

Е.П. Грибков, Є.Ю. Гаврильченко, Ю.К. Доброносів

**УДОСКОНАЛЕННЯ ПРОЦЕСУ
ПРАВКИ ГАРЯЧЕКАТАНИХ ЛИСТІВ
І ЛИСТОПРАВІЛЬНИХ МАШИН
ДЛЯ ЙОГО РЕАЛІЗАЦІЇ**

Монографія

ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ “МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА”»

**Е. П. ГРИБКОВ, Є. Ю. ГАВРИЛЬЧЕНКО,
Ю. К. ДОБРОНОСОВ**

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

Монографія

Одеса • 2023 • Олді+

УДК 621.982:669-41
Г82

Рецензенти:

Шаповал О. О., д-р техн. наук, професор, професор кафедри технології машинобудування Кременчуцького національного університету ім. М. Остроградського (м. Кременчук);

Боровік П. В., д-р техн. наук, доцент, професор кафедри машинобудування та прикладної механіки Східноукраїнського національного університету ім. В. Даля (м. Київ);

Максименко О. П., д-р техн. наук, професор, професор кафедри металургії чорних металів та обробки металів тиском Дніпровського державного технічного університету (м. Кам'янське)

Рекомендовано до друку рішенням Вченої ради
ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА»
(протокол № 2 від 21.12.2023 р.)

Грибков Е. П.

Г82 Удосконалення процесу правки гарячекатаних листів і листопробних машин для його реалізації : монографія / Е. П. Грибков, Є. Ю. Гаврильченко, Ю. К. Доброносів. – Одеса : Олді+, 2023. – 184 с.

ISBN 978-966-289-602-2

У роботі розглянуті технологічні особливості процесу правки товстих листів на багатороликових правильних машинах та особливості їх обладнання. Розроблено математичні моделі процесу правки товстих листів, проведено теоретичні та експериментальні дослідження впливу технологічних та конструкційних факторів на якість правки та енергосилові параметри процесу. Розглянуто можливості правки нерівномірно розподілених за шириною листів дефектів площинності за допомогою диференційованого додавання сили правки за рахунок прогинів робочих роликів. Наведено результати автоматизованого проектування технологічних налаштувань листопробної машини з диференційованим додаванням сили правки за шириною листів. Призначено для науковців, аспірантів та студентів технічних спеціальностей, а також для інженерних працівників промислових підприємств і співробітників науково-дослідних інститутів.

УДК 621.982:669-41

ISBN 978-966-289-602-2

© Е. П. Грибков,
Є. Ю. Гаврильченко, Ю. К. Доброносів, 2023
© ТОВ «ТУ «МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА»», 2023

ЗМІСТ

ВСТУП	5
-------------	---

1

ТЕХНОЛОГІЇ, ОБЛАДНАННЯ, МЕТОДИ РОЗРАХУНКУ Й ПЕРСПЕКТИВИ РОЗВИТКУ БАГАТОРОЛИКОВИХ ЛИСТОПРАВИЛЬНИХ МАШИН (АНАЛІЗ СТАНУ ПИТАННЯ)	7
--	----------

1.1 Дефекти форми листового металопрокату і фактори, що їх обумовлюють	7
1.2 Склад і конструктивні особливості обладнання для правки листів і штаб	14
1.3 Методи розрахунків процесів правки знакозмінним вигином на багатороликкових машинах	30

2

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ЕНЕРГОСИЛОВИХ І ГЕОМЕТРИЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ПРОЦЕСУ ПРАВКИ ГАРЯЧЕКАТАНИХ ЛИСТІВ	44
--	-----------

2.1 Методи теоретичних досліджень процесів правки	44
2.2 Математична модель із розрахунку енергосилових і геометричних параметрів процесів правки гарячекатаних листів	45
2.3 Скінченно-елементне моделювання процесу правки хвилястості на листопривильних машинах	64

3

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСІВ ПРАВКИ ГАРЯЧЕКАТАНИХ ЛИСТІВ НА ЛИСТОПРАВИЛЬНИХ МАШИНАХ ІЗ ДИФЕРЕНЦІЙОВАНИМ ДОДАТКОМ СИЛИ ПРАВКИ ПО ШИРИНІ ПРОКАТУ	74
--	-----------

3.1 Обладнання та методи експериментальних досліджень процесів правки гарячекатаних листів	74
3.2 Експериментальні дослідження процесів правки на листопривильній машині з диференційованим додаванням сили правки по ширині прокату	84
3.3 Експериментальне дослідження процесу правки на листопривильній машині в промислових умовах	99

АВТОМАТИЗОВАНЕ ПРОЄКТУВАННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИХ НАЛАШТУВАНЬ ЛИСТОПРАВИЛЬНОЇ МАШИНИ З ДИФЕРЕНЦІЙОВАНИМ ДОДАВАННЯМ СИЛИ ПРАВКИ ПО ШИРИНІ ЛИСТІВ	111
4.1 Автоматизоване проєктування технологічних налаштувань листопрвилної машини на основі чисельно-аналітичної моделі процесу правки багаторазовим знакозмінним вигином.	111
4.2 Автоматизоване проєктування технологічних налаштувань листопрвилної машини на основі регресійної моделі процесу правки багаторазовим знакозмінним вигином.	124
4.3 Автоматизоване проєктування налаштування вигинів робочих роликів.	138
4.4 Автоматизоване проєктування технологічних режимів та удосконалення конструктивних параметрів обладнання на прикладі багатороликової листопрвилної машини товстолистового стану 2850.	142
ВИСНОВКИ	160
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	162

ВСТУП

Сьогоденні умови технічного розвитку з широким використанням новітніх технологій та глобалізації ринків металопродукції ставлять перед металургійною галуззю завдання підвищення ефективності виробництва та забезпечення конкурентоспроможності продукції для відповідності сучасному рівню вимог за всіма видами показників якості та споживчих властивостей. У зв'язку з цим, виробництво конкурентоспроможної прокатної металопродукції, зокрема, товстолистового прокату з погляду співвідношення рівень якості / витрати на виробництво, є комплексною багатофакторною задачею, пов'язаною зі станом, технічним рівнем прокатного обладнання та організацією виробництва продукції, що відповідає сучасним світовим вимогам, яку треба вирішувати на всіх етапах технологічного ланцюга.

Однією з основних умов підвищення конкурентоспроможності та техніко-економічних показників виробництва таких видів прокату, як товстий лист і гарячекатані штаби, є забезпечення необхідних якісних показників і стабільності геометричних характеристик готової металопродукції, зокрема, показників площинності прокату, яке може бути досягнутим вдосконаленням діючих і створенням нових вискоелективних технологій і устаткування, у тому числі, і процесів листової правки, на основі науково обґрунтованих технічних рішень, що приймаються в кожному конкретному випадку. Водночас дефіцит фінансових і матеріальних ресурсів у підприємств металургійного комплексу робить необхідним і одночасно досить істотним підвищення ступеня наукової обґрунтованості вказаних рішень.

