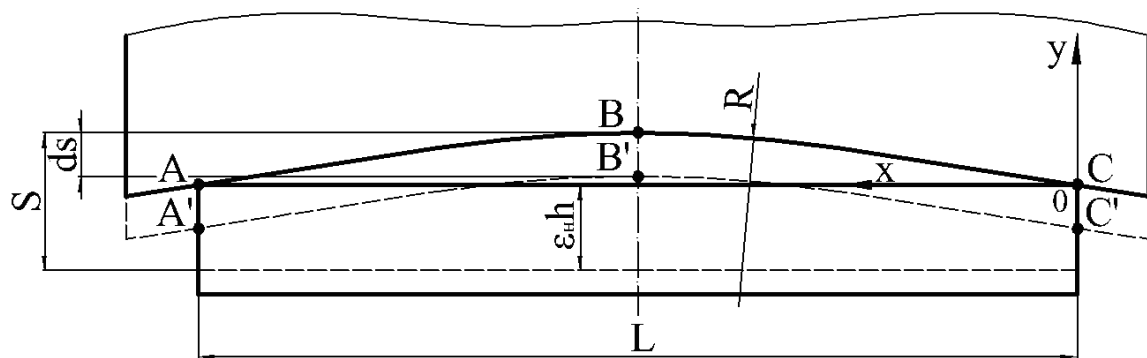
де h - товщина розрізаємого листа;

h_n - відстань від поверхні листа до верхньої точки профілю ножа безпосередньо перед впровадженням;

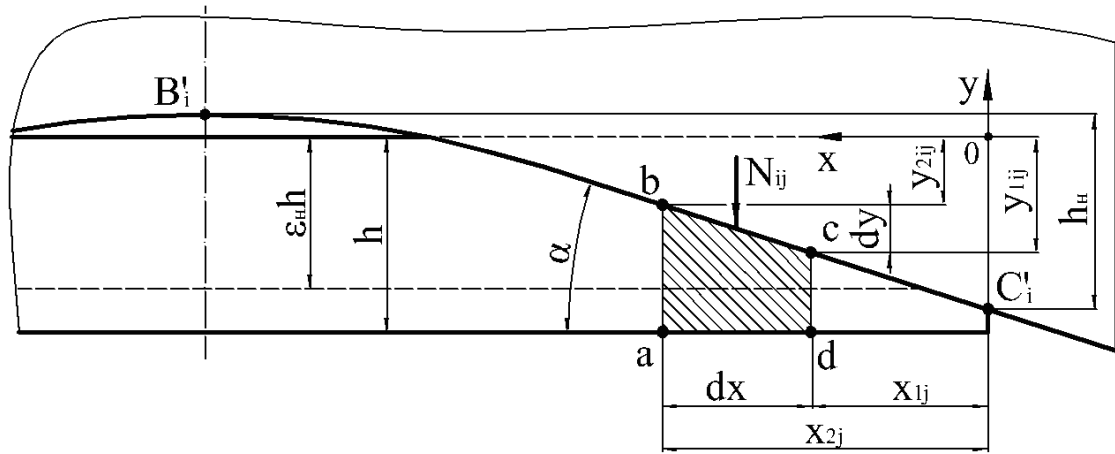
ε_n - величина відносного впровадження до відколу, яка згідно з даними робіт [136-139], залежить від товщини металу, що розрізає листа h , а також кута нахилу до горизонталі прямолінійних площин ріжучої кромки шевронного ножа і може бути визначена з наступного виразу:

$$\varepsilon_n = 1 - \frac{1 - e^{-A\left(\frac{h}{h_{max}}\right)^B}}{1 - e^{-A}} \cdot \left(1 - \varepsilon_{min} \left(\cos \frac{\alpha}{2}\right)^2\right) \quad (3.4)$$

де A, B - емпіричні коефіцієнти, значення яких залежать від властивостей матеріалу, що розрізає [138; 139];



а)



б)

Рисунок 3.8 — Розрахункові схеми по визначенню геометричних і енергосилових параметрів процесу поперечного різання листового металопрокату шевронним ножом зі скругленням

h_{max} - товщина заготовки, при якій значення відносного впровадження до відколу ε_h асимптотично наближаються до свого мінімуму;

ε_{min} - мінімальна відносна глибина надрізу до відколу, відповідна товщині листа h_{max} (для випадку різання листів з конструкційної сталі товщиною до 25 мм в холодному стані на базі проведених раніше досліджень [137-139] можна прийняти: $A = 2,7$; $B = 0,65$; $h_{max} = 25$; $\varepsilon_{min} = 0,31$).

Застосування чисельного рекурентного рішення кінцево-різницевої форми статичної рівноваги за визначенням геометричних характеристик і енергосилових параметрів в рамках кожного окремо виділеного елементарного обсягу передбачає розбиття площі перетину листа по осі x (див. рис. 3.8, б) на кінцеве безліч k елементарних об'ємів, при цьому в силу симетричності розрахункової схеми, має сенс розглядати її половину. Таким чином, координати j -того елементарного об'єму x_{1j} , x_{2j} , враховуючи, що $x_{1j=1} = 0$ визначаються наступним чином:

$$x_{1j} = x_{2j-1} \quad (3.5)$$

$$x_{2j} = x_{1j} + dx \quad (3.6)$$

При цьому:

$$dx = \frac{L}{2k} \quad (3.7)$$

де L - ширина розрізаємого листа.

Далі доцільно визначити висотні координати y_{1j} , y_{2j} (див. рис. 3.8, б) ножа перед початком різання, відповідні даним виділеним елементарним обсягами, при цьому для даної схеми необхідно враховувати наявність скруглення, таким чином, з огляду на, що $y_{1j=1} = 0$, для прямолінійної ділянки ріжучої кромки маємо такі вирази:

$$y_{1j} = y_{2j-1}; \quad (3.8)$$

$$y_{2j} = y_{1j} + dy \quad (3.9)$$

$$dy = dx \cdot \operatorname{tg} \alpha. \quad (3.10)$$

Для ділянки зі скругленням:

$$y_{1j} = y_{2j-1}; \quad (3.11)$$

$$y_{2j} = h_n - \left(R - \sqrt{R^2 - \left(\frac{L}{2} - x_{2j} \right)^2} \right) \quad (3.12)$$

де h_n - висота робочої поверхні ріжучої кромки;

R - радіус заокруглення.

Перерахунок координат при j - том положенні ножа здійснюється наступним чином:

$$y_{1ij} = y_{1j} - i \cdot ds \quad (3.13)$$

$$y_{2ij} = y_{2j} - i \cdot ds; \quad (3.14)$$

$$x_{1ij} = x_{1j} = \operatorname{const} \quad (3.15)$$

$$x_{2ij} = x_{2j} = \operatorname{const} \quad (3.16)$$

Для визначення величини сили різання N_i при i -том положенні ножа використовуємо вираз Целікова-Носаля [50; 52], яке після перетворень і уточнення має наступний вигляд:

$$N_i = \sum_{j=1}^n 2\tau_{ij} \cdot F_{ij} \left(1 + z \frac{tg\alpha}{0,6\delta} + \frac{\Delta_H^2 \sigma_b c}{\Delta_H^2 \sigma_b c + 10\delta h^3} \right) \quad (3.17)$$

де τ_{ij} - опір зрізу в рамках кожного j -того виділеного елементарного об'єму $abcd$ площею F_{ij} при j -том положенні ножа;

n - кількість елементарних об'ємів, що складають зрізаєму площу при j -том положенні ножа ($n \leq k$);

σ_b - межа міцності розрізаємого матеріалу;

δ - відносне подовження при випробуванні на розтяг;

Δ_H - бічний зазор між ножами;

c - відстань від площини різу до притиску;

z - коефіцієнт, що враховує вигин відрізуваної частини листа, який можна визначити графічно (див. рис. 3.9) [50], при цьому з метою автоматизації обчислень була отримана наступна апроксимація:

$$z = 0,951 \cdot (1 - e^{(-0,436\lambda)}) \text{ при } \lambda < 15$$

$$z = 0,95 \text{ при } \lambda \geq 15$$

де λ - безрозмірна величина [50], яка визначається з виразу:

$$\lambda = \frac{\alpha \cdot tg\alpha}{\delta h} \quad (3.18)$$

де α - ширина відрізуваної частини листа.

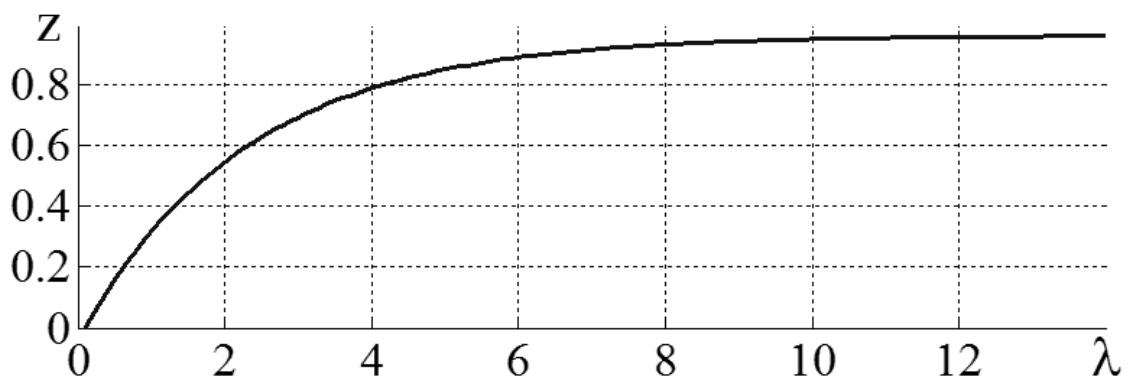


Рисунок 3.9 - Залежність коефіцієнта z від величини λ [50]

Площа j -того виділеного обсягу для i -того положення ножа при відомих відповідних координатах y_{1ij} , y_{2ij} :

$$F_{ij} = \frac{(h - |y_{1ij}|) + (h - |y_{2ij}|)}{2} \cdot dx \quad (3.19)$$

Величину істинного опору зрізу в рамках кожного виділеного елементарного обсягу визначали, виходячи з даних робіт [51; 139] з урахуванням вираження (1.3) наступним чином:

$$\tau_{ij} = \frac{1,41 \cdot \sigma_b}{1,74 - \varepsilon_H} \cdot K_{\varepsilon n}(X_{ij})^{a_\tau \exp\left(\frac{X_{ij}^K}{K^{2K}}\right)} \quad (3.20)$$

де σ_b - межа міцності розрізаємого матеріалу;

X_{ij} - відношення величини відносного впровадження для j -того елементарного об'єму $abcd$ (див. рис. 3.8, б) при i - тому положенні ножа до відносної величини надрізу до відколу ε_H ;

a_τ - степеневий показник, що характеризує форму розподілу опору зрізу [51];
 K - емпіричний коефіцієнт, значення якого на підставі проведених раніше досліджень [51; 138; 139] може бути визначене в таким чином:

$$K = \frac{1}{\varepsilon_H} \quad (3.21)$$

$K_{\varepsilon n}$ - коефіцієнт епюри, що враховуючий нерівномірність розподілу питомого опору зрізу по довжині «ріжучого клина» в залежності від кута нахилу ножа α , значення цього коефіцієнта з метою автоматизації розрахунків в рамках даної роботи рекомендується визначати з наступної математичної апроксимації:

$$K_{\varepsilon n} = (\alpha + 1)^{-0,002(\alpha^{1.1+2,8})^{3,19}} \text{ при } \alpha < 2^\circ \quad (3.22)$$

$$K_{\varepsilon n} = 0,7 \text{ при } \alpha \geq 2^\circ \quad (3.23)$$

В цілому, вираження (3.3) - (3.17) описують повний алгоритм одновимірного математичного моделювання процесу поперечного різання листового металопрокату шевронним ножом зі скругленням, чисельна реалізація якого дозволяє отримувати розподіл значень сили різання в залежності від переміщення ножа, на базі яких представляється можливим визначити максимальне значення цієї величини.

На малюнку 3.10 представлені розрахункові розподіли значень сили різання N в залежності від переміщення ножа S (рис. 3.10, а), а також максимального значення даної величини N_{max} залежно від кута нахилу прямолінійних площин ріжучої кромки шевронного ножа α (рис. 3.10, б), товщини розрізаємого листа h (рис. 3.10, в) і радіусу заокруглення R , представленого в ставленні до h (рис. 3.10, г). Дані розподілу отримані стосовно процесу поперечного різання шевронним ножом зі скругленням, листів з трьох марок сталі: Ст2пс, 35Г2 і 65Г, шляхом чисельного математичного моделювання, із застосуванням розробленого алгоритму, в середовищі програмного комплексу MATLAB.

Аналіз отриманих розподілів дозволив встановити, що застосування шевронного ножа зі скругленням супроводжується істотним зростанням сили різання на завершальних стадіях розділового процесу. Так, при радіусі заокруглення в $100h$ приріст сили становить $\approx 25\%$, в той же час, виходячи з залежностей, представлених на малюнку 3.10, б, впливає, що максимальна величина сили N_{max} , що досягається при різанні найбільш «м'якою» з розглянутих марок сталі ножом з кутом нахилу різальних крайок 1° , порівнянна зі значенням цієї величини, що досягається при різанні листів з більш «твердих» марок ножом з кутом нахилу різальних крайок 3° (при інших рівних параметрах), отже, можливе застосування ножа з меншим кутом нахилу різальних крайок для різання більш «м'яких» марок, що теоретично дозволить підвищити якість готового листа без ризику перевантаження застосовуваних ножиць за рахунок меншої деформації листа, при цьому відношення його товщини до половині розрізаємої ширини повинно бути менше тангенса кута нахилу кромки.

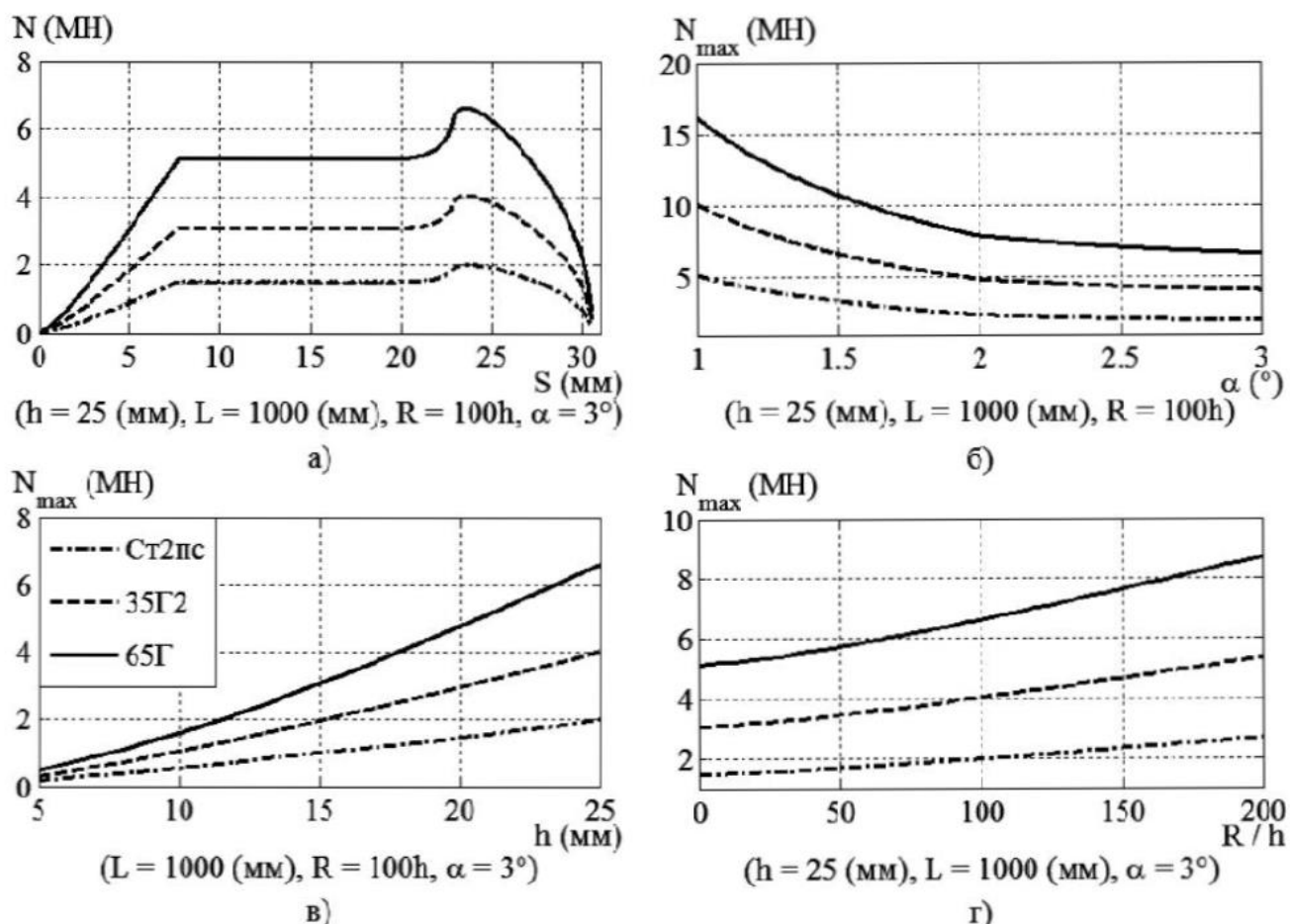
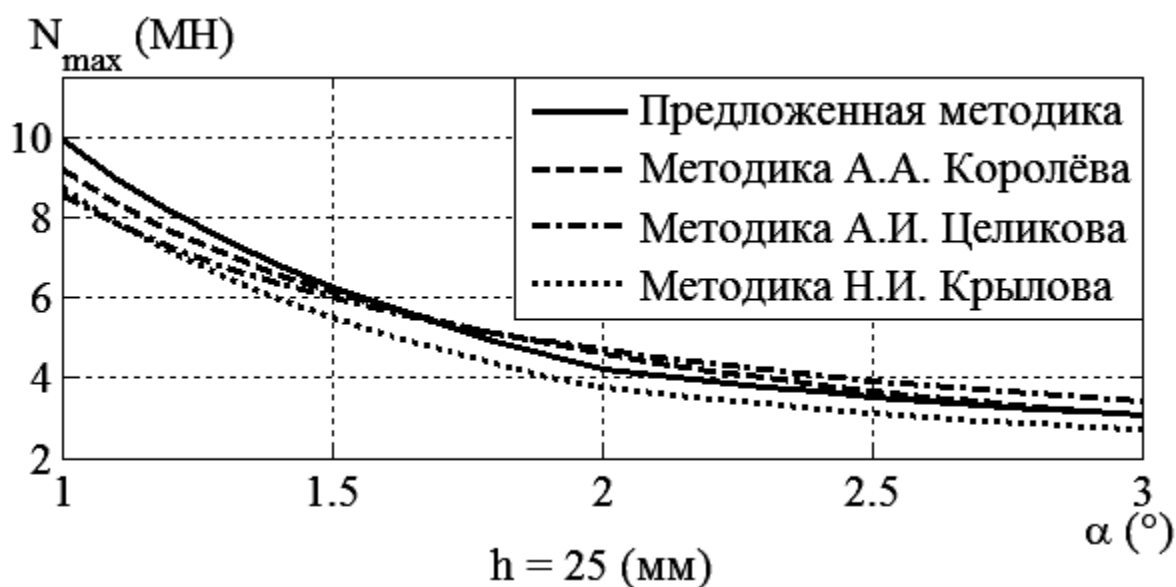
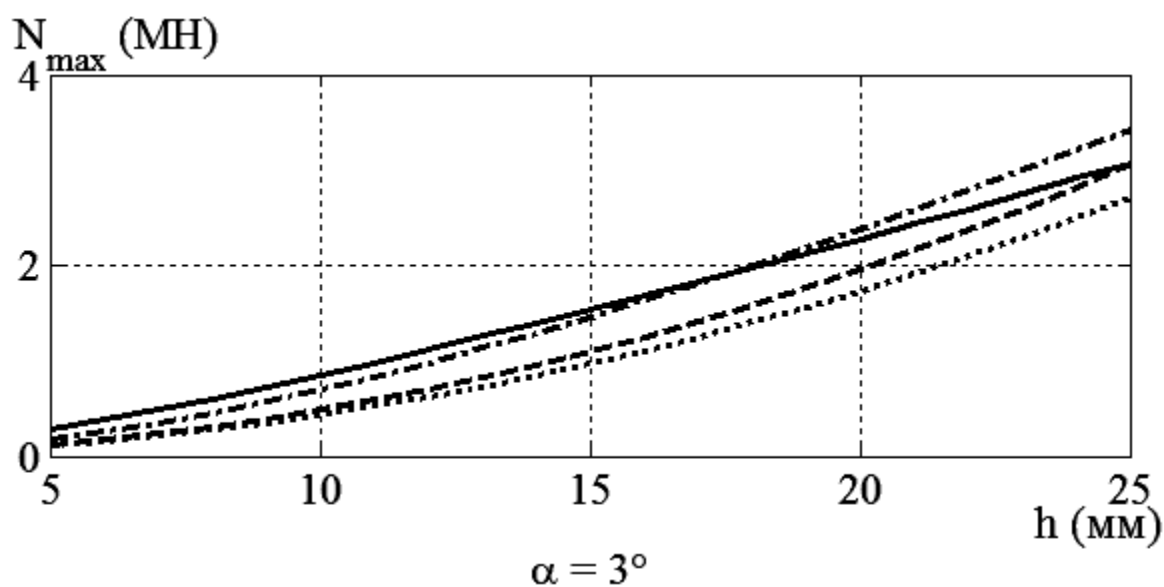


Рисунок 3.10 — Розрахункові розподіли значень сили різання N , отримані для деяких марок сталі в залежності від переміщення ножа S (а) і її максимального значення N_{max} , від: кута α , (б), товщини розрізаємого листа h (в) і відносини радіуса заокруглення R до h (г)

Також проводили порівняльний аналіз розробленої методики з існуючими для попередньої оцінки адекватності отриманих результатів. З цією метою моделювали процес поперечного різання класичним шевронним ножом, варіюючи величиною кута нахилу площин ріжучої кромки α (рис. 3.11, а) і товщини листа h (рис. 3.11, б), із застосуванням описаної методики, а також існуючих методик А. А. Корольова, А. І. Целікова і Н. І. Крилова. Розрахунок проводився стосовно процесу різання листа шириною $= 1000$ мм зі сталі марки 35Г2 ($\sigma_b = 530$ МПа).



а)

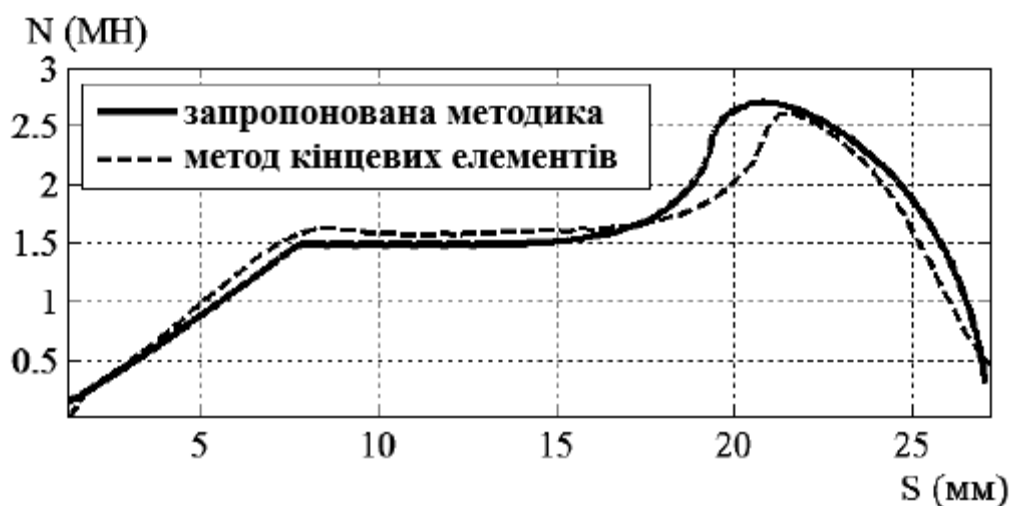


б)

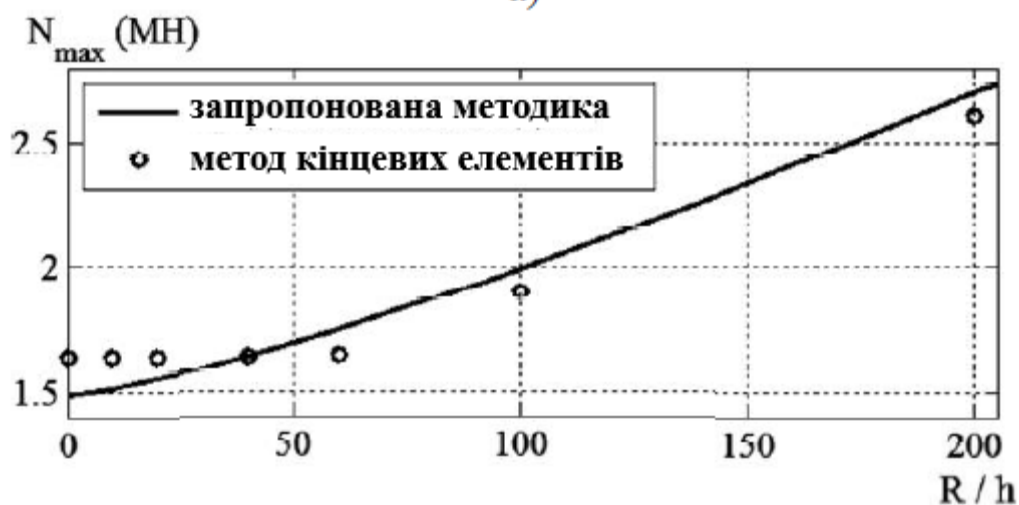
Рисунок 3.11 - Порівняльні теоретичні залежності максимальних значень сили різання N_{max} від кута нахилу різальних крайок шевронного ножа α (а) і товщини розрізаємого листа h (б)

Виходячи з представлених залежностей випливає, що запропонована методика добре узгоджується з існуючими, однак дозволяє більш широко описати розглянуту розділову операцію, дозволяючи моделювати процеси різання як ножом зі скругленням, так і класичним шевронним ножом (в цьому випадку необхідно приймати R близьким до нуля).

Далі проводили порівняльний аналіз розробленої методики з результатами кінцево-елементного моделювання, представленими в підрозділі 3.1. На малюнку 3.12 наведено порівняльні теоретичні розподіли значень сили різання N в залежності від переміщення ножа S (див. рис. 3.12, а) і її максимального значення N_{max} залежно від величини радіуса заокруглення R , представленої в відношенні до товщини листа h (див. рис. 3.12, б)



а)



б)

Рисунок 3.12 - Порівняльні теоретичні розподіли значень сили різання N в залежності від переміщення ножа S (а) і її максимального значення N_{max} залежно від величини радіуса заокруглення R , представленої у відношенні до товщини листа h

(б)

Дані залежності отримано теоретично із застосуванням методу скінченних елементів, а також розробленої методики, стосовно до процесу різання листового металопрокату товщиною $h = 25$ мм, шириною $L = 1000$ мм, зі сталі Ст2пс ($\sigma_b = 330$ МПа) шевронним ножом зі скругленням.

Узагальнений аналіз отриманих залежностей свідчить про те, що результати моделювання, отримані із застосуванням запропонованої методики, добре узгоджуються з отриманими раніше при кінцево-елементному моделюванні, відміна значень при цьому становить менше 5%, отже, розроблена двовірна математична модель може бути використана як альтернатива застосуванню МСЕ при визначенні енергосилових параметрів процесу поперечного різання листового металопрокату шевронним ножом зі скругленням в вершині сходження похилих прямолінійних площин ріжучої кромки.

3.3 Дослідження обладнання поперечного різання

Одним з головних показників з точки зору, промислового застосування ножиць є їх надійність, при цьому для її забезпечення необхідно мати уявлення щодо спектра робочих навантажень при реалізації розділової операції. У той же час виконання даного завдання в промислових умовах є досить складним, що робить доцільним застосування для її вирішення методу імітаційного (статистичного) моделювання (метод «Монте-Карло»).

В рамках даної роботи на основі розробленого раніше алгоритму автоматизованого розрахунку максимального значення сили для випадку поперечної різки листових розкатів шевронним ножом зі скругленням (див. підрозд. 3.2), була отримана імітаційна математична модель, чисельна реалізація якої дозволила (на базі алгоритму генерування псевдовипадкових рівномірно і нормально розподілених чисел і відповідної статистичної обробки отриманих даних) попередньо оцінити кількісні і якісні закономірності варіацій основних технологічних параметрів процесу поперечного різання листового металопрокату шевронним ножом зі скругленням [140; 141].

Застосування методу Монте-Карло передбачає «розіграш» різних сполучень вихідних параметрів, для чого генерували послідовність псевдовипадкових рівномірно розподілених чисел c_k в діапазоні $0,0 \dots 1,0$, використовуючи стандартний функціонал середовища MATLAB. Далі, використовуючи рекомендації, наведені в роботах [51; 140; 141], отримували нормально розподілені числа β_k в діапазоні -

3,0...3,0 з математичним очікуванням, рівним нулю, і середнім квадратичним відхиленням, рівним одиниці:

$$\beta_k = \frac{3 - \sqrt{9 - 12\pi\mu_K^2}}{\mu_K\sqrt{2\pi}} \text{ при } |\mu_K| \leq 0,487 \quad (3.24)$$

$$\beta_k = \frac{|\mu_K|}{\mu_K} [2,25867 + 57,0256(|\mu_K| - 0,487)] \text{ при } |\mu_K| \geq 0,487 \quad (3.25)$$

де $\mu_K = c_k - 0,5$.

Нормально розподілені числа y_k з заданими значеннями математичного очікування $\bar{y}$ і коефіцієнта варіації v_k отримували за формулою:

$$y_k = \bar{y}(1 + \beta_k v_k) \quad (3.26)$$

Безпосередньо моделювання спектра робочих навантажень процесу поперечного різання листових розкатів шевронним ножом зі скругленням реалізовувалися шляхом багаторазового розігрування за формулами (3.36) - (3.38) величин вихідних параметрів розділового процесу з подальшим визначенням максимального значення сили різання для кожної їх комбінації на базі математичної моделі, розробленої в підрозділі 3.2.

В ході моделювання варіювали наступні параметри досліджуваного технологічного процесу: товщина розрізаємого листа h , межа міцності матеріалу σ_b , кут нахилу прямолінійних площин ріжучої кромки α , і зазор між ножами Δ , при цьому в процесі імітаційного моделювання номінальні значення даних вихідних параметрів не змінювали. Такий підхід за своєю суттю відповідає припущенням про відпрацювання оператором або системою регулювання тільки тих збурень, достовірна аналітична оцінка характеру виникнення яких є неможливою.

При розробці і чисельної реалізації імітаційної математичної моделі брали нормальний закон розподілу вихідних параметрів, а їх номінальні значення і коефіцієнти варіації - на основі відомих рекомендацій [55-68; 138].