Відзначене вище висуває низку додаткових вимог до об'ємів і ступеня вірогідності інформації, що надається, а також до форм і методів проведення наукових робіт. Однією з таких вимог є використання комплексного підходу, що передбачає проведення теоретичних і експериментальних досліджень енергосилових параметрів, напружено-деформованого стану металу та основних показників якості, серед яких стосовно процесів правки гарячекатаних листів мають бути розглянуті: точність геометричних характеристик, показники форми, площинності, а також рівень і ступінь стабільності результатуючих

фізико-механічних властивостей готової металопродукції. Водночас з метою зниження питомих капітальних і експлуатаційних витрат, можливість використання отриманих результатів має бути забезпечена ще на стадії виконання проектно-конструкторських і проектно-технологічних робіт, що робить доцільним зсув акцентів у бік теоретичних досліджень, розроблення широкого кола математичних моделей і відповідних їм програмних засобів. Результати ж експериментальних досліджень у лабораторних і промислових умовах можуть бути використані для уточнення вихідних даних і передумов, а також у якості критеріальних, тобто для оцінювання ступеня вірогідності отриманих теоретичних рішень.

1 | ТЕХНОЛОГІЇ, ОБЛАДНАННЯ, МЕТОДИ РОЗРАХУНКУ Й ПЕРСПЕКТИВИ РОЗВИТКУ БАГАТОРОЛИКОВИХ ЛИСТОПРАВИЛЬНИХ МАШИН (АНАЛІЗ СТАНУ ПИТАННЯ)

1.1 Дефекти форми листового металопрокату і фактори, що їх обумовлюють

Процеси правки металопрокату спрямовані на усунення дефектів, що пов'язані з порушенням форми та площинності готової металопродукції. Ці дефекти можна умовно розділити на 3 основні групи, а саме на викривлення поперечного перерізу, викривлення за довжиною та скрученість (рис. 1.1) [1].



Рисунок 1.1 – Класифікація дефектів площинності та форми металопрокату [1]

Викривлення поперечного перерізу спостерігається на всіх сортових і трубних профілях.

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

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

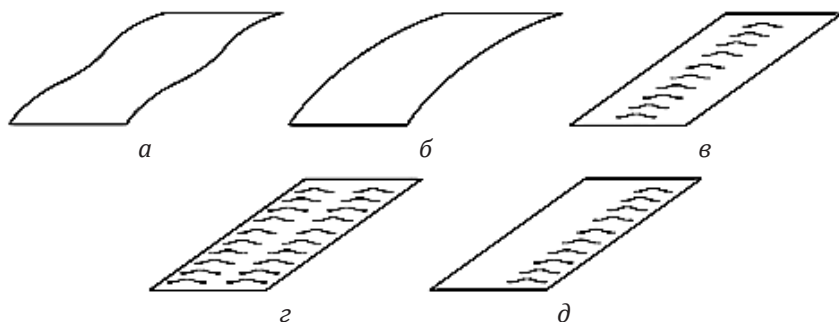


Рисунок 1.2 – Класифікація дефектів форми плоского металопрокату:

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

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

Площинність смуги – одна з найважливіших характеристик точності геометричних характеристик листової сталі та один

із головних показників її технологічної придатності для наступної обробки в безперервних агрегатах цехів холодної прокатки та операцій листового штампування. Неплощинність і серповидність гарячекатаних штаб погіршують якість зварних швів, травмують штаби при змотуванні їх у рулон і розмотуванні на станах холодної прокатки. При холодній прокатці непощинність утрудняє подачу смуги в стан і є причиною обривів і виникнення складок на смузі, що знижує довговічність робочих валків і зменшує продуктивність станів [3].

Неплощинність листової сталі оцінюють амплітудою A на базовій довжині 1 м, яка вимірюється на плоскій поверхні лінійкою або за допомогою приладів при відсутності натягнення (рис. 1.3).

Кількісно форму Φ смуги визначають виразом [4]:

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

де l_x – базова довжина ділянки смуги;

Δl – різниця довжин волокон по ширині смуги b .

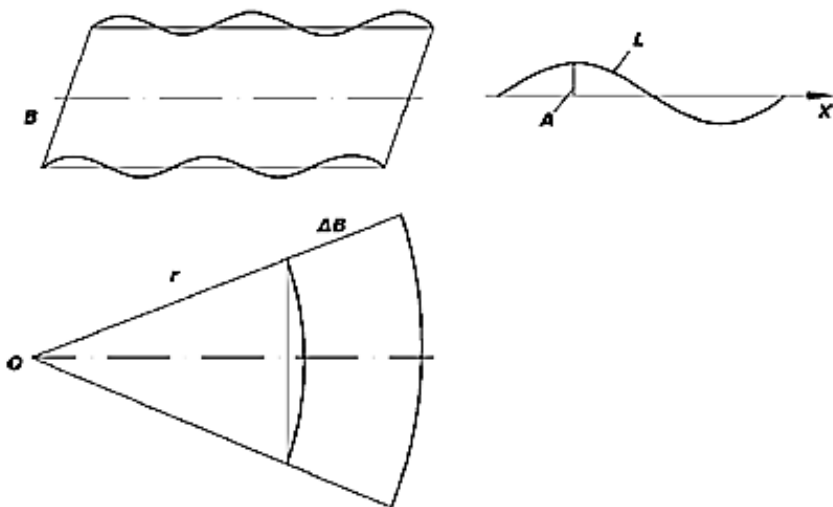


Рисунок 1.3 – Розрахункова схема до визначення параметрів дефектів площинності смуги

При вимірюванні величини Δl на відрізку ширини смуги довжиною Δb параметр форми смуги (рис. 1.3) визначається виразом [4]:

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

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

Класифікація різних видів дефектів площинності та їх оцінка наведена також у роботах [3–18]. Найбільш точні рішення для визначення кількісних характеристик дефектів отримані В. К. Пірсоном [4] через апроксимацію геометричних характеристик смуги синусоїдою, однак у зв'язку з використанням певних наближень застосування цих рішень при аналізі процесів правки утруднене, тому що призводить до завищення необхідної величини залишкового подовження.

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

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

Основною причиною, що викликає появу дефектів, пов'язаних із порушенням форми та розмірів одержуваних виробів, є нерівномірність витяжок по ширині або товщині прокату. До причин, що її обумовлюють, відносять насамперед нерівномірність обтиснення по ширині прокату, викликану порушеннями форми зазору між валками внаслідок їх прогину, нерівномірного розігріву або похибок налаштування. Також дефекти можуть виникнути як результат нерівномірності нагрівання або охолодження

при гарячій прокатці або наступній термічній обробці, неоднорідності механічних властивостей оброблюваного матеріалу, нерівномірності подачі технологічного змащення, нерівномірного зношування або недостатньо точного позиціонування інструментів (валків, пуансонів, роликів, оправок, проводок та ін.), помилок при настроюванні агрегату, а також відхилення в розмірах і формі заготовок на попередніх технологічних операціях [1; 20; 21].

Треба зазначити, що всі дефекти поперечного перерізу можуть супроводжуватися викривленнями по довжині та скрученістю. На широких тонких листах і смугах коробуватість завжди представлена разом із хвилястістю [22], часто із серповидністю або з іншими з перерахованих вище дефектів. На вузьких смугах коробуватість майже не зустрічається, але хвилястість їх майже завжди супроводжується серповидністю [1; 22].

Листи та смуги в рулонах шириною більше 500 мм розділяються на групи особливо високої площинності (ПО), високої (ПВ), поліпшеної (ПУ) і нормальної (ПН) площинності [2; 23].

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

- граничні відхилення від площинності готових листів після правки (табл. 1.1, див. с. 12);
- граничні відхилення по ширині листів з обрізною крайкою (табл. 1.2, див. с. 13);
- граничні відхилення по товщині прокату, що поступає на правку (табл. 1.3, див. с. 13).