Подальша обробка масивів значень максимальної сили різання проводилась із застосуванням методів математичної статистики [132; 133], за результатами якої була побудована розрахункова гістограма розподілу даного показника. Програмна реалізація викладеного вище алгоритму імітаційного математичного моделювання була виконана в середовищі системи автоматизації математичних розрахунків MATLAB. Моделювання проводилося стосовно процесу поперечного рі-

зання листових розкатів шевронним ножом зі скругленим радіусом $R = 2500$ мм смуг зі сталі СтЗсп для номінальних значень вихідної товщини $\bar{h} = 25$ мм, межі міцності $\bar{\sigma}_b = 430$ МПа, кута нахилу прямолінійних площин ріжучої кромки $\bar{\alpha} = 3^\circ$ і величини зазору між ножами $\bar{\Delta} = 0,5$ мм. Виходячи з умов промислової реалізації процесу, були встановлені наступні коефіцієнти варіації вихідних параметрів: товщина розрізаємого листа - $v_h = 0,004$, Межа міцності - $v_\sigma = 0,058$, кут нахилу прямолінійних площин ріжучої кромки - $v_\alpha = 0,017$, величина зазору між ножами $v_\Delta = 0,1$

Для кожної комбінації величин вихідних параметрів процесу поперечного різання листового металопрокату шевронним ножом зі скругленням розраховувалася величина максимальної сили різання із застосуванням математичної моделі, розробленої в підрозділі 3.2.

Оцінка впливу варіації вихідних параметрів на коефіцієнт варіації максимального значення сили різання v_N здійснювалася шляхом чисельної реалізації імітаційної моделі за умови варіювання одного з вхідних параметрів і номінальних значеннях інших величин. Отримані розрахункові розподіли величини v_N представлені на Рисунку 3.16. аналіз даних розподілів дозволив встановити, що основний вплив на величину коефіцієнта варіації максимального значення сили різання надають величини коефіцієнтів варіації товщини і межі міцності розрізаємого листа, при цьому найменше на досліджувану величину впливає зміна коефіцієнта варіації величини зазору між ножами.

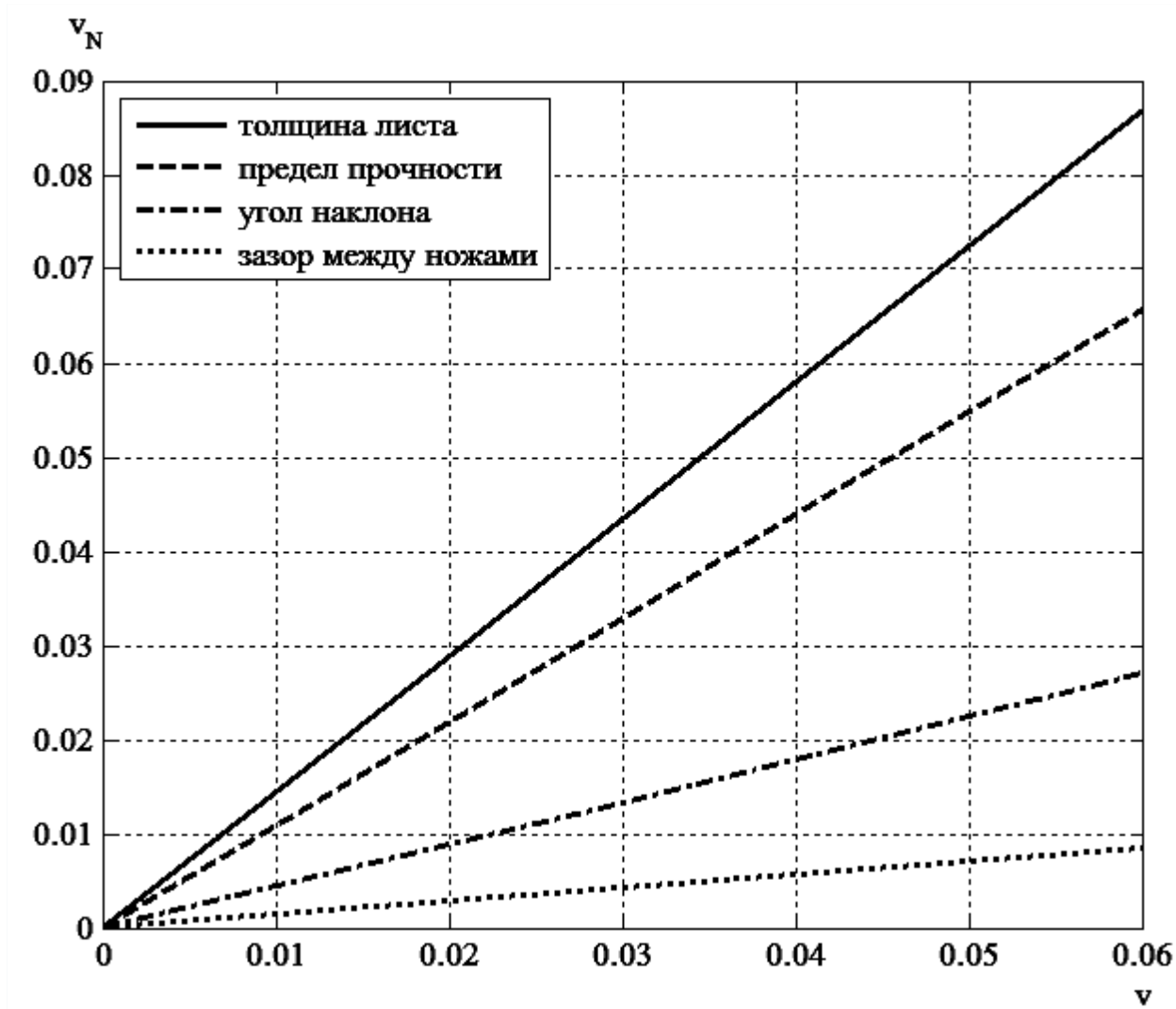


Рисунок 3.16 — Розрахункові розподілу коефіцієнта варіації значення сили різання v_N в залежності від зміни коефіцієнтів варіації вихідних параметрів

На рисунку 3.17 представлені гістограми розподілу значень вихідних параметрів з відповідними коефіцієнтами варіації. На основі представлених гістограм, можна зробити висновок, що дані розподілу дійсно відповідають нормальному закону, а їх середні вибіркові значення практично еквівалентні номінальним.

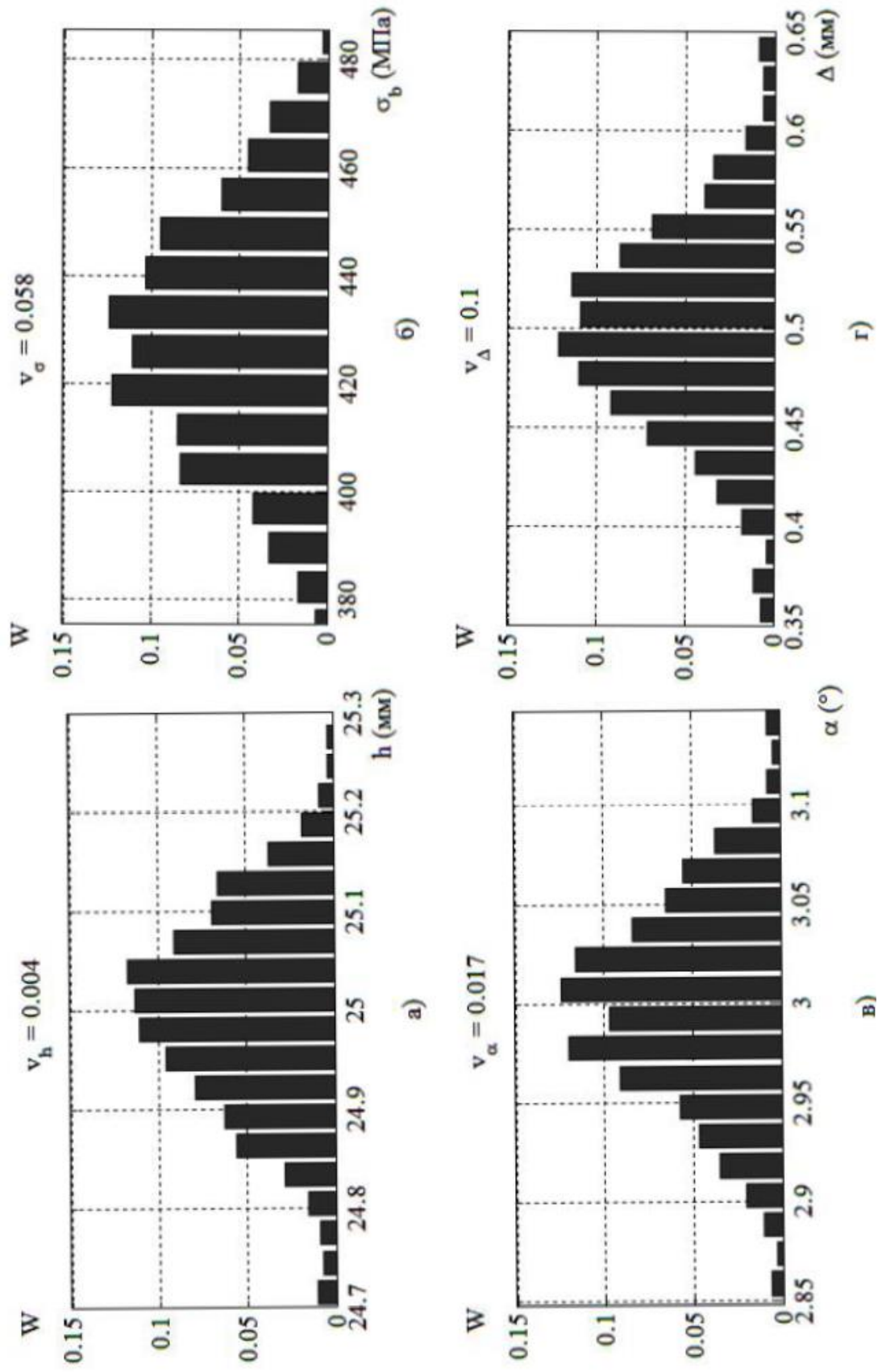


Рисунок 3.17 - Розрахункові гістограми розподілу значень товщини h (а), межі міцності σ (б), кута нахилу прямолінійних площин ріжучої кромки α (в) і величини зазору між ножами Δ (г)

На рисунку 3.18 представлена гістограма розподілу максимальних значень сили N_{max} для випадку поперечного різання товстолистого металопрокату шевронним ножом зі скругленням, отримана відповідно до прийнятих розподілами основних параметрів даного технологічного процесу.

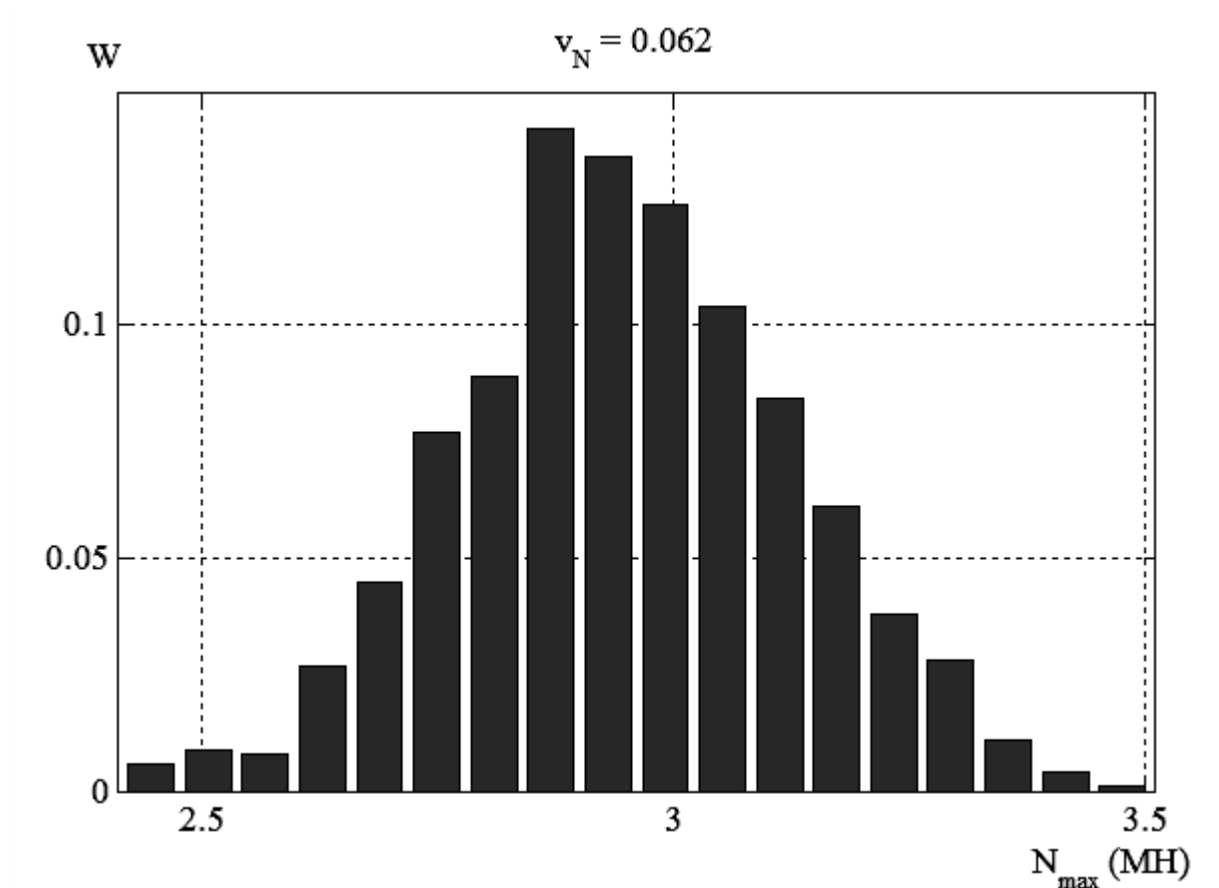


Рисунок 3.18 - Гістограма розподілу розрахункових максимальних значень сили N_{max} , для випадку поперечного різання товстолистого металопрокату шевронним ножом зі скругленням

Аналіз отриманої гістограми свідчить про те, що розподіл величини максимальної сили різання відповідає нормальному закону з коефіцієнтом варіації $V_N=0,062$, при цьому для практичних розрахунків (з урахуванням щільності ймовірності для даного розподілу) значення максимальної сили різання слід приймати не менше $1,12\bar{N}_{max}$, що дозволить врахувати більше 96% можливих випадків відхилення основних технологічних параметрів розглянутого розділового процесу, від їх номінальних значень.

Як і в попередньому випадку при імітаційному моделюванні процесу поздовжнього різання листових розкатів на дискових ножицях з одним приводним ножом з пари, реалізовувався «розіграш» комбінацій величин вихідних параметрів, для чого застосовували алгоритм, аналогічний розглянутому в попередньому пункті. При цьому з огляду на схожість розподілів величин моментів (див. Рис. 3.15) було вирішено розглянути схему приводу ножиць з одним верхнім приводним ножом з пари. Стосовно до даної розділової операції варіювали наступні параметри: товщину металу, що розрізається листа h , межа міцності матеріалу σ_b , ширину відрізаємої кромки a , і коефіцієнт тертя f . Імітаційне моделювання розглянутого технологічного процесу проводили на базі методики, розробленої в підрозділі 3.3, для випадку поздовжнього різання листового прокату в холодному стані з номінальною товщиною $\bar{h} = 25$ мм, зі сталі марки Ст3сп з межею міцності $\bar{\sigma}_b = 430$ МПа, на дискових ножицях з одним (верхнім з пари) приводним ножом діаметром 1000 мм, при цьому номінальне значення коефіцієнта тертя між дисковими ножами і листом приймалося $\bar{f} = 0,15$, ширина відрізуваної кромки становила $\bar{a} = 50$ мм, кут нахилу осі дисків в напрямку руху листа приймався 9° , а зазор між дисками в похилій площині становив 5 мм. Програмна реалізація імітаційної моделі виконувалася в середовищі системи автоматизації математичних розрахунків MATLAB.

Для оцінки впливу варіації вихідних параметрів на коефіцієнт варіації значення моменту різання V_m одним (верхнім) приводним ножом з пари, здійснювався розрахунок основних енергосилових показників процесу різання за умови варіювання одного з вхідних параметрів і номінальних значеннях інших величин. Отримані розрахункові розподіли величини V_m представлені на Рисунку 3.19. Аналіз даних розподілів дозволив встановити, що основний вплив на величину коефіцієнта варіації значення моменту різання, надають величини коефіцієнтів варіації товщини і межі міцності розрізаємого листа.

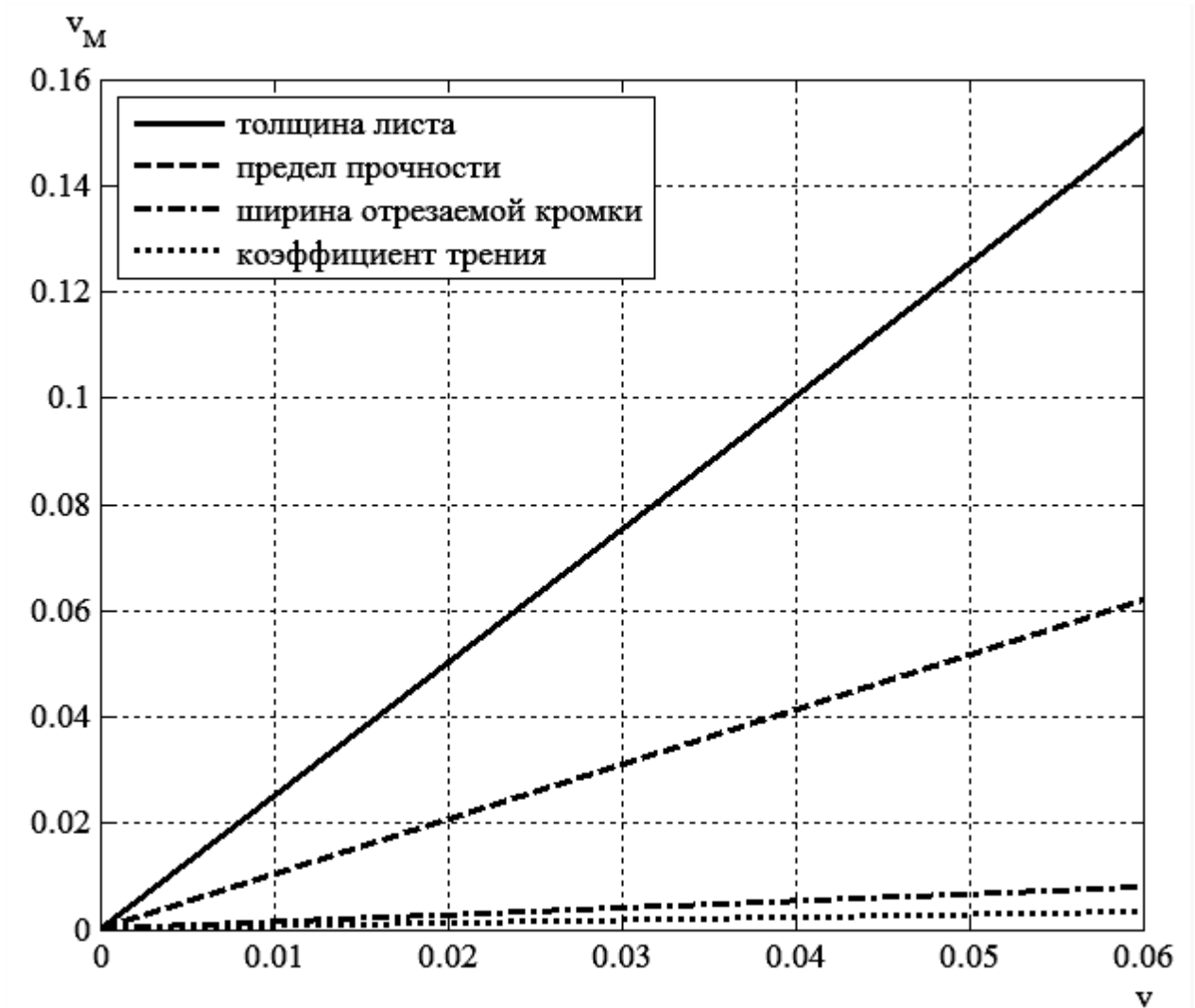


Рисунок 3.19 - Розрахункові розподіли коефіцієнта варіації моменту різання V_m в залежності від зміни коефіцієнтів варіації вихідних параметрів

Значеннями коефіцієнтів варіації вихідних параметрів задавались виходячи з умов промислової реалізації процесу поздовжнього різання товстолистового прокату на дискових ножицях по відомим рекомендаціям [51; 59; 60]: $V_h = 0,004$; $V_\sigma = 0,058$; $V_\alpha = 0,1$; $V_f = 0,15$, при цьому розподілу змінних параметрів підкоряли нормальному закону (рис. 3.20)

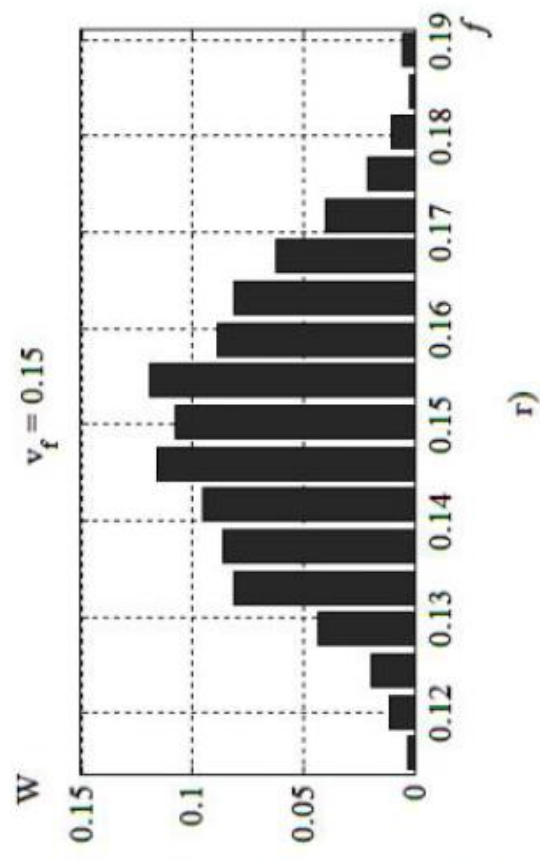
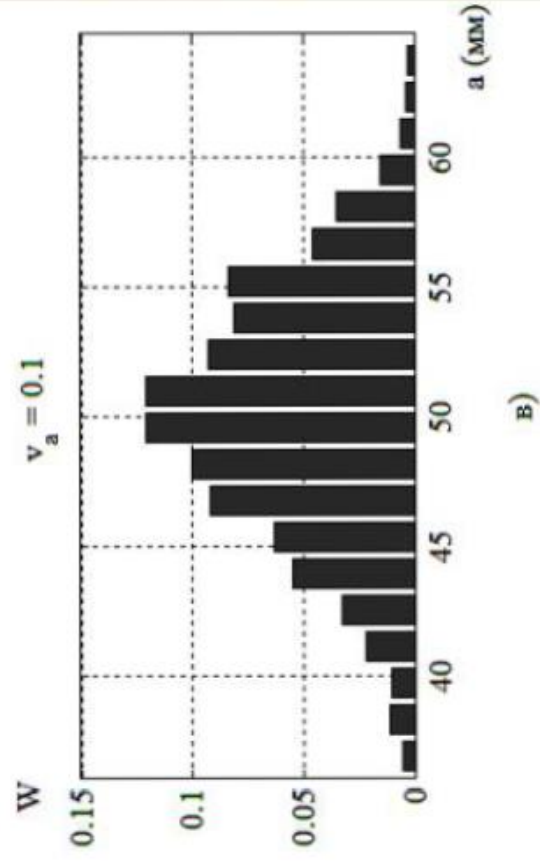
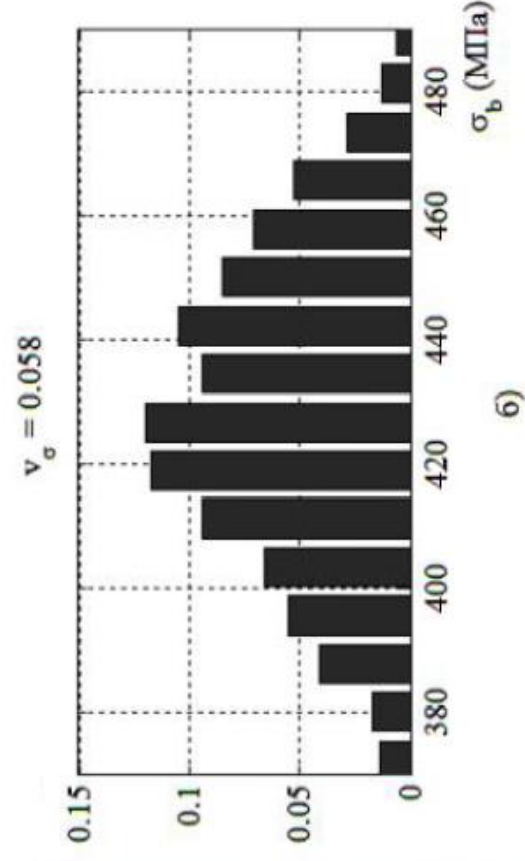
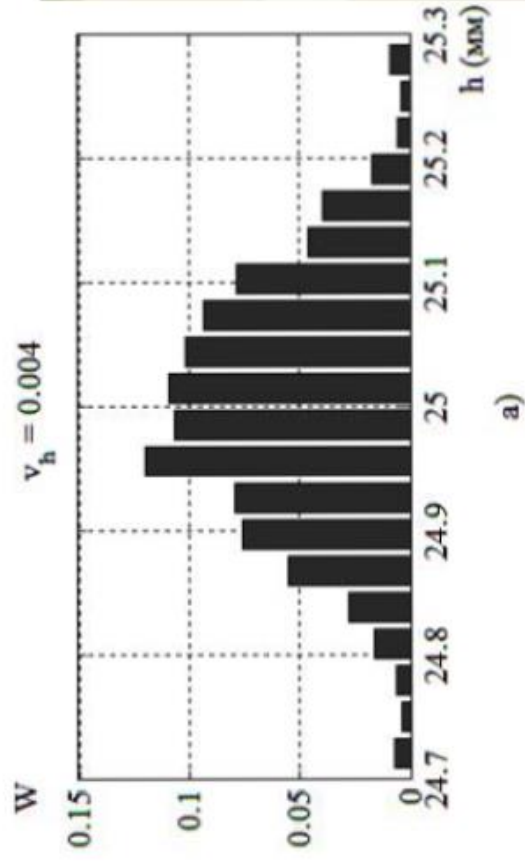


Рисунок 3.20 — Розрахункові гістограми розподілу значень вихідної товщини h (а), межі міцності σ (б), ширини відрізаємої кромки a (в) і величини коефіцієнта тертя f (г)

На рисунку 3.21 представлена гістограма розподілу значень моменту M для випадку обрізки бічних крайок товстолистових гуркотів на дискових ножицях з одним (верхнім) приводним ножом з пари, отримана в відповідності до прийнятих розподілами основних параметрів для даного технологічного процесу.

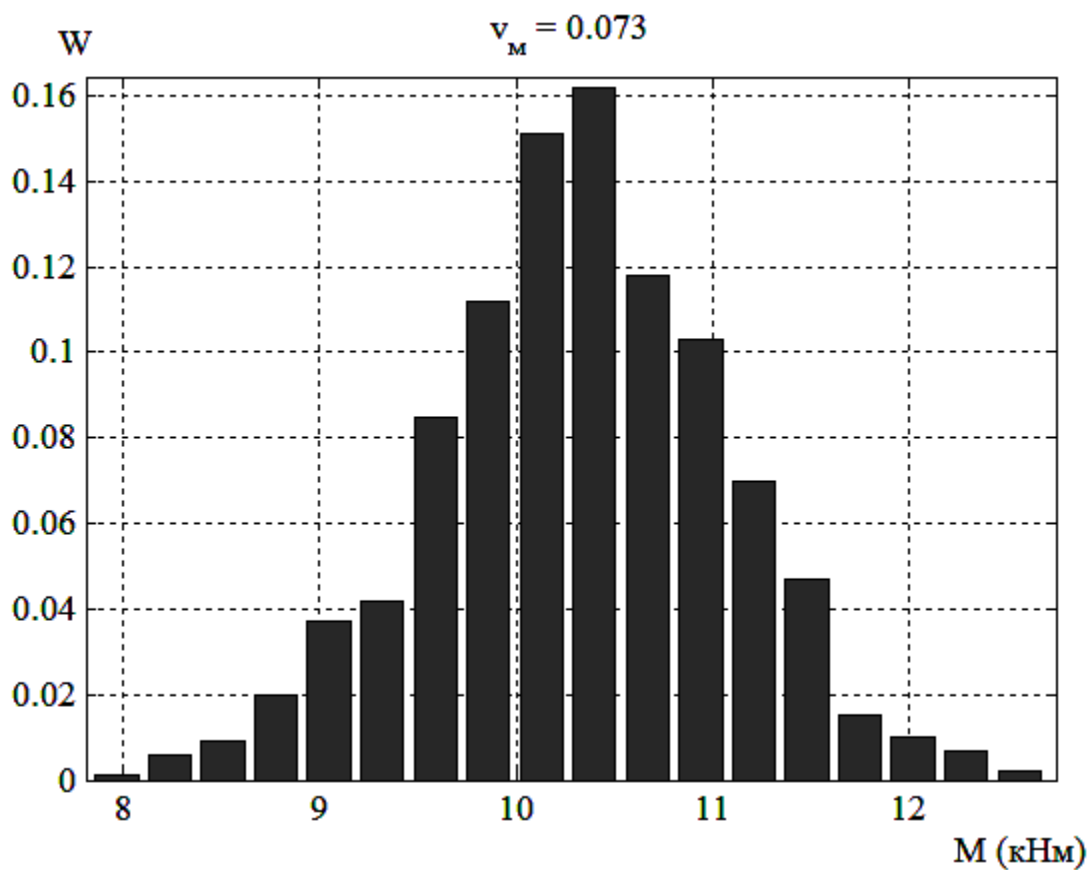


Рисунок 3.21 - Розрахункова гістограма розподілу значень моменту M , для випадку поздовжнього різання листових розкатів на дискових ножицях з одним (верхнім) приводним ножом з пари

З даної гістограми випливає, що розподіл величини моменту різання підпорядковується нормальному закону з коефіцієнтом варіації $V_M = 0,073$, при цьому для практичних розрахунків значення моменту різання слід приймати не менше $1,15\bar{M}$, що дозволить даному випадку врахувати понад 97% можливих випадків відхилення основних технологічних параметрів розглянутого розділового процесу, від їх номінальних значень.

Проведене в рамках даної роботи імітаційне математичне моделювання розглянутих процесів поздовжнього і поперечного різання листового металопрокату

дозволило оцінити можливий спектр робочих навантажень на вузли ножиць при реалізації даних розділових операцій що згодом, може бути використано для підвищення надійності застосовуваного обладнання, а також попередньої оцінки прийнятих проектно конструкторських рішень.

3.4 Висновки

1. Підвищення якості товстолистого металопрокату, що розрізає на ножицях, можливо шляхом застосування для поперечного різання шевронного ножа з конструктивним елементом в вершині сходження похилих прямолінійних площин ріжучої кромки, застосування якого супроводжується збільшенням сили різання в завершальній стадії розділового процесу. При цьому найбільш перспективною є система шевронного ножа соскругленієм, застосування якого, теоретично, дозволяє домогтися більшого (на 7,4%) зниження величини залишкової деформації листа в порівнянні з шевронним ножом конструкції «Северсталь», при рівному максимальному значенні сили різання, теоретична оцінка якого можлива з застосуванням розробленої в рамках даної роботи методики виходячи з розподілу цієї величини в залежності від переміщення ножа при різанні.