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

Таблиця 1.1 – Граничні відхилення від площинності гарячекатаних товстих листів

Стандарт	Товщина листа, мм	Вид площинності	Відхилення в мм на базі 1 м, не більше	Відхилення в мм на базі 2 м, не більше
ГОСТ 19903-74 для сталі з межею плинності до 700 МПа [23]	Будь-яка	Особливо висока	5	—
		Висока	8	—
		Поліпшена	10	—
		Нормальна	12	—
EN 10029:91, для сталі з межею плинності до 460 МПа (сталь L) [24]	3–8 при $b < 2750$	Підвищена, клас S	4	8
	3–8 при $b > 2750$		5	10
	8–250		3	6
	5–8	Нормальна, клас N	8	12
	8–15		7	11
	15–25		7	10
	25–40		6	9
	40–250		5	8
EN 10029:91, для сталі з межею плинності від 460 МПа до 700 МПа (сталь H) [24]	Будь-яка	Підвищена, клас S	Узгодження при замовленні	
	5–8	Нормальна, клас N	11	15
	8–15		10	14
	15–25		10	13
	25–40		9	12
	40–250		8	11

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

Таблиця 1.2 – Граничні відхилення
по ширині гарячекатаних товстих листів

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

Таблиця 1.3 – Граничні відхилення
по товщині гарячекатаних товстих листів [23–25]

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

У Євронормі [24] допуски на товщину визначають клас листа, що випускається (А, В, С або D) і не залежать від ширини листів. Допуски на товщину для листів класів С і D у таблиці 1.3 не показані (у класі С мінусовий допуск дорівнює нулю, а в класі D мінусовий допуск рівний плюсовому по абсолютній величині). Додатково в нормативах [24] обмежується різниця між

найбільшою та найменшою товщинами на конкретному листі, яка залежить від їхніх номінальних товщини та ширини.

Взагалі, виробники листів для економії металу намагаються працювати в мінусовому полі допусків (від «-Δ» до нуля), тому плюсовий допуск стає неактуальним. Плюсовий допуск на товщину листів, у стандарті ASTM A6/A6M-91b [25] залежить від номінальних товщини та ширини листів і є більш широким, ніж допуски ГОСТ 19903-74. Водночас мінусовий допуск у цьому стандарті суттєво жорсткіший та складає 0,3 мм для будь-яких листів. Граничні відхилення по ширині листів у цьому випадку залежать від типу сталі, способу обрізки крайок, товщини, ширини та довжини листів.

1.2 Склад і конструктивні особливості обладнання для правки листів і штаб

За принципом дії все устаткування для правки листів і штаб підрозділяють на такі основні групи: машини для правки вигином, розтягуванням, малими поверхневими деформаціями, а також різними комбінаціями перерахованих операцій – так звані комбіновані машини (рис. 1.4) [1; 26].

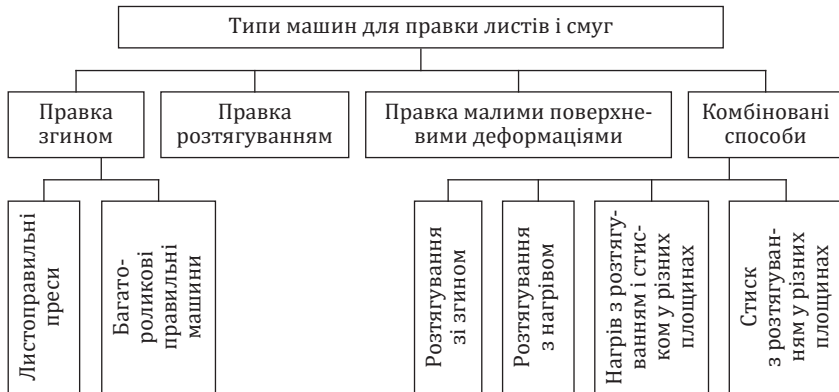


Рисунок 1.4 – Класифікація обладнання для правки листового металопрокату [34]

Найбільш поширеними для правки гарячекатаних листів і штаб є багатороликові машини [26–31], правка в яких здійснюється багаторазовим знакозмінним вигином прокату між розташованими в шаховому порядку робочими роликками. При цьому в зовнішніх волокнах металу з меншою витяжкою виникають напруження, що сягають межі плинності, і ці волокна деформуються пластично й подовжуються, у той час як довгі волокна деформуються пружно й не міняють розміри, тобто відбувається вирівнювання довжин волокон. Ефективність правки металу на роликкових правильних машинах залежить від діаметра та кроку робочих роликів, їх кількості, швидкості правки та ін. Найбільш ефективно на цих машинах усувається хвилястість і подовжня кривизна гарячекатаних листів і штаб.

У низці випадків виправити штабу знакозмінним вигином на багатороликових правильних машинах не вдається, особливо при товщині прокату до 1 мм і за наявності нерівномірно розподілених по ширині дефектів площинності та серповидності. У цих випадках використовують правку розтягуванням, сутність якої полягає в тому, що при розтягуванні листа деформація коротких волокон перевищує деформацію довгих, переходить у пластичну і відбувається вирівнювання довжин волокон металу по ширині прокату. Правка розтягуванням забезпечує високу якість правки листів і смуг із матеріалів, для яких відношення межі міцності до межі плинності перевищує 1,2 [32–36]. Правку листів розтягуванням виконують у гідравлічних розтяжних машинах із рухливими затискачами, що мають невисоку продуктивність. У наш час створені та перебувають у промисловій експлуатації високопродуктивні установки для безперервної правки розтягуванням тонких смуг [29; 34; 36–38].

Правку малими поверхневими деформаціями проводять дресируванням у валках із регульованим профілем міжвалкового зазору. Форму міжвалкового зазору регулюють відповідно до характеру дефектів на смузі протизгином, тепловим профілюванням або зміною положень секцій опорних роликів [29; 39–41].

Комбінованими називаються способи, при яких в одній операції сполучають більш прості технологічні схеми правки. Серед

комбінованих способів правки найпоширенішою є правка розтягуванням зі згином (рис. 1.4) [34; 41–45].

Правка в багатороликових машинах здійснюється за допомогою переміщення прокату, що виправляється, між приводними обертовими роликками, розташованими з перекриттям у шаховому порядку [1; 18; 29; 30]. Застосовують два види налаштування роликків: уздовж (рис. 1.5) і поперек (рис. 1.6, див. с. 17) осі правки [1].

Машини з груповим паралельним налаштуванням вздовж осі (рис. 1.5, а) застосовують для гарячої правки листів за відсутності підвищених вимог до прямолінійності. Групове налаштування нахилом (рис. 1.5, б) використовують, переважно, при виправленні тонких листів і смуг у холодному стані, як і комбіноване налаштування з нахилом крайніх секцій роликків (рис. 1.5, д), яке, порівняно з попереднім, дає змогу забезпечувати більш високу сумарну деформацію, що розширює технологічні можливості машини [1; 27].