2. З результатів проведеного імітаційного моделювання спектра робочих навантажень процесів поперечного різання листового металопрокату слід, що отримуються із застосуванням розроблених методик розрахункові значення максимально значення сили N_{max} і моменту M різання з точки зору надійності проектного обладнання необхідно збільшувати на 12% і 15%, відповідно.

4 РОЗДІЛ 4. РОЗРОБКА РЕКОМЕНДАЦІЙ

4.1 Вдосконалення процесів поперечного різання

Очевидно, що одним з основних технологічних параметрів процесу поперечного різання листового металопрокату шевронним ножом із заокруглення є коефіцієнт K_R , що представляє відношення величини радіуса заокруглення R до товщини h розрізаємого листа. Величина даного коефіцієнта має суттєвий вплив на енергосилові параметри розділового процесу, зокрема, вона визначає величину радіуса заокруглення, наявність якого, як було зазначено, призводить до істотного збільшення значення сили різання в завершальній стадії розділової операції. При цьому критичну величину коефіцієнта K_R , стосовно до конкретних ножиць, можна визначити, виходячи з умови допустимого перевантаження, представленого в наступному вигляді:

$$K_R = \max \text{ при } N_{\max} = N_{\text{steady}} \cdot K_n \quad (4.1)$$

де $N_{\max}$ - максимальне значення сили різання при $K_R = \max$;

N_{steady} - значення сили при сталому процесі, еквівалентном, по суті, процесу поперечного різання класичним шевронним ножом;

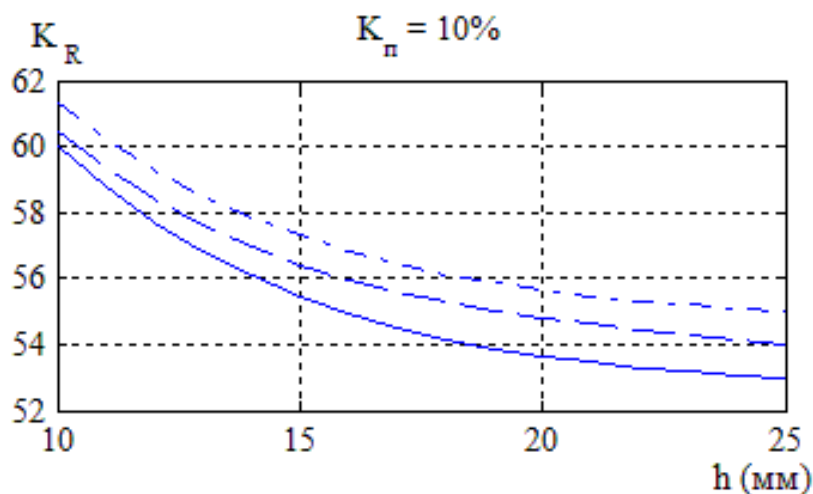
K_n - допустимий коефіцієнт короткочасного перевантаження, значення якого визначається індивідуально для конкретних ножиць в залежності від типу приводу і їх конструктивних особливостей.

В рамках даної роботи, для визначення рекомендованих максимально допустимих значень коефіцієнта K_R при відомому значенні K_n , на підставі розробленої математичної моделі процесу поперечного різання листового металопрокату шевронним ножом із заокругленням (див. Підрозд. 3.2), була сформована ітераційна процедура, що дозволяє при заданих вхідних параметрах виконати умову. На рисунку 4.2 представлені розрахункові залежності рекомендованого максимально допустимого значення коефіцієнта K_R від товщини матеріалу, що розрізаємого h , отримані для трьох умовних марок сталі (з межею міцності σ_b 300, 500 і 1000 МПа) для наступних величин коефіцієнта перевантаження: $K_n = 10$ % (см. рис. 4.2, а), $K_n = 15$ % (см. рис. 5.2, б), $K_n = 20$ % (см. рис. 4.2, в), кут нахилу прямолінійних площин ріжучої кромки для всіх випадків приймався рівним 3° . Також з метою оцінки ефективності застосування шевронного ножа із заокругленням доцільно для розподілів, наведених на рисунку 4.2, визначити відповідні їм величи-

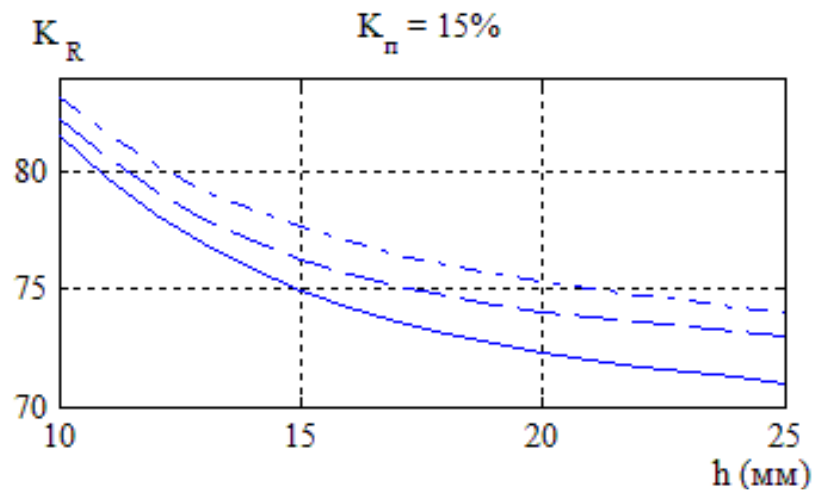
ни залишкової деформації готового листа, що представляється можливим виходячи з апроксимації, отриманої за результатами проведених в рамках даної роботи експериментальних досліджень. На рисунку 4.3 представлені розрахункові розподіли величини залишкової деформації Δ (представлені в ставленні до її величини Δ_0 , що досягається при різанні класичним шевронним ножом при однакових інших параметрах процесу різання), отримані, виходячи з виразу (4.1), для розподілів, представлених на рисунку 4.2, стосовно різанню листових розкатів шириною $L = 1000$ мм. Чисельний приклад щодо визначення рекомендованих максимально допустимих значень коефіцієнта K_R при $K_n = 15\%$ для зазначених умов наведено в таблиці 4.1.

Таблиця 4.1 - Рекомендовані максимально допустимі значення коефіцієнта K_R при $K_n = 15\%$

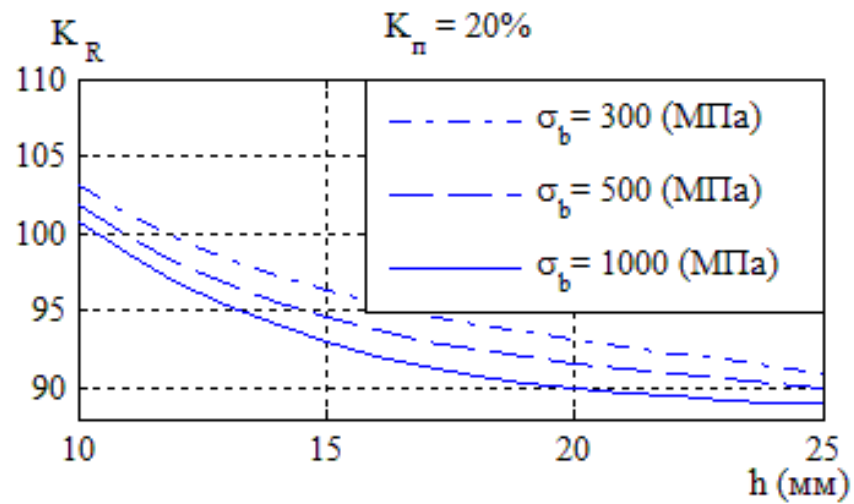
Межа міцності σ_b (МПа)	Товщина листа h (мм)			
	10	15	20	25
300	83,13	77,61	75,31	74,01
500	82,24	76,26	74,04	73,12
1000	81,47	74,95	72,30	71,04



a)

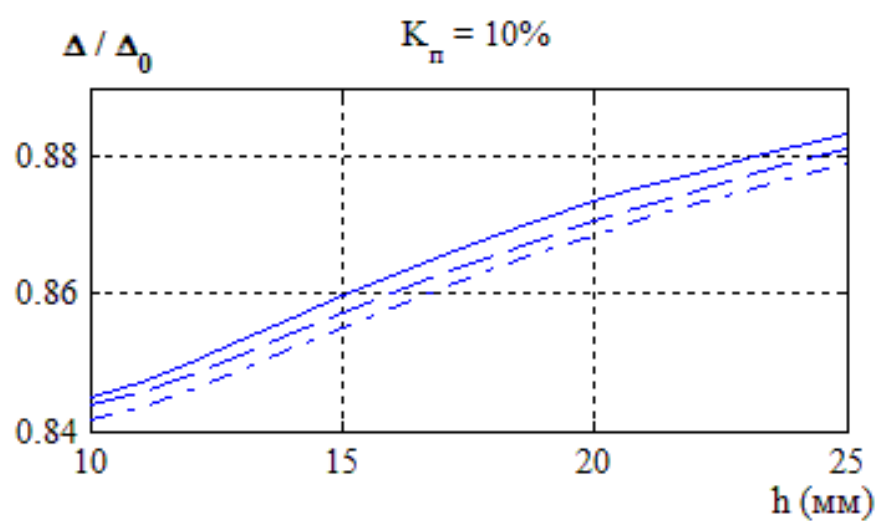


б)

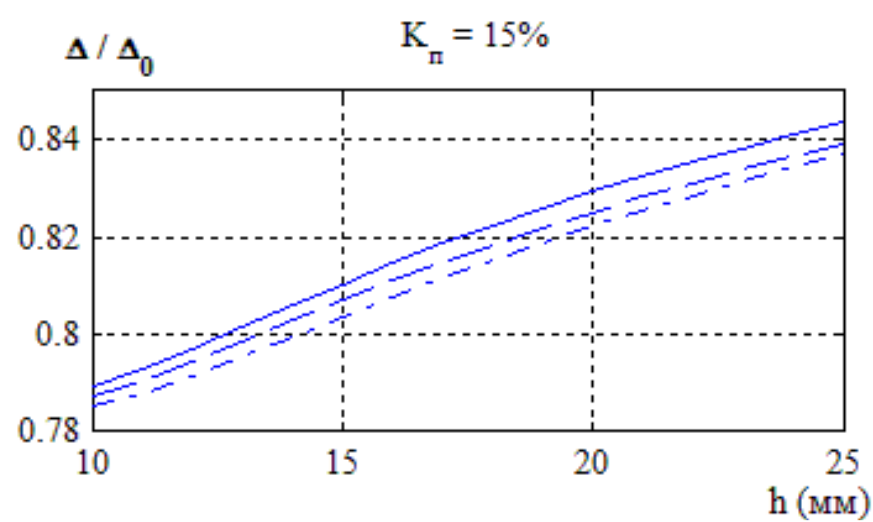


в)

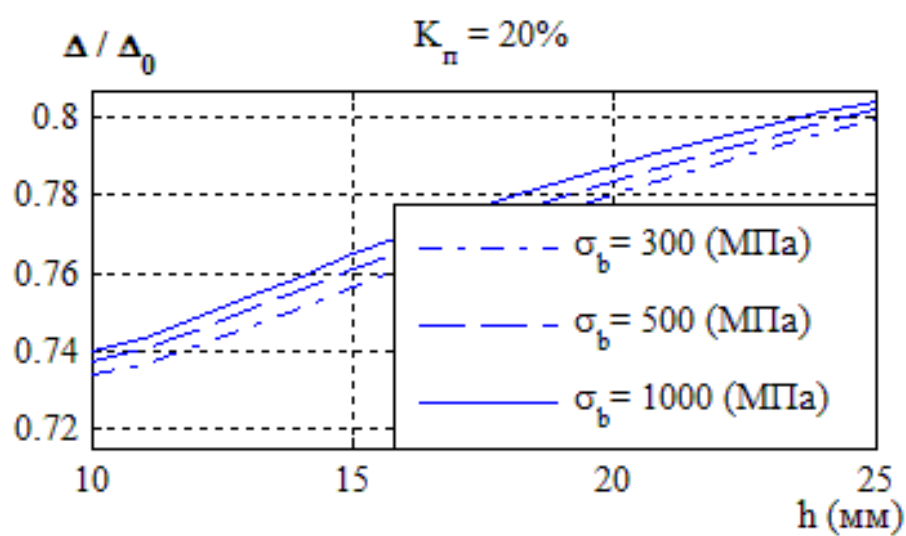
Рисунок 4.2 - Розрахункові розподіли рекомендованих значень коефіцієнта K_R в залежності від товщини розрізаемого матеріалу h , отримані для трьох умовних марок сталі при зазначених величинах коефіцієнта перевантаження K_n



a)



б)



B)

Рисунок 4.3 - Розрахункові розподіли величини відносин Δ/Δ_0 в залежності від товщини що розрізаємого матеріалу h , отримані для трьох умовних марок сталі при зазначених величинах коефіцієнта перевантаження K_n

При цьому, як зазначалося в підрозділі 3.2 для випадку поперечного різання шевронним ножом листів з порівняно «м'яких» марок сталі (з межею міцності нижче максимально допустимого для конкретних ножиць при максимальній товщині розрізаємого листа) існує можливість застосування шевронного ножа з меншим кутом нахилу прямолінійних площин ріжучої кромки без перевищення максимально допустимого (для конкретних ножиць) значення сили різання, що також дозволить знизити величину залишкової деформації листа. У той же час мінімально допустиме значення кута нахилу прямолінійних площин ріжучої кромки шевронного ножа для конкретних умов різання може бути визначено з наступної умови:

$$\alpha = \min \text{ при } N = N_{max} \quad (4.2)$$

де N_{max} - максимальне значення сили, що досягається при різанні листів максимальної товщини, з найбільш «твердої» марки сталі (допускаємих до різання на конкретних ножицях), при максимальному значенні кута нахилу прямолінійних площин ріжучої кромки шевронного ножа.

В рамках даної роботи виходячи з умови на базі розробленої математичної моделі процесу поперечного різання листового металопрокату шевронним ножом (див. підрозд. 3.2), була сформована ітераційна процедура, виконання якої дозволило отримати рекомендовані (з точки зору якості готового листа) значення величини кута нахилу прямолінійних площин ріжучої кромки шевронного для випадку поперечного різання листів зі сталей з межею міцності $\sigma_b = 300... 1000$ МПа.

На рисунку 4.4 представлено розрахункове розподілення рекомендованих значень кута нахилу прямолінійних площин ріжучої кромки шевронного ножа в залежності від межі міцності σ_b розрізаємого матеріала, отримані стосовно процесу різання листового металопрокату товщиною 25 мм класичним шевронним ножом, при цьому в якості максимально допустимої сили різання N_{max} брали значення цієї величини, досягається при різанні листів з межею міцності $\sigma_b = 1000$ МПа, шевронним ножом з максимальним кутом нахилу прямолінійних площин ріжучої кромки $\alpha_{max} = 3^\circ$.

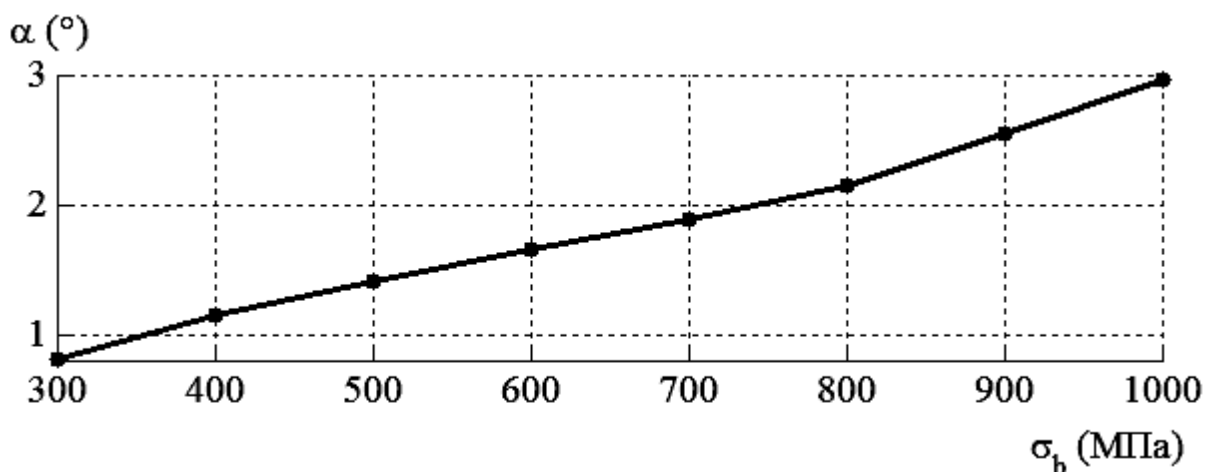


Рисунок 4.4 - Розрахунковий розподіл рекомендованих значень кута α нахилу прямолінійних площин ріжучої кромки шевронного ножа в залежності від межі міцності σ_b розрізаємого матеріала

Також, з метою оцінки впливу зниження кута нахилу прямолінійних площин ріжучої кромки шевронного ножа на величину залишкової деформації готового листа, на базі розробленої кінцево-елементної моделі процесу поперечного різання листового металопрокату шевронним ножом (див. підрозд. 3.1), отримані розподіли величини залишкової деформації листа Δ в залежності від кута α нахилу прямолінійних площин ріжучої кромки шевронного ножа. Дані розподілу (див. Рис. 5.5) отримані стосовно процесу поперечного різання листового металопрокату товщиною 25 мм з трьох умовних марок сталі з межею міцності σ_b 300, 500 і 1000 МПа класичним шевронним ножом з кутом нахилу прямолінійних площин ріжучої кромки 1°, 2°, 3°.

З отриманих розподілів слідує, що для різання листів з сталей з межею міцності $\sigma_b < 750$ МПа при зазначених умовах реалізації розділового процесу, рекомендований кут нахилу прямолінійних площин ріжучої кромки застосовуваного шевронного ножа становить $\alpha < 2^\circ$, при цьому зменшення кута нахилу на один градус в даних умовах дозволяє знизити величину залишкової деформації готового листа на 60 ... 68%.

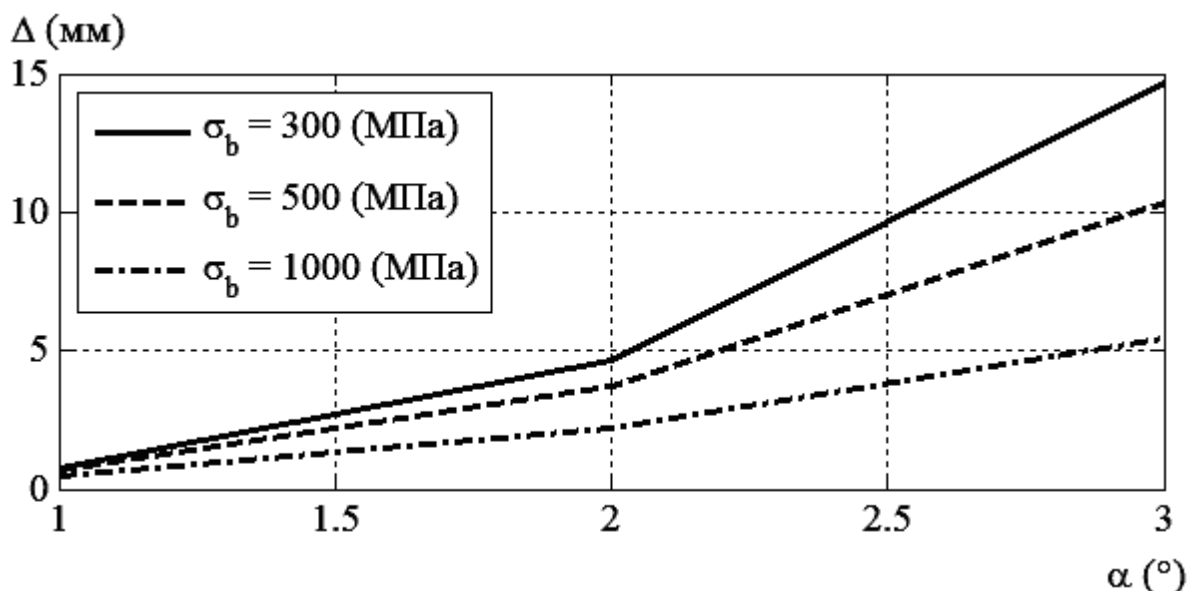


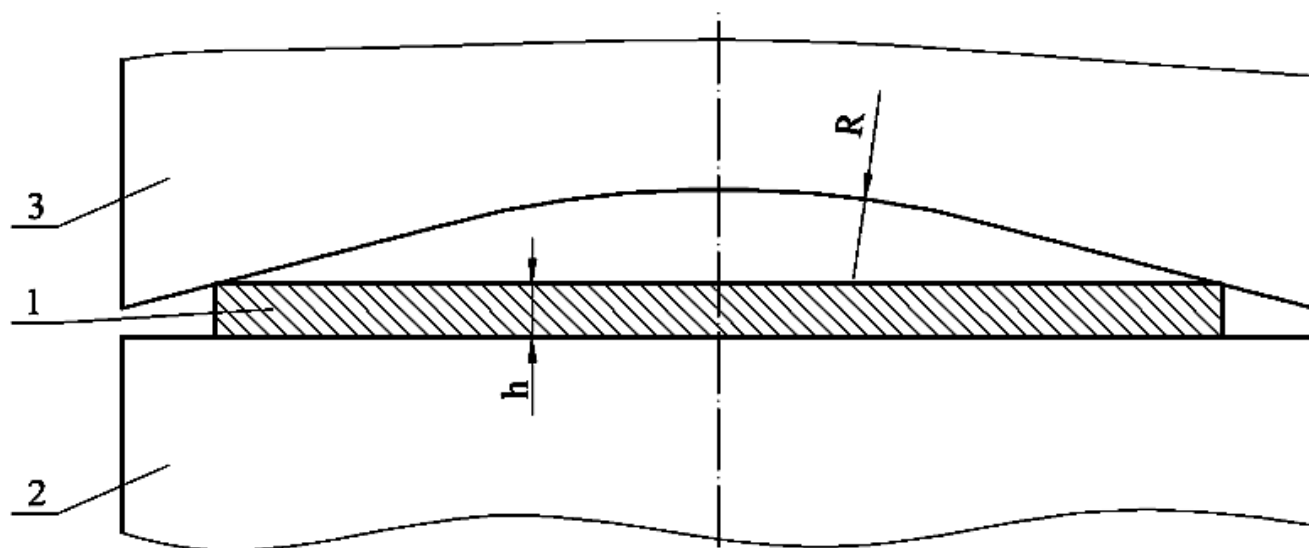
Рисунок 4.5 - Розподіл величин залишкової деформації листа в залежності від кута нахилу прямолінійних площин ріжучої кромки шевронного ножа

4.2 Вдосконалення обладнання поперечного різання

З результатів проведених теоретичних і експериментальних досліджень процесу поперечного різання листового металопрокату шевронним ножом впливає, що одним з напрямків для подальшого розвитку даної операції може служити розробка нової конструкції шевронного ножа, що дозволяє знизити величину залишкової деформації відрізуваної частини листа, що і було покладено в основу при розробці рекомендацій щодо вдосконалення досліджуваної розділової операції.

Проведений аналіз існуючих проектно-конструкторських рішень (див. підрозд. 1.4), а також результати виконаних в рамках даної роботи досліджень дозволили розробити технічне рішення [142], спрямоване на зниження величини залишкової деформації відрізуваної частини листа в разі поперечного різання листового металопрокату шевронним ножом.

Суть запропонованого технічного рішення полягає в тому, що для поперечного різання листового металопрокату застосовують ножиці з встановленим комплектом з двох ножів при цьому один виконаний з прямолінійною, а другий з шевронною формою ріжучої кромки, що відрізняється від класичного шевронного ножа тим, що в вершині сходження похилих прямолінійних площин його ріжучої кромки виконано скруглення радіусом R . Загальний вигляд запропонованого комплекту ножів представлений на рисунку 4.6.



1 - розрізаємий лист товщиною h ; 2 - ніж з прямолінійною ріжучою кромкою;

3 - шевронний ніж із заокругленням радіусом R

Рисунок 4.6 - Комплект ножів для поперечного різання листового металопрокату, що містить шевронний ніж із заокругленням

Величину радіусу заокруглення R в даному випадку доцільно представити в залежності від товщини металу розрізаємого листа h наступним чином:

$$R = K_R \cdot h$$

де K_R - коефіцієнт, значення якого визначається енергосиловими параметрами процесу різання.

За результатами теоретичних досліджень, проведених в підрозділах 3.1 і 3.2, було встановлено, що застосування шевронного ножа зі заокругленням для поперечного різання листового прокату характеризується значним збільшенням значення сили в завершальній стадії розділової операції. Отже, необхідна розробка рекомендацій щодо величини коефіцієнта K_R , реалізація якої можлива на базі розробленої в підрозділі 3.2 математичної моделі, яка описує енергосилові параметри процесу поперечного різання листового металопрокату шевронним ножом із заокругленням.

4.3 Висновки

1. Виходячи з факту, що застосування шевронного ножа зі скругленням для поперечного різання листового металопрокату характеризується збільшенням значення сили в завершальній стадії розділової операції, очевидно, що одним з основних технологічних параметрів даного розділового процесу є величина радіуса заокруглення, який визначається коефіцієнтом K_R , значення якого необхідно підбирати виходячи з величини допустимого коефіцієнта короткочасного перевантаження K_n , для конкретних ножиць, так при $K_n = 15\%$ для модельованих умов величина коефіцієнта K_R склала близько $K_R = 71 \dots 83$ при цьому величина залишкової деформації знижується на 16 ... 21%.

2. Для поперечного різання шевронним ножом листів із сталей з межею міцності нижче максимально допустимого для конкретних ножиць при максимальній товщині розрізається листа, можливе застосування шевронного ножа з меншим кутом нахилу прямолінійних площин ріжучої кромки без перевищення максимально допустимого значення сили різання, при цьому зменшення кута нахилу на один градус в модельованих умовах дозволило знизити величину залишкової деформації готового листа на 60 ... 68%.

3. Результати автоматизованого розрахунку основних технологічних параметрів процесу обрізки бічних крайок листових розкатів на дискових ножицях вказують на те, що при застосуванні запропонованого способу установки дискових ножиць в потоці прокатного стану, різка може здійснюватися одним верхнім приводним ножом з пари за умови достатньої компенсації сил зовнішнього опору силою «підпору» внаслідок узгодження швидкості правки і різання. При цьому виходячи з умови реалізації встановленого процесу різання при рекомендованих максимально допустимих значеннях сили зовнішнього опору швидкість подачі листа для різних умов повинна складати (0,91 ... 0,95) від окружної швидкості ножів.

5 ВИСНОВКИ

1. Подальший розвиток виробництва товстолистого металопрокату обумовлюється лено тенденцією, спрямованою на підвищення якості готової продукції, зокрема шляхом розширення можливостей існуючого і проектного устаткування, яке застосовується для поперечного різання листового металопрокату, а також вдосконалення даної технологічної операції в цілому за умови мінімізації її енергосилових показників.

2. Підвищення якості листового металопрокату, що розрізає на ножицях можливо шляхом застосування для поперечного різання шевронного ножа зі складної формою ріжучої кромки, при цьому найбільш перспективним представляється Шеврон ніж зі скругленням, застосування якого, дозволяє домогтися на 7,4% більшого зниження величини залишкової деформації листа в порівнянні з шевронним ножом з горизонтальною площадкою конструкції «Северсталь», при рівному значенні максимальної сили різання, теоретична оцінка якого можлива на базі розробленої в рамках даної роботи методики, достовірність якої підтверджена експериментально і становить $p \approx 93\%$.

3. Застосування шевронного ножа зі скругленням для поперечного різання листового металопрокату характеризується збільшенням значення сили різання в закла-ршающей стадії розділової операції, обумовленого величиною радіуса заокруглення, значення якого також визначає величину залишкової деформації-ції листа і для конкретних ножиць підбирається виходячи з допустимого коефіцієнта короткочасного перевантаження K_n , так при $K_n = 15\%$ зниження величини залишкової деформації може скласти 16 ... 21%.

ЛІТЕРАТУРА

1. Зотов В. Ф. Производство проката / В. Ф. Зотов. – М. : Интермет Инжиниринг, 2000. – 352 с.
2. Технология процессов прокатки и волочения. Листопрокатное производство : учебник для вузов / М. М. Сафьян [и др.]. – К. : Вища шк., 1988. – 351 с.
3. Грудев А. П. Технология прокатного производства / А. П. Грудев, Л. Ф. Машкин, М. И. Ханин. – М. : Metallurgiya, 1994. – 656 с.
4. Иванченко Ф. К. Розрахунок машин і механізмів прокатних цехів : навчальний посібник / Ф. К. Иванченко, В. М. Гребеник, В. І. Ширяєв. – К. : Вища шк., 1995. – 445 с.
5. Зотов В. Ф. Холодная прокатка металла / В. Ф. Зотов, В. И. Елин. – М. : Metallurgiya, 1988. – 288 с.
6. Федосов Н. М. Проектирование прокатных цехов / Н. М. Федосов, В. Н. Бринза, И. Г. Астахов. – М. : Metallurgiya, 1983. – 303 с.
7. Прокатное производство / П. И. Полухин, Н. М. Федосов, А. А. Королев, Ю. М. Матвеев. – М. : Metallurgiya, 1988. – 668 с.
8. Технология прокатного производства : справочник. В 2 кн. Кн. 2 / М. А. Беньковский [и др.]. ; под ред. В. И. Зюзина и А. В. Третьякова. – М. : Metallurgiya, 1991. – 423 с.
9. Технология прокатного производства / В. М. Клименко, А. М. Онищенко, А. А. Минаев, В. С. Горелик. – К. : Вища шк., 1989. – 311 с.
10. Лукашин Н. Д. Конструкция и расчет машин и агрегатов металлургических заводов : учебник для вузов / Н. Д. Лукашин, Л. С. Кохан, А. М. Якушев. – М. : ИКЦ Академкнига, 2003. – 456 с.
11. Анализ схем производства толстых листов на реверсивных станах / Ф. Е. Долженков [и др.]. // Производство толстолистовой стали : темат. отрасл. сб. – М. : Metallurgiya, 1981. – № 5. – С. 5–10.
12. Повышение качества толстых листов / Ф. Е. Долженков [и др.]. – М. : Metallurgiya, 1984. – 247 с.
13. Белобров Ю. Н. Реконструкция толстолистовых станов: направление, проблемы, решения / Ю. Н. Белобров, В. А. Плотников, Ю. Г. Бондарь // Удосконалення процесів та обладнання обробки тиском в металургії та машинобудуванні : зб. наук. пр. – Краматорськ : ДДМА, 2001. – С. 450–453.