При комбінованому паралельному налаштуванні (рис. 1.5, в) полегшується задавання листів у машину і є можливість регулювати прогин листа, що сприяє стабільності результатів

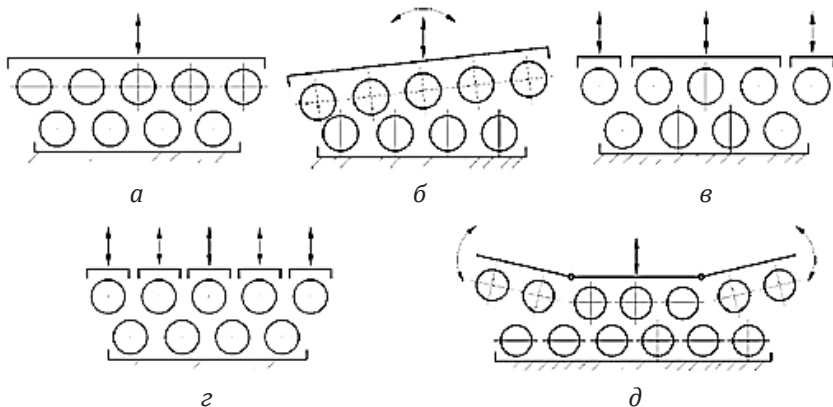


Рисунок 1.5 – Схема поздовжнього налаштування роликків:
а – паралельне; б – похиле; в – групове з незалежним налаштуванням вхідного та вихідного роликків; г – індивідуальне; д – тризонне

правки в порівнянні з груповим налаштуванням. Таке налаштування застосовують переважно для холодної та гарячої правки товстих листів.

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

Паралельне поперечне налаштування роликів верхнього та нижнього ряду (рис. 1.6, *а*) розраховане на правку поздовжньої кривизни листа. Для якісної правки інших дефектів, характерних для листів і смуг, зокрема, коробуватості та хвилястості крайок, необхідно, щоб деформації вигину нерівномірно розподілялися за шириною [1; 27].

Груповий поворот роликів одного ряду щодо осі правки (рис. 1.6, *б*) або індивідуальний поворот кожного з роликів (рис. 1.6, *в*) створює неоднакові деформації по крайках смуги. Більш широкі можливості для варіювання розподілом деформацій за шириною смуги дає вигин робочих роликів (рис. 1.6, *г*)

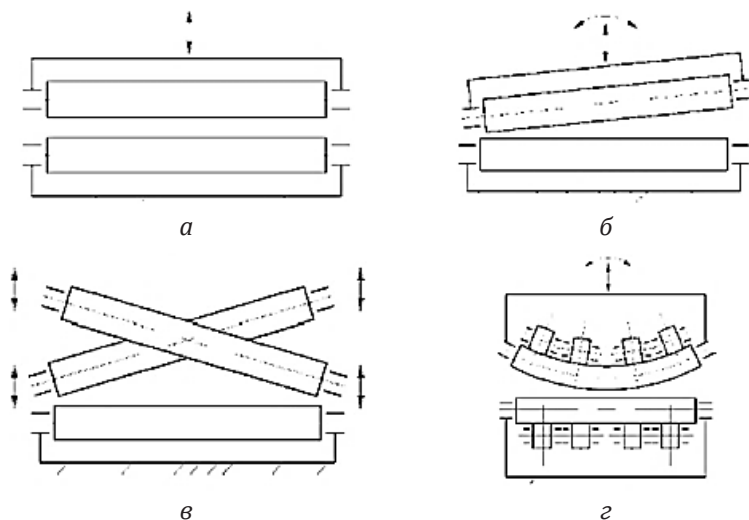


Рисунок 1.6 – Схема поперечного налаштування роликів:
а – паралельне; *б* – спільний поперечний нахил;
в – незалежний поперечний перекид; *г* – прогин роликів

У комбінації з поперечним поворотом таке налаштування дає змогу виправляти різні види коробуватості. Вигин робочих роликів здійснюють за допомогою декількох секцій опорних роликів, оснащених відповідними механізмами налаштування.

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

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

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

Шахове розташування опорних роликів щодо робочих (рис. 1.7, а) забезпечує сприйняття, як вертикальних,

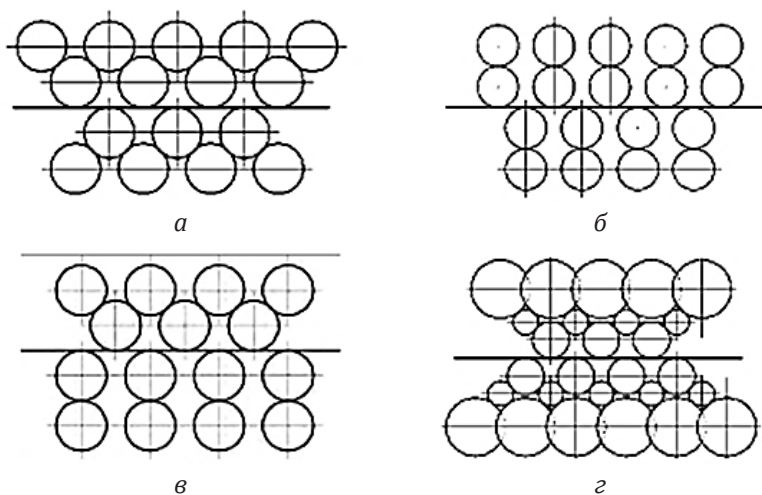


Рисунок 1.7 – Схеми розташування опорних роликів:
а – шахова; б – опозитна; в – змішана; з – із проміжними роликами

так і горизонтальних навантажень, що діють на робочі ролики. Машини із шаховим розташуванням опорних роликів застосовують зазвичай для холодної правки листів, що не мають окалини [1; 27].

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

Змішане розташування опорних і робочих роликів (рис. 1.7, в) використовують у машинах для холодної правки листів з окалиною. Наявність проміжних роликів (рис. 1.7, г) виключає на поверхні робочих роликів сліди контакту з опорними роликами, які відбиваються на листі, що обробляється.

Багатороликові правильні машини для правки листового металопрокату відрізняються великою різноманітністю конструктивних рішень. Для правки товстих листів застосовують правильні машини із числом робочих роликів 7–11. Для правки тонких листів і смуг число робочих роликів становить 17 і більше [1; 26–31].

За конструкцією вузла станин розрізняють машини станинного та колонного типу. У машинах станинного типу робочі та опорні ролики в траверсах, аналогічно прокатним клітям, розташовуються у вікнах станин. У листоправильних машинах зі станиною колонного типу роль станини виконують 4 колони, на яких розміщені траверси з роликівими вузлами [30].

Паралельне або похиле налаштування роликів здійснюється, як правило, переміщенням верхніх траверс за допомогою натискних механізмів. У старих машинах використовуються електромеханічні, а в сучасних – переважно гідравлічні механізми встановлення роликів. Незважаючи на широке поширення та постійне вдосконалення, електромеханічні натискні пристрої мають такі недоліки: незадовільна відтворюваність, низька точність, надмірна інерційність, складності комбінації з автоматизованою системою керування технологічним процесом, а також відсутність запобіжних функцій при перевантаженнях. Гідравлічні механізми установки роликів цих недоліків позбавлені [26; 27; 31; 46–49].

Для індивідуального налаштування використовуються додаткові механізми встановлення роликів.

На рисунках 1.8, 1.9 (див. с. 21) представлена конструкція листопрямуючої машини станинного типу з паралельним налаштуванням робочих роликів електромеханічним натискним механізмом із можливістю індивідуального налаштування вхідного та вихідного роликів [28]. Кожний робочий ролик має 2 опорні, загальне розташування опорних роликів попарне. Такий тип машин до 90-х років минулого століття був найпоширенішим для попередньої правки відносно товстих листів у гарячому стані [28–30].