14. Прокатка толстых листов / П. И. Полухин [и др.]. – М. : Metallurgiya, 1984. – 288 с.
15. Василев Я. Д. Производство полосовой и листовой стали / Я. Д. Василев, М. М. Сафьян. – К. : Вища шк., 1976. – 191 с.
16. Интенсификация производства листовой стали / Ф. Е. Долженков, В. Г. Носов, Ю. В. Фурман, А. Е. Руднев. – К. : Техника, 1990. – 136 с.
17. Рудской А. И. Теория и технология прокатного производства : учебное пособие / А. И. Рудской, В. А. Лунев. – Санкт-Петербург : Наука, 2005. – 540 с.
18. Бочков Н. Г. Экономия металла в прокатном производстве / Н. К. Бочков, В. Н. Сафонова. – М. : Metallurgiya, 1997. – 336 с.
19. Коновалов Ю. В. Справочник прокатчика : справочное издание. В 2 кн. Кн. 1. Производство горячекатаных листов и полос / Ю. В. Коновалов. – М. : Теплотехник, 2008. – 640 с.
20. Бочков Н. Г. Производство качественной низкоуглеродистой листовой стали / Н. Г. Бочков, Ю. В. Липухин, А. Ф. Пименов. – М. : Metallurgiya, 1983. – 183 с.
21. Стасовский Ю. Н. Проектирование современных производств обработки металлов давлением / Ю. Н. Стасовский, Ю. С. Кривченко, Г. С. Бабенко ; под ред. д-ра т. н. Ю. Н. Стасовского. – Днепропетровск : Монолит, 2009. – 745 с.
22. Гарбер Э. А. Станы холодной прокатки / Э. А. Гарбер. – М. : ОАО Черметинформация, 2004. – 416 с.
23. Дмитриев В. Д. Машиностроение и металлургия: справочник прокатчика / В. Д. Дмитриев, М. Я. Бровман. – Донецк : Донбасс, 1986. – 110 с.
24. Гулидов И. Н. Оборудование прокатных цехов (эксплуатация, надежность) : учебное пособие для студентов сред. спец. учеб. заведений / И. Н. Гулидов. – М. : Интермет Инжиниринг, 2004. – 320 с.
25. Гарбер Э. А. Производство проката : справочное издание. В 3 т. Т.1. Производство холоднокатаных полос и листов (сортамент, теория, технология, оборудование) / Э. А. Гарбер. – М. : Теплотехник, 2007. – 368с.
26. Буряковский Г. А. Поверхностные дефекты легированных сталей / Г. А. Буряковский, Р. Д. Менинзон. – М. : Metallurgiya, 1986. – 157 с.
27. Савранский К. Н. Пути экономии металла при производстве толстых листов / К. Н. Савранский, Э. А. Гарбер, В. Г. Ламинцев. – М. : Metallurgiya, 1983. – 118 с.

28. Суков Г. С. Современные ножницы для порезки полосового проката / Г. С. Суков, В. Н. Тиунов, Ю. Н. Белобров // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2010. – № 1/1(43). – С. 25–26.

29. Королев А. А. Конструкция и расчет машин и механизмов прокатных станов : учебник для вузов / А. А. Королев. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Металлургия, 1985. – 376 с.

30. А. с. 1804963 СССР, МКИЗ В23D15/08. Ножницы гильотинные для обрезки полосового материала / В. А. Могильницкий, В. Е. Балаболко и др. (СССР). – № 4783056/27 ; заявл. 05.12.89 ; опубл. 30.03.93, Бюл. № 12.

31. Пат. 49274 Україна, МПК В23D15/00. Ножиці гідравлічні гільзотинні з нижнім різом / Білобров Ю.М., Бортник В.В. та ін. ; заявник і патенто власник ЗАТ «Новокраматорський машинобудівний завод». – № 200911056 ; заявл. 02.11.09 ; опубл. 26.04.10, Бюл. № 8.

32. Резка толстых листов гильотинными ножницами с наклонными кромочными ножами / В. Н. Карпушкин [и др.]. // Чер. Metallургия : Бюл. НТИ : Черметинформация. – 1982. – Вып. 8(916). – С. 43–45.

33. Адамович Р. А. Расчёт гильотинных ножниц / Р. А. Адамович, А. Э. Калле // Исследование, расчёты и конструирование машин металлургического производства : сб. науч. тр. ; под ред. Дрозда В. Г. – М. : ВНИИМЕТМАШ, 1980. – С. 11–14.

34. Машины и агрегаты металлургических заводов / А. И. Целиков [и др.]. В 3 т. Т. 3. Машины и агрегаты для производства и отделки проката. – М. : Metallургия, 1988. – 680 с.

35. Бойденко Н. Г. Определение координат подвижного суппорта ножниц с катящимся резом / Н. Г. Бойденко, В. Д. Шейнкман, В. П. Капота // Новые конструкции и исследования агрегатов и машин обработки проката : сб. науч. тр. ; под ред. Попова Б. В. – М. : ВНИИМЕТМАШ, 1985. – С. 78–81.

36. Бойденко Н. Г. Профилирование инструмента ножниц с катящимся резом / Н. Г. Бойденко, В. П. Капота, В. Я. Панюхно // Прогрессивные технологии и машины для обработки и отделки прокатного производства : сб. науч. тр. ; под ред. Попова Б. В., Коновалова Л. В. – М. : ВНИИМЕТМАШ, 1986. – С. 47–54.

37. Бойденко А. Н. Об опыте внедрения нового способа резания толстолистового проката ножницами с катящимся резом / А. Н. Бойденко // Удосконалення процесів і обладнання обробки тиском в металургії і машинобудуванні : темат. зб. наук. пр. – Краматорськ : ДДМА, 2000. – С. 95–96.

38. Методика расчета силы резания дугообразным ножом / В. Д. Нотченко [и др.] // Удосконалення процесів і обладнання обробки тиском в металургії і машинобудуванні : темат. зб. наук. пр. – Краматорськ : ДДМА, 2000. – С. 66–69.

39. Пат. 82861 Україна, МПК1 В23D15/00. Ножиці для поперечного різання товстих листів з ексцентриковим приводом / Хайтце Г., Баур Т. ; заявник і патентовласник «СМС ДЕМАГ АКЦИЕНГЕЗЕЛЬШАФТ». № 200507208 ; заявл. 15.12.03 ; опубл. 26.05.08, Бюл. № 10.

40. Пат. 2338633 Российская Федерация, МПК В23D 15/08, В21D 43/09. Ножницы для поперечной резки толстых листов с эксцентриковым приводом / Хайтце Г., Баур Т. ; заявитель и патентообладатель «СМС ДЕМАГ АКЦИЕНГЕЗЕЛЬШАФТ». – № 2005122948/02 ; заявл. 15.12.2003 ; опубл. 20.11.2008, Бюл. № 32.

41. Пат. 2420374 Российская Федерация, МПК В23D 15/04. Устройство для резки / Баур Т. ; заявитель и патентообладатель «СМС ЗИМАГ АГ». – № 2009143858/02 ; заявл. 07.04.2008 ; опубл. 10.06.2011, Бюл. № 16.

42. Пат. 77377 Україна, МПК В23D 15/00. Ножиці для різання листового матеріалу / Козлов П. М., Титаренко О. І., Калашников А. А. Резников В. І. Чижик В.В.; заявник і патентовласник ПАТ "Новокраматорський машинобудівний завод". – u201209646 ; заявл. 09.08.2012 ; опубл. 11.02.2013, Бюл № 3.

43. Жуков И. Б. Кинематический расчет двухкривошипных ножниц в задачах оптимизации электропривода комплексов резки листового проката / И. Б Жуков. – СПб. : Гос. электротехн. ун-т. – 2004. – 23 с.

44. Кульвиц А. В. Разработка ножниц сдвоенных кромкообрезных и продольной резки / А. В. Кульвиц, Н. А. Комар // Сталь. – 2006. – № 8. – С. 68–69.

45. Сдвоенные кромкообрезные ножницы с катящимся резом конструкции ОАО «КО ВНИИМЕТМАШ» / В. И. Клопов, В. А. Дунаев, В. Е. Кутузов, А. В. Кульвиц // Черные металлы. – 2009. – № 9. – С. 11–13.

46. Роль ВНИИМЕТМАША в создании и освоении агрегатов поперечной резки листового проката / С. Н. Сумский, В. Г. Грачев, Ф. С. Солодовник, Ю. М. Рогачиков // Металлург. – 2004. – № 3. – С. 45–48.

47. Пат. 2532220 Российская федерация МПК В 23 D 15/12, В 23 D 15/14. Режущее устройство с регулируемой боковой направляющей / Баур Т., Боймер К. ; заявитель и патентообладатель «СМС ЗИМАГ АГ». – № 2004127530/02 ; заявл. 15.10.2010 ; опубл. 27.11.2013, Бюл. № 33.

48. Зырянов В. В. Опыт эксплуатации ножниц "с катящимся резом" / В. В. Зырянов, А. М. Иванов, И. Ю. Гайтанов // *Металлург*. – 2004. – № 3. – С. 51–2.

49. Ножницы с катящимся резом конструкции ОАО “КО ВНИИМЕТМАШ” / В. И. Клопов, В. Г. Астахов, В. Е. Кутузов, А. В. Кульвиц // *Черная металлургия : Бюл. ин-та “Черметинформация”*. – 2007. – № 3. – С. 54–8.

50. Целиков А. И. Прокатные станы : учебник для вузов / А. И. Целиков, В. В. Смирнов. – М. : Металлургиздат, 1958. – 432 с.

51. Боровик П. В. Совершенствование технологии и оборудования процесса продольной резки толстых горячекатаных листов на дисковых ножницах : дис. канд. техн. наук : 05.03.05 : защищена 20.11.2008 : утв. 28.04.2009 / Боровик Павел Владимирович. – Краматорск, 2008. – 225 с.

52. Васильев К. И. Резка листовыми ножницами: компьютерное моделирование и экспериментальное исследование изменения зазора между ножа ми / К. И. Васильев, Н. А. Садеков. // *Вестник МГТУ «Станкин»*. Научный рецензируемый журнал. – 2011. – № 2. – С. 34–37.

53. Пат. 69331 Україна, МПК В 23 D 35/00, В 23 D 25/00, В 23 D 15/00. Комплект ножів ножиців для різання листового матеріалу / Суков Г. С., Алдохін Д. В., Калашніков А. А. та ін. ; заявник і патентовласник ПАО "Новокраматорський машинобудівний завод". – № 201112194 ; заявл. 18.10.2011 ; опубл. 25.04.2012, Бюл. № 8.

54. Пат. 2212986 Российская федерация, МПК В 23 D 35/00. Нож шевронный для резки листового материала / Ю.С. Котелевец, В.А. Арашкевич, Ю.Д. Иванов и др.; Заявитель ОАО "Северсталь". – № 2001120645/02 ; заявл. 23.07.2001 ; опубл. 27.09.2003, Бюл. № 27.

55. Сабуров А. М. Определение усилия и момента резания на дисковых ножницах / А. М. Сабуров // *Вопросы теории и совершенствования конструкций металлургического оборудования : труды ВНИИМЕТМАШ*. – 1974. № 213. – С. 71–74.

56. Сабуров А. М. Экспериментальное исследование дисковых ножниц / А. М. Сабуров, Е. В. Пальмов // *Изв. вузов. Черная металлургия*. – 1963. – № 8. – С. 181–184.

57. Сабуров А. М. Выбор диаметра ножей для разрезания толстых листов на дисковых ножницах / А. М. Сабуров, Е. В. Пальмов // *Изв. вузов. Черная металлургия*. – 1964. – № 6. – С. 213–216.

58. Дунаевский В. И. К расчету энергосиловых параметров процесса резания дисковыми ножами / В. И. Дунаевский, А. В. Сатонин, А. С. Ткаченко // Изв. вузов. Черная металлургия. – 1993. – № 9/10. – С. 73–75.

59. Носенко С. М. Исследование дисковых ножниц толстолистовых станов : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.16.05 / Носенко С. М. – Днепропетровск, 1966. – 24 с.

60. Носенко С. М. Эксплуатация толстолистовых дисковых ножниц / С. М. Носенко // Металлург. – 1965. – № 4. – С. 27–29.

61. Исследование процесса порезки и определение условий организации обработки горячих листов в потоке стана 2800 [Текст] : отчет о НИР (за ключ.) : № 108 / Коммунарский горн.-металлург. ин-т. ; рук. Носенко С. М. ; исполн.: Дубовик В. П. [и др.]. – Коммунарск, 1965. – 258 с.

62. Грудев А. П. Трение и смазки при обработке металлов давлением : справочное издание / А. П. Грудев, Ю. В. Зильберг, В. Т. Тилик. – М. : Металлургия, 1982. – 312 с.

63. Бодини Л. Улучшение плоскостности толстых листов благодаря прогнозированию и оптимизации производства / Л. Бодини, О. Эрих, М. Краухаузен // Черные металлы. – 2008. – № 11. – С. 35–38.

64. Боровик П. В. К вопросу качества резки шевронными ножами // Обработка материалов давлением : сб. науч. тр. – Краматорск : ДГМА, 2013. – № 1(34) – С. 245–250.

65. Хартунг Х. Г. Линия резки нового вида: экономичное производство листов с малыми остаточными напряжениями / Х. Г. Хартунг, М. Дженеке, Ц. Зассе // Черные металлы. – 2010. – № 3. – С. 34–37.

66. Люке М. Вибрационные гильотинные ножи: высокое качество поверхности реза / М. Люке, М. Стонис // Черные металлы. – 2009. – № 3 – С. 43–44.

67. Белянчиков В. К. Новые режущие машины прокатных станов / В. К. Белянчиков, А. С. Буров // Машины и агрегаты металлургического производства. – 1984. – С. 149.

68. Новая конструкция ножниц с нижним резом / В.А. Быков, П.Б. Соколов, Ю.Д. Макаров, С.А. Микульчик // Сталь. – 2013. – № 9. – С. 74–76.

69. Кузьменко В. И. Решение на ЭВМ задач пластического деформирования / В. И. Кузьменко, В. Ф. Балакин. – К. : Техніка, 1990. – 136 с.

70. Боровік П. В. Теоретичні дослідження процесів обробки металів тиском на основі методу скінчених елементів : навчальний посібник / П. В. Боровік. – Алчевск : ДонГТУ, 2012. – 170 с.

71. Боровик П. В. Новые подходы к математическому моделированию технологических процессов обработки давлением : монография / П. В. Боровик, Д. А. Усатюк. – Алчевск : ДонГТУ, 2011. – 299 с.

72. Гуревич Л. М. Компьютерное моделирование процессов обработки металлов давлением. Введение в Abaqus / Л. М. Гуревич, В. М. Волчков, В. Ф. Даниенко. – Волгоград : ВолгГТУ, 2015. – 96 с.

73. Золочевский А. А. Введение в ABAQUS / А. А. Золочевский, А. А. Беккер. – Харьков : Грант, 2011. – 49 с.

74. Еременко С. Ю. Методы конечных элементов в механике деформируемых тел / С. Ю. Еременко. – Харків : Основа, 1991. – 272 с.

75. Бер В. И. Скорость и величина деформации при резке толстолистовых материалов / В. И. Бер, Д. И. Суяров // Изв. вузов. Черная металлургия. – 1982. – № 6. – С. 51–55.

76. Боровик П. В. 3D модель процесса поперечного разделения на ножницах непрерывнолитых сортовых заготовок / П. В. Боровик П. А. Петров // Сборник научных трудов Донбасского государственного технического университета. – Алчевск : ДонГТУ, 2013. – № 41. – С. 151–155.

77. Боровик П. В. Метод построения кривых сопротивления резке в процессе горячего разделения металла на ножницах / П.В. Боровик // Металлургическая и горнорудная промышленность. – 2014. – № 2. – С. 25–29.

78. Боровик П. В. Математическое моделирование процесса резки на ножницах с учетом упругой деформации станины / П. В. Боровик // Вісник Національного технічного університету «ХПІ» : збірник наукових праць. Тематичний випуск: Нові рішення в сучасних технологіях. – Харків : НТУ «ХПІ», 2011. – № 47. – С. 76–80.

79. Боровик П. В. Выбор аппроксимации механических свойств при математическом моделировании процесса горячей резки на ножницах / П. В. Боровик, В. А. Луценко // Металлургические процессы и оборудование. – Донецк, 2011. – № 2(24) – С. 5–9.