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

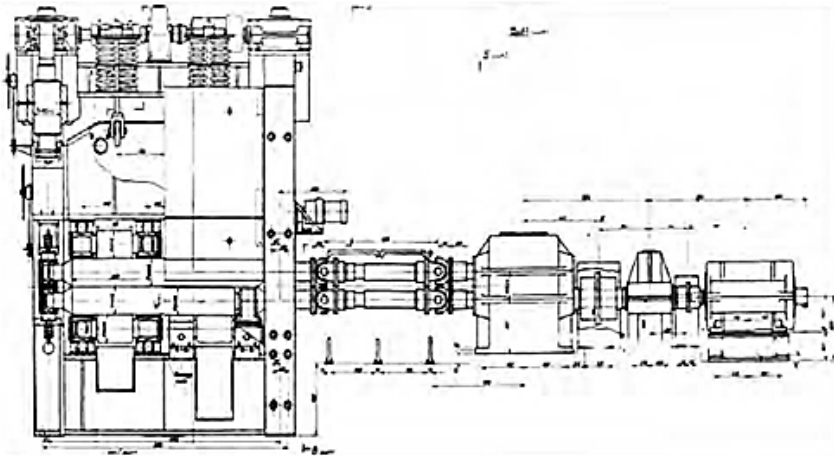


Рисунок 1.8 – Конструкція машини листопрямуючої $9 \times 300 \times 2800$, вид по головній лінії кліті [28]

Якість правки залежить також від кількості перегинів листа в правильній машині та від ступеня деформації штаби при реалізації кожного з них [1; 50; 51]. На рисунку 1.10 (див. с. 22) показана 17-роликів листоправильна машина з похилим налаштуванням роликів 1–4×1700 колонного типу для правки тонких листів (1–4 мм) завширшки до 1500 мм і завдовжки 2–4 м [28]. У машині передбачено 17 робочих роликів (9 у верхньому ряді та 8 у нижньому) діаметром 75 мм (довжина бочки 1700 мм, крок роликів 80 мм). У цій конструкції опорні ролики розташовані в шаховому порядку щодо робочих. Таке розташування треба вважати більш раціональним для машин, у яких діаметр робочих роликів невеликий, тому що при цьому досягається більша жорсткість робочих роликів у горизонтальній площині.

Опорні ролики (57 шт.) розташовані в 3 ряди по довжині бочки робочих роликів, розташування опорних роликів шахове; діаметр опорних роликів 75 мм, довжина бочки 350 мм.

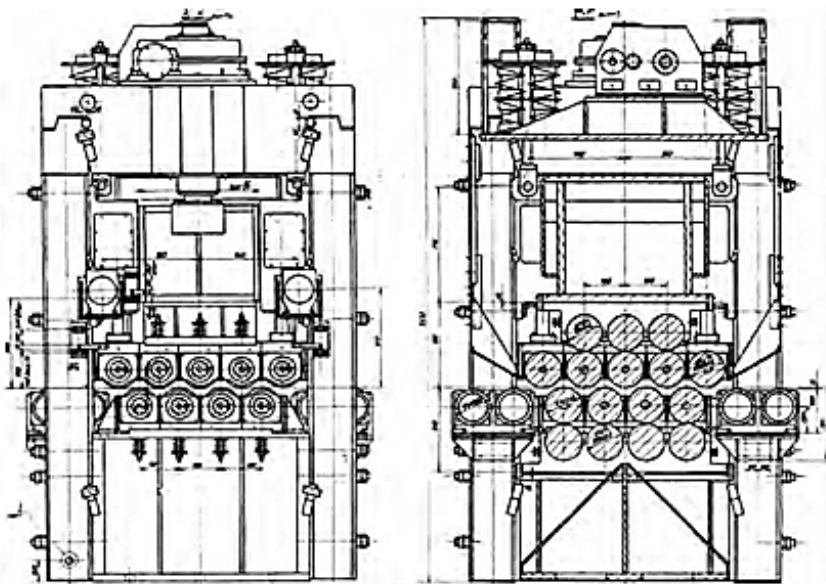


Рисунок 1.9 – Конструкція 9-роликів листоправильної машини 9×300×2800, вид із боку обслуговування та переріз по роликах [29]

Опускання верхньої траверси та тиск роликів на лист здійснюються чотирма натискними гвинтами, кожний із яких приводиться від окремого електродвигуна. Підйом верхньої траверси здійснюється чотирма пружинами, розташованими внизу в станині. Індивідуальний привод кожного гвинта дає можливість змінювати нахил траверси у двох напрямках, що необхідно для підвищення точності правки окремих листів. Крім того, для підвищення точності правки передбачена можливість попереднього місцевого прогину робочих роликів, причому для кожного ряду опорних роликів передбачене окреме регулювання. Для цього опорні ролики кожного одного окремого ряду встановлені в окремій траверсі, яка може переміщатися натискними гвинтами з ручним приводом штурвалів. Регулювання нахилу всієї верхньої траверси та підтискання кожного ряду опорних роликів дає змогу правити окремі листи з різною хвилястістю, а також місцеву коробуватість, що є перевагою конструкції цієї машини.

Одним з істотних недоліків описаних традиційних листопривильних машин є можливість реалізації технологічного процесу в обмеженому діапазоні товщин [1; 46–48].

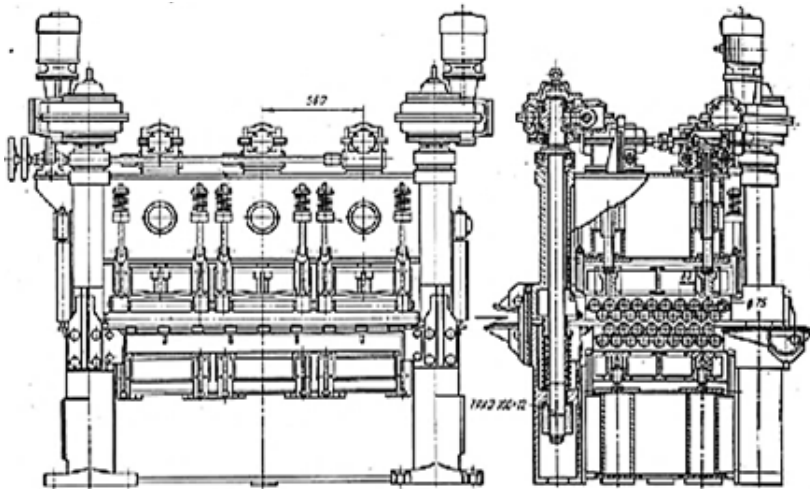


Рисунок 1.10 – Конструкція 17-роlikової листопривильної машини для правки холоднокатаних смуг [28]

Відомі конструктивні рішення, при реалізації яких машина оснащується двома групами роликів різного діаметра та кроку, змонтованими на загальній рухомій траверсі. Така машина може правити тонкий метал першою групою роликів (меншого діаметра), а більш товстий метал – другою групою, що має більший діаметр і крок [1; 31; 46–48]. Оскільки машина не має індивідуально регульованих роликів, така конструкція здатна реалізувати похиле технологічне налаштування.