80. Боровик П. В. Анализ влияния модели использования пластичности на результаты моделирования процесса резки на ножницах / П. В. Боровик // Вісник

НТУ України «КПІ». – К., 2012. – № 64. – С. 190–195. – (Серія: Машинобудування).

81. Боровик П. В. Особенности процесса холодной резки квадратной заготовки на сортовых ножницах / П. В. Боровик, П. А. Петров // Сборник научных трудов ДонГТУ. – 2012. – № 38. – С. 190–196.

82. Боровик П. В. Развитие методов численного моделирования процессов резки металла на дисковых ножницах / П. В. Боровик // Збірник наукових праць Донбаського гірничо-металургійного інституту. – Алчевськ, 2006. Вип. № 22. – С. 166–172.

83. Теоретическое исследование процесса резания непрерывнолитых слэбов / О. С. Лехов, В. И. Одинок, Т. Г. Химич, А. В. Песков. // Изв. вузов. Черная металлургия. – 1985. – № 2. – С. 128–131.

84. Бровман Т. В. Силовые условия при резке толстолистого проката / Т. В. Бровман // Интенсификация производства листовой стали : темат. сб. науч. тр. – 1988. – С. 109–112.

85. Васильев К. И. Деформированное состояние ножевой балки листовых ножниц / К. И. Васильев, Н. А. Садеков // Кузнечно-штамповочное производство. – 2010. – № 7. – С. 23–26.

86. Васильев К. И. Экспериментальное исследование поперечного прогиба ножевой балки листовых ножниц / К. И. Васильев, Н. А. Садеков // Мат-лы III науч.-образоват. конф. «Машиностроение – традиции и инновации» (МТИ – 2010). (Секция «Оборудование машиностроительных производств»). – М. : МГТУ Станкин, 2010. – С. 28–4.

87. Потапенков А. П. Исследование усилий резания наклонными ножами / А. П. Потапенков. // Изв. вузов. Черная металлургия. – 1998. – № 8. – С. 65–9.

88. Савицкий В. В. Исследование энергосиловых параметров сдвоенных кромкообрезных ножниц в среде COSMOSWorks / В. В. Савицкий, А. Е. Вольвач // Научный Вестник ДГМА. – 2009. – № 1. – С. 150–55.

89. Ручко В. Н. Получение аналитических зависимостей для определения углов поворота эксцентрикового вала механизма резания на ножницах с параллельными ножами / В. Н. Ручко // Удосконалення процесів і обладнання обробки тиском в металургії і машинобудуванні : темат. зб. наук. пр. – Краматорськ : ДД-МА, 2006. – С. 197–201.

90. Ищенко А. А. Пилы горячей резки проката. Конструкции и расчет : монография / А. А. Ищенко, Е. А. Лоза. – Мариуполь : ПГТУ, 2012. – 251 с.

91. Діамантопуло К. К. О резке полосы параллельными ножами / К. К. Діамантопуло, И. В. Левандовская, А. И. Сердюк // Удосконалення процесів і обладнання обробки тиском в металургії і машинобудуванні : темат. зб. наук. пр. – Краматорськ : ДДМА, 2000. – С. 129–131.

92. Развитие методов расчета, совершенствования технологий и оборудования агрегатов продольной резки холоднокатаных лент, листов и полос / В. Ф. Потапкин, Ю. К. Добронос, В. Д. Нотченко, А. Н. Бойденко. // Удосконалення процесів і обладнання обробки тиском в металургії і машинобудуванні : темат. зб. наук. пр. – Краматорськ : ДДМА, 2003. – С. 33–37.

93. Сафронова Т. В. Энергосиловые параметры при резке толстолистого проката на ножницах / Т. В. Сафронова // Теория и технология производства толстого листа : темат. сб. науч. труд. – М., 1986. – С. 87–92.

94. Миленин А. А. Современные методы компьютерного моделирования процессов обработки металлов давлением / А. А. Миленин // Металлургическая и горнорудная промышленность. – 2000. – № 8. – С. 22–26.

95. Компьютерное моделирование процессов обработки металлов давлением / В. Н. Данченко, А. А. Миленин, В. И. Кузьменко, В. А. Гриневич. – Днепропетровск : Системные технологии, 2005. – 448 с.

96. Разработка статистической модели разрезки рулонной стали на агрегате продольной резки / В. В. Шестаков [и др.]. // Изв. вузов. Черная металлургия. – 2011. – № 9. – С. 39–41.

97. Разработка математической модели процесса разрезки рулонной полосы на многодисковых ножницах агрегата продольной резки / А. В. Колобов [и др.]. // Черные металлы. – 2013. – № 2. – С. 9–13.

98. Котельников В. П. Резание заготовок на ножницах с параллельными ножами / В. П. Котельников // Изв. вузов. Черная металлургия. – 1981. – № 8. – С. 150–152.

99. Исследование усилий резания металлических листов / А. П. Потапенков, Ю. Г. Серебренников, С. С. Пилипенко, С. М. Степанов // Изв. вузов. Черная металлургия. – 2009. – № 11. – С. 56–59.

100. Численное математическое моделирование процесса резания листового металлопроката на ножницах с дугообразным ножом / В. Д. Нотченко [и др.]. // Удосконалення процесів і обладнання обробки тиском в металургії і машинобудуванні : темат. зб. наук. пр. – Краматорськ : ДДМА, 2001. – С. 454–457.

101. Дунаевский В. И. Численное математическое моделирование процесса резания дисковыми ножами / В. И. Дунаевский, Е. А. Емченко, В. В. Нотченко // Совершенствование процессов и оборудования обработки давлением в металлургии и машиностроении : сб. науч. тр. – Краматорск : ДГМА, 1998. – № 2001. – С. 26–30.

102. Математическое моделирование энергосиловых параметров процесса поперечной резки круглых сортовых профилей / П. А. Петров, С. М. Стриченко, И. И. Бойко, А. А. Сытник // Обработка материалов давлением : сб. науч. тр. – Краматорск : ДГМА, 2012. – № 1. – С. 227–232.

103. Трусковский В. И. К назначению угла наклона плоских клиновых ножей для резки сортового проката на ножницах с тангенциальным движением инструмента / В.И. Трусковский, В.Г Шеркунов // Вестник Магнитогорского государственного технического ун-та им. Г. И. Носова. – 2012. – № 3. – С. 21–23.

104. Трусковский В. И. Развитие и совершенствование способов и механических схем резки сортового проката / В. И. Трусковский, Р. А. Закиров // Наука и технологии : избр. тр. Российской школы. – М. : РАН, 2005. – С. 129– 133. – (Серия «Технологии и машины обработки давлением»).

105. Трусковский В. И. Ножницы для резки сортового проката и толстостенных труб / В. И. Трусковский, В. Г. Церкунов // Металлург. – 2012. – № 11. – С. 63–66.

106. Владимиров А. В. Определение параметров механизма ножниц для резки листового проката / А. В. Владимиров // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. – 2009. – № 4. – С. 87–89. – (Серия: Технические науки).

107. Экспериментальное исследование ножниц горячей резки / Р. Ф. Денисова [и др.]. // Конструирование и совершенствование прокатного оборудования. – М., 1985. – С. 137–140.

108. Ушаков М. В. Учет влияния скорости деформации и температуры на процессы, происходящие в зоне первичной деформации при резании металлов / М. В. Ушаков, С. Ю. Ильяхин, И. А. Воробев // Известия ТулГУ. Технические науки. – Тула : ТулГУ, 2010. – № 4. – С. 89–93.

109. Поляков Б. Н. Напряженно-деформированные и термоупругие состояния суппортов ножниц заготовочных прокатных станов / Б. Н. Поляков // Оборудование. Технический альманах. – 2008. – № 4 – С. 34–39.

110. Ульяницкий В. Н. Особенности определения усилия резания толстолистовых раскатов дисковыми ножницами / В. Н. Ульяницкий, П. В. Боровик // Вестник МАНЭБ. – СПб, 2000. – № 26. – С. 52–54.

111. Численное математическое моделирование напряженно деформированного состояния при продольной резке двухслойных биметаллических лент и полос / В.И. Дунаевский [и др.]. // Удосконалення процесів і обладнання обробки тиском в металургії і машинобудуванні : темат. зб. наук. пр. – Краматорськ : ДДМА, 2002. – С. 302–306.

112. Химич Т. Г. Автоматизированный расчет кинематических и динамических параметров ножниц 1250 тс / Т. Г. Химич, О. С. Техов, А. Г. Жигалин // Изв. вузов. Черная металлургия. – 1980. – № 4. – С. 144–147.

113. 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 Донбасского государственного технического университета. – Алчевск : ДонГТУ, 2010. – № 32. – С. 175–181.

114. Боровик П. В. Оценка влияния жесткости станины на параметры процесса резки на ножницах / П. В. Боровик // Сборник научных трудов Донбасского государственного технического университета. – Алчевск : ДонГТУ, 2012. – № 36. – С. 269–275.

115. Жуков И. Б. Исследование динамики систем управления ножницами поперечной резки листового проката / И. Б. Жуков // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». – СПб. : Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2005. – № 1. – С. 7–5. – (Серия: Электротехника).

116. Ураков В. Ф. Температурный эффект пластической деформации при резке металлов / В. Ф. Ураков // Машины и технология обработки металлов давлением. – М. : Машиностроение, 1967. – С. 205–17.

117. Диамантопуло К. К. О резке проката в штампе при сложном движении ножа / К. К. Диамантопуло, А. И. Сердюк, И. В. Левандовская // Удосконалення процесів та обладнання обробки тиском в металургії та машинобудуванні : зб. наук. пр. – Краматорськ : ДДМА, 2001. – С. 279–282.

118. Прилуков В. П. Определение геометрических параметров верхнего ножа листовых ножниц / В.П. Прилуков, В.И. Люленков, В.Ф. Егоров // Изв. вузов. Черная металлургия. – 1989. – № 10. – С. 141–142.

119. Сатонин А. В. Расчет напряжений и деформаций по кромкам прокатываемых лент и полос / А. В. Сатонин, М. Г. Коренко, И. С. Сухоруков // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2011. – № 7(53). – С. 63–66.

120. Численная методика расчета энергосиловых параметров процесса горячей поперечной резки непрерывнолитых сортовых заготовок / А. В. Сатонин, С. М. Стриченко, А. В. Завгородний, А. А. Житлова // Совершенствование процессов и оборудования обработки давлением в металлургии и машиностроении : сб. науч. тр. – Краматорск : ДГМА, 2011. – № 2. – С. 43–47.

121. Бойденко Н. Г. Исследование процесса резки листов на ножницах / Н. Г. Бойденко, В. П. Капота, И. И. Капнин // Новые конструкции и исследования агрегатов и машин обработки проката : сб. науч. тр. ; под ред. Попова Б. В. – М. : ВНИИМЕТМАШ, 1985. – С. 34–38.

122. Боровик П. В. Теоретический анализ процесса горячей резки на ножницах / П. В. Боровик // Обработка материалов давлением : сб. науч. тр. – Краматорск : ДГМА, 2012. – № 1 – С. 218–222.

123. Кутышкин А. В. Оценка стойкости ножей для резки сортового проката / А. В. Кутышкин, О. А. Кутышкина // Изв. вузов. Черная металлургия. – 1996. – № 10 – С. 32–33.

124. Износостойкая наплавка ножей горячей резки металлопроката / Е. Н. Ерёмин [и др.]. // Заготовительные производства в машиностроении. – 2008. – № 4. – С. 17–19.

125. Романцев Б. А. Исследование процесса разрезки прутков при повышенной температуре / Б. А. Романцев, В. А. Попов, С. Д. Калагин // Изв. вузов. Черная металлургия. – 1991. – № 7. – С. 51–52.

126. Гребе А. К. Снижение усилия резания и динамических нагрузок при разделении толстолистого проката за счет применения ножей новой конструкции / А. К. Гребе, А. В. Дегтярев // Новые технологические процессы прокатки как средство интенсивного производства и повышение качества продукции : всес. науч.-техн. конф. : тез. докл. – Челябинск, 1989. – С. 117–119.

127. Коновалов Ю. В. Расчет параметров листовой прокатки : справочник / Ю. В. Коновалов, А. Л. Остапенко, В. И. Пономарев. – М. : Металлургия, 1986. – 430 с.

128. Сатонин А. В. Численное конечно-разностное математическое моделирование напряженно-деформированного состояния металла при реализации различных технологических схем обработки давлением / А. В. Сатонин // Удосконалення процесів і обладнання обробки тиском в металургії і машинобудуванні : темат. зб. наук. пр. – Краматорськ : ДДМА, 2001. – С. 559–564.

129. Дьяконов В. П. MATLAB. Полный самоучитель / В. П. Дьяконов. – М. : ДМК Пресс, 2012. – 768 с.
130. Ануфриев И. Е. Самоучитель MatLab 5.3/6.x / И. Е. Ануфриев. – Санкт-Петербург : БХВ-Петербург, 2002. – 736 с.
131. Гульяев А. Визуальное моделирование в среде Matlab : учебный курс / А. Гульяев. – СПб. : Питер бук, 2000. – 430 с.
132. Львовский Е. Н. Статистические методы построения эмпирических формул : учеб. пособие для втузов / Е. Н. Львовский. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Высш. шк., 1988. – 239 с.
133. Фёрстер Э. Методы корреляционного и регрессионного анализа. Руководство для экономистов / Э. Фёрстер ; пер. с нем. и предисловие В. М. Ивановой. – М. : Финансы и статистика, 1983 – 304 с.
134. Боровик П. В. Повышение качества толстых листов за счёт применения шевронного ножа новой конструкции / П. В. Боровик, М. Е. Селезнёв // Вісник НТУ «ХПІ». – 2013. – № 43. – С. 41–46. – (Серія: Нові рішення у сучасних технологіях).
135. Селезнёв М. Е. Сравнительный теоретический анализ эффективности применения шевронных ножей со сложной формой режущей кромки / М. Е. Селезнёв, П. В. Боровик // Научный вестник ДГМА. – Краматорск : ДГМА, 2015. – № 2. – С. 148–154.
136. Механические свойства сталей и сплавов при нестационарном нагружении : справочник / Д. А. Гохфельд [и др.]. – Екатеринбург : УрО РАН, 1996. – 408 с.
137. Нотченко В. Д. К расчету энергосиловых параметров процесса резания листового металлопроката / В. Д. Нотченко, А. В. Сатонин, А. Н. Бойденко // Изв. вузов. Черная металлургия. – 1999. – № 6. – С. 78.
138. Боровик П. В. Теоретическое определение силы резки ножницами фасонных профилей / П. В. Боровик, П. А. Петров // Металлургическая и горнорудная промышленность. – 2013. – № 5. – С. 41–44.
139. Селезнёв М. Е. Определение максимального усилия при поперечной резке толстолистовых раскатов шевронным ножом сложной формы / М. Е. Селезнёв // Сборник научных трудов Донбасского государственного технического университета. – 2013. – № 41. – С. 173–178.
140. Соболев И. М. Численные методы Монте-Карло / И. М. Соболев. – М. : Наука, 1973. – 301 с.

141. Сатонин А. В. Методики и программные средства по имитационному математическому моделированию различных технологических схем листо прокатного производства / А. В. Сатонин ; Крамат. индустр. ин-т. – Краматорск, 1994. – Деп. в ГНТБ Украины 15.08.94, № 1661. – Ук 94.

142. Пат. 90094 Україна, МПК В 23 D 35/00, В 23 D 25/00, В 23 D 15/00. Комплект ножів для поперечного різання листового матеріалу / Боровік П. В., Селезньов М. Є. ; заявники та патентовласники Боровік П. В., Селезньов М. Є. – u201314896 ; заявл. 19.12.2013 ; опубл. 12.05.2014, Бюл. № 9.