Для того, щоб збільшити кількість роликів, що передають листу найбільші деформації вигину та поліпшити задавання листа, американська фірма “Sutton” запропонувала машину з подвійним кутовим налаштуванням (рис. 1.11) [51]. Робочі ролики цієї машини розташовуються в трьох зонах. Схему розташування роликів і розподіл кривизни за зонами правки показано

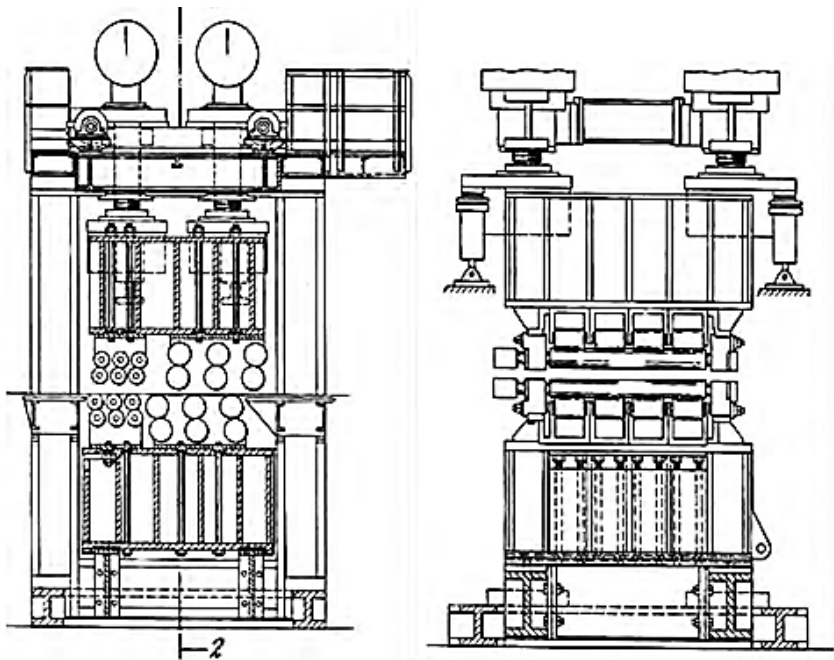


Рисунок 1.11 – Конструкція листопривильної машини фірми Sutton [51]

на рисунку 1.12. Такі машини застосовують для прецизійної правки листів і смуг із чорних і кольорових металів товщиною від 0,025 до 20 мм.

На рисунку 1.13 показаний загальний вид сучасної листоправлильної машини стану 2300/1700. Машина має 11 робочих правильних роликів діаметром 280 мм, розташованих із кроком 300 мм. Залежно від товщини листів може бути реалізовано

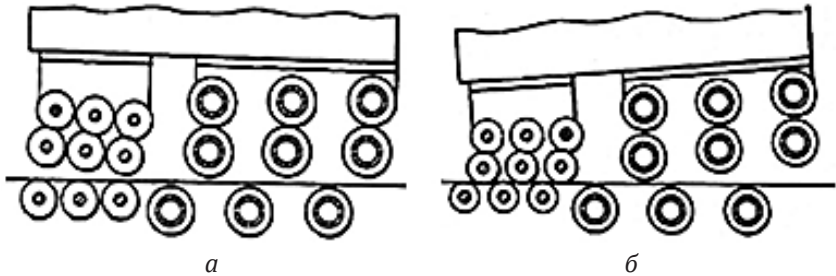


Рисунок 1.12 – Налаштування листоправлильної машини фірми Sutton [51]:
а – схема правки товстого листа; б – схема правки тонкого листа

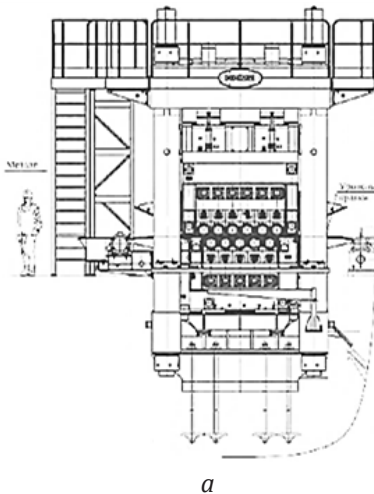


Рисунок 1.13 – Конструкція ЛПМ стану 2300/1700:
а – загальний вигляд машини; б – фото в лінії стану

2 схеми налаштування: 11-роликівна схема – для правки тонких листів і 5-роликівна – для правки відносно товстих і середніх за товщиною листів. Завдяки наявності механізму горизонтального зсуву нижньої касети в напрямку проходження металу, що правиться, а також наявності механізмів індивідуального налаштування вертикальних положень правильних роликів, створена можливість мобільного переналагодження машини з 11-роликівної схеми правки на 5-роликівну, що дає змогу збільшити радіус вигину листів і тим самим розширити діапазон товщин металопрокату, що обробляється, а також створити ефективні технологічні параметри вигину, що зі свого боку підвищує якість металопродукції.

На рисунку 1.14, а (див. с. 26) показана 9-роликівна ЛПМ колонного типу фірми “Danieli” для правки товстих листів, що оснащена гідравлічними натискними механізмами та гідравлічними приводами індивідуальних налаштувань кожного з робочих роликів [52]. Асинхронна робота передньої та задньої по ходу правки пар натискних гідроциліндрів дає змогу здійснювати позовжнє похиле налаштування роликів, а правої та лівої по ходу правки пари – поперечне.

Кожний робочий ролик спирається на вісім пар опорних дисків, установлених зі зсувом у різні боки від його осі (рис. 1.14, б (див. с. 26)). У ЛПМ є можливість індивідуального налаштування кожного ролика за допомогою клинових пар, установлених над касетами верхніх і під касетами нижніх опорних дисків, які приводяться кожна від індивідуального гідроциліндра (рис. 1.14, б, в (див. с. 26)). Причому над верхніми роликами встановлені по два клини із зустрічним нахилом, що дає змогу здійснювати індивідуальне поперечне похиле налаштування роликів.

Одним із сучасних напрямків у розвитку процесів правки листового прокату є усунення дефектів площинності, нерівномірно розподілених за шириною листів. У світовій практиці ця задача вирішується вигином одного або декількох робочих роликів по довжині бочки за допомогою існуючих або додаткових механізмів (рис. 1.6, з). Принципова можливість таких налаштувань є в конструкціях ЛПМ з індивідуальним налаштуванням

опорних роликів (рис. 1.11, 1.12). Однак діапазон регулювання таких конструкцій досить обмежений.

У наш час на багатьох листопрямильних машинах знайшла застосування конструкція фірми "SMS DEMAG" з «ламкою» верхньою траверсою, схема якої представлена на рисунку 1.15 (див. с. 27) [53]. Основною перевагою описуваної конструкції є можливість поздовжнього вигину правильних роликів для правки, як центральної, так і кромочної хвилястості.

Основний недолік цієї конструкції – низька навантажувальна здатність, тому що найбільш навантаженим

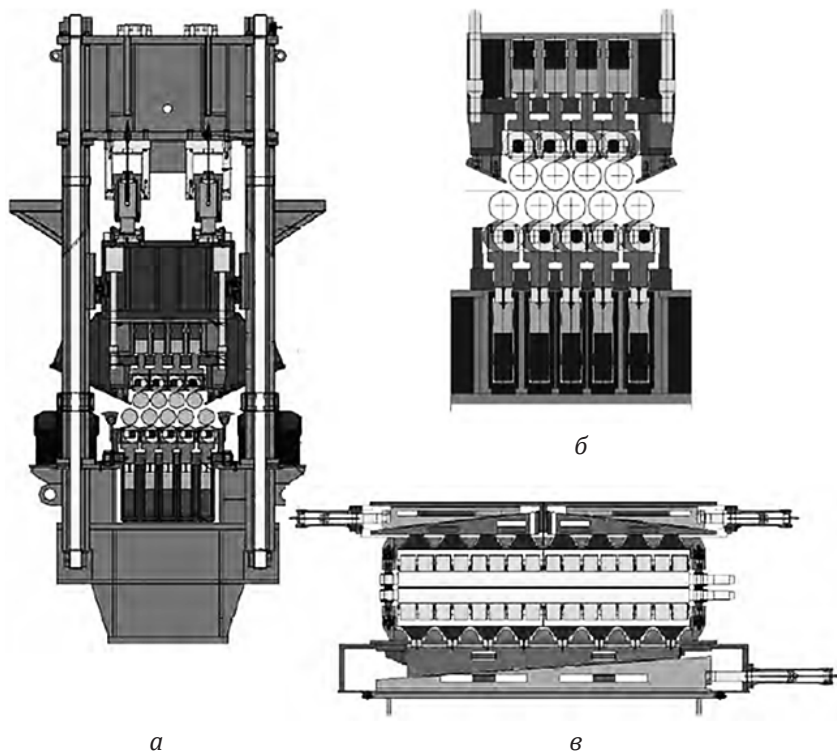


Рисунок 1.14 – Конструкція 9-роlikової листопрямильної машини фірми Danieli для холодної правки товстих листів:

a – загальний вигляд машини; *б, в* – вузол роликів із клиновими механізмами індивідуального налаштування

елементом є вісь, навколо якої відбувається поворот частин верхньої траверси.

У ряді випадків застосовують примусовий вигин робочого ролика за допомогою механізмів, дискретно розташованих по довжині його бочки. На рисунку 1.16 показана конструкція

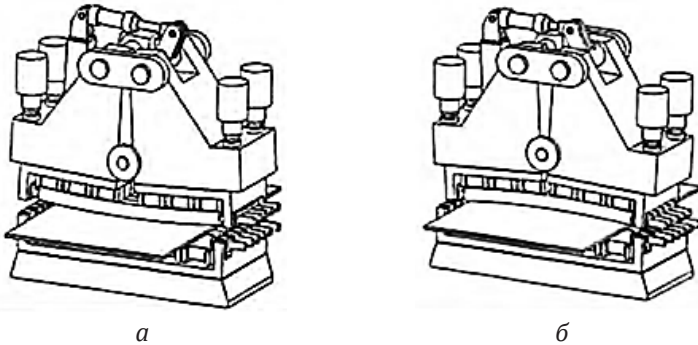


Рисунок 1.15 – Конструкція листопривильної машини фірми SMS DEMAG [54]:

а – вигин роликів для правки центральної хвилястості;
б – вигин роликів для правки кромочної хвилястості

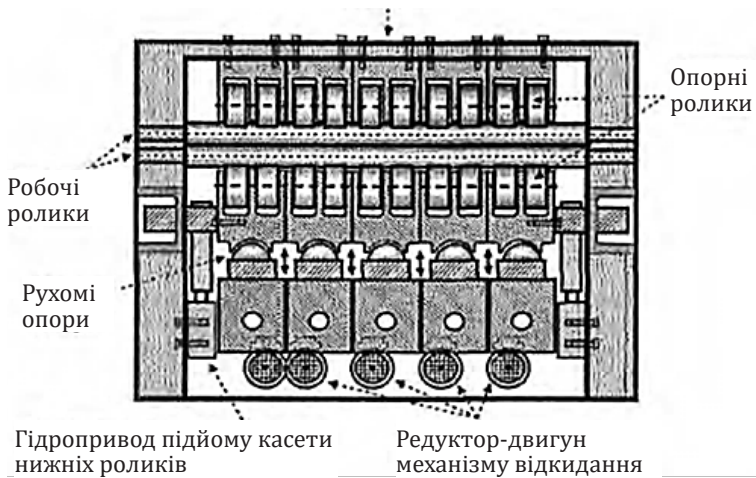


Рисунок 1.16 – Роликовий вузол 11-роlikової листопривильної машини фірми Fagor Arrasate [54]

11-роlikової правильної машини фірми “Fagor Arrasate” (Іспанія) з механізмом вигину нижніх робочих роликів у вигляді п’яти рухливих упорів, розміщених під касетами опорних роликів-дисків [54].

Схема машини з механізмом у виді гідроциліндрів вигину робочого ролика, дискретно розміщених за довжиною (рис. 1.17), наведена в роботі [55].

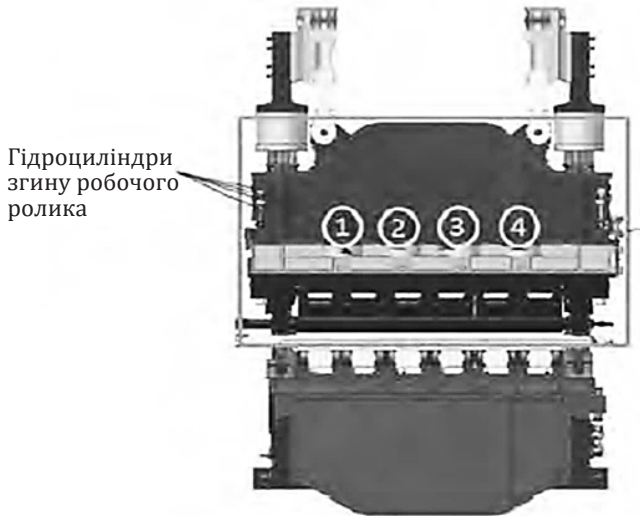
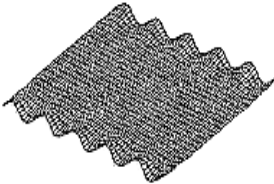

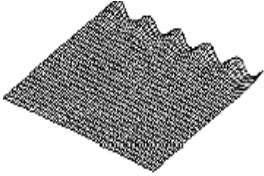

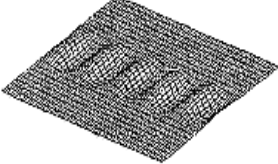

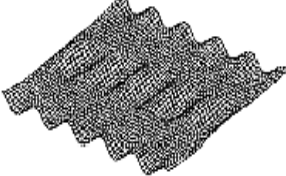

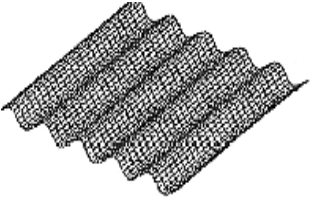



Рисунок 1.17 – Механізм вигину робочого ролика гідравлічними циліндрами [55]

Характер настроювань роликів залежно від виду дефекту, що виправляється (табл. 1.4, див. с. 29) наведений у роботі [56]. У комбінації з розвиненими системами керування, візуалізації та діагностики, розглянуті ЛПМ дають змогу вирішувати питання підвищення якості листового металопрокату на сучасному рівні.

Таблиця 1.4 – Види налаштувань робочого ролика залежно від дефекту площинності, що виправляється [56]

Дефект площинності	Вигляд дефекту	Налаштування роликів
Двостороння хвилястість крайок		
Однобічна хвилястість крайки		
Коробуватість		
Коробуватість із хвилястістю крайок		
Хвилястість за шириною		

1.3 Методи розрахунків процесів правки знакозмінним вигином на багатороликових машинах

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

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

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

За результатами низки теоретичних і експериментальних досліджень [6; 13; 14; 57] залежно від співвідношення кроку роликів t і товщини h металу, що виправляється, усі процеси правки можуть бути поділені на правку відносно товстих $t/h < 10$ і відносно тонких $t/h \geq 10$ листів і смуг. При цьому з погляду напружено-деформованого стану (НДС) у першому випадку домінуючим є вплив зсувних напружень, а в другому – вплив зовнішнього тертя на контактних поверхнях робочих роликів [57].

Серед аналітичних інженерних моделей найбільше поширення здобули різного роду рішення рівняння пружної лінії робочого ролика з використанням розрахункової схеми металу, що виправляється, у вигляді статично невизначеної багатопорної балки [1; 17; 32; 49; 52; 56; 58–64]. Проектувальні методи розрахунків дають змогу концептуально вибрати основні

конструктивні параметри технології правки та обладнання правильних машин [1; 26; 27; 32; 51; 56].

Основними конструктивними параметрами багатороликових листопривильних машин є крок t , діаметр d і кількість роликів n . Для орієнтовного визначення можливих найменшого та найбільшого кроку роликів машини, за яким можлива правка та реалізована конструкція ЛПМ, О. І. Целіковим і А. А. Корольовим були запропоновані залежності [28; 30]:

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

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

$$t_{\max} = 0,35hE / \sigma_s, \quad (1.4)$$

де E , σ_s – модуль пружності та напруження текучості матеріалу, що виправляється,

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

$$t_{\min} = \sqrt[3]{25,6Bh^2}; \quad t_{\max} = 8fr_y / k_{\text{ост2}}, \quad (1.5)$$

де r_y – граничний пружний радіус вигину листа товщиною h ;

$k_{\text{ост2}}$ – коефіцієнт відносної деформації під другим роликом.

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

$$d = (0,9 - 0,95) t, \quad (1.6)$$

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

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

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

Відносну деформацію при правці можна прийняти як [56]:

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

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

Швидкість деформації при правці дорівнює [1; 50]:

$$U = \frac{\varepsilon V_B}{t}, \quad (1.9)$$

де V_B – швидкість правки;
 t – час деформації.

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

Для опису механічних властивостей при гарячій деформації серед багатьох аналітичних залежностей, представлених у вітчизняній літературі [65–71], найбільше поширення набула аналітична залежність Л. В. Андреюка, яка охоплює в порівнянні з іншими широкі коло матеріалів і яка враховує опір деформації σ_s залежно від її ступеня ε , швидкості U і температури t° [70]:

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Умови зовнішнього тертя при обробці тиском, у тому числі, і при правці, залежно від ефективності технологічних змащень, що використовуються, шорсткостей контактних поверхонь і низки інших чинників, розглянуті в роботах [76–81]. При цьому для аналітичного опису умов тертя використовують, переважно, умову Амонтона – Кулона, згідно з якою величина дотичних напружень τ на контактних поверхнях може бути визначена як $\tau = pf$, де p і f – відповідні значення нормальних контактних напружень і коефіцієнта зовнішнього тертя. Втім, більшість зі вказаних досліджень відноситься до контактних взаємодій металу з валками переважно при прокатці. Експериментальні дослідження тертя між робочими роликками та металом саме при правці приведені в роботі [82], на їх основі одержані рекомендації з вибору значень коефіцієнтів тертя для різних матеріалів. Результати досліджень були адаптовані для скінченно-елементного моделювання.

Що стосується методів розрахунків безпосередньо напружено-деформованого стану металу при реалізації різних технологічних схем процесу правки, то є досить велика кількість математичних моделей, що відрізняються за постановкою, математичним апаратом і, як наслідок, за об'ємами і ступенем вірогідності інформації, що надається. Умовно, дані математичні моделі можуть бути підрозділені на інженерні алгоритмічні комбінації, що представляють собою закінчені аналітичні залежності, та чисельні, що припускають обов'язкове використання відповідних обчислювальних засобів [1; 56; 62; 73; 74].

Досить широко використовуються аналітичні рішення, отримані А. С. Остринським на основі розвитку методик О. І. Целікова та А. А. Корольова, побудовані на аналогічних принципах [56]. Розрахункова схема та прийнята схема розподілу кривизни листа в цих рішеннях, а також еюра згинальних моментів представлені на рисунку 1.18.

У зв'язку з тим, що процес правки розглядається як пружно-пластичний вигин балки поперечного перерізу $B \times h$, одним

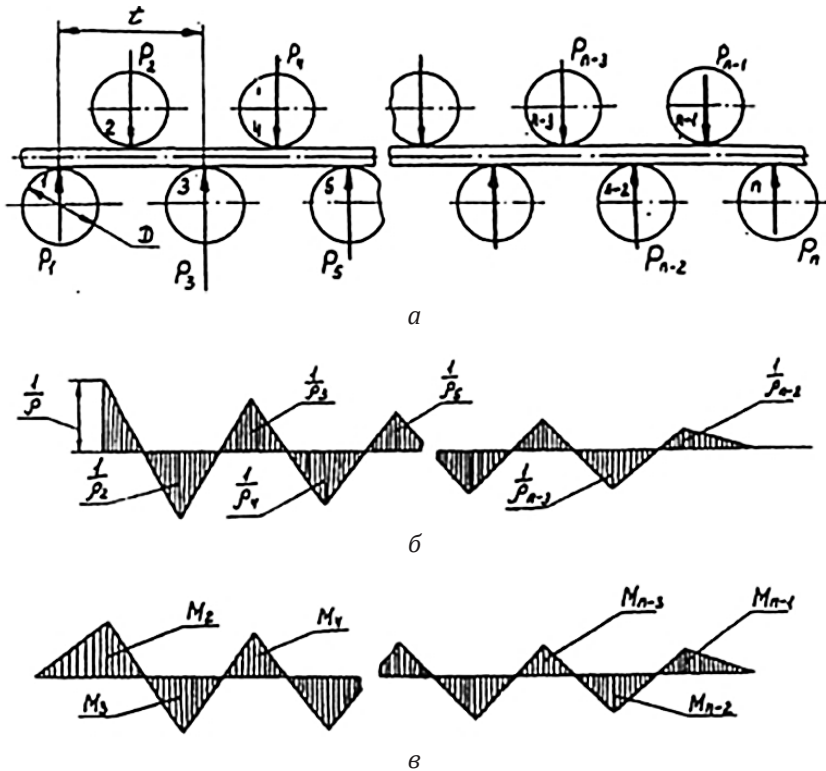


Рисунок 1.18 – Розрахункова схема процесу правки

на багатороликовій правильній машині [56]:

а – схема розташування роликів і діючих сил;

б – прийнятий розподіл кривизни за довжиною листа;

в – еюра згинальних моментів за довжиною листа

з основних понять розглянутих методик є коефіцієнт проникнення пластичної деформації:

$$k = h / 2z_0,$$

де $z_0 = \frac{\sigma_s}{E \left(\frac{1}{r_0} + \frac{1}{r} \right)}$ (рис. 1.18, 1.19) [56].

Так, наприклад, при паралельному настроюванні роликів цей коефіцієнт приймають рівним 0,67 під кожним із роликів. Далі в методиці А. С. Остринського [57] використовується залежність для визначення моментів правки (рис. 1.18, в):

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

де R – радіус правильного ролика;

k_i – коефіцієнт пружної деформації, що визначає відносні розміри пружного ядра (рис. 1.20, див. с. 36);

$$k_i = \frac{2\sigma_s}{Eh} \frac{1}{\frac{1}{\rho_{(i-1)}} + \frac{1}{\rho_i}},$$

де $\frac{1}{\rho_{i-1}}$ – кривизна листа в перерізі, що проходить по осі ролика $(i-1)$ і спрямована в протилежний бік кривизни $\frac{1}{\rho_i}$.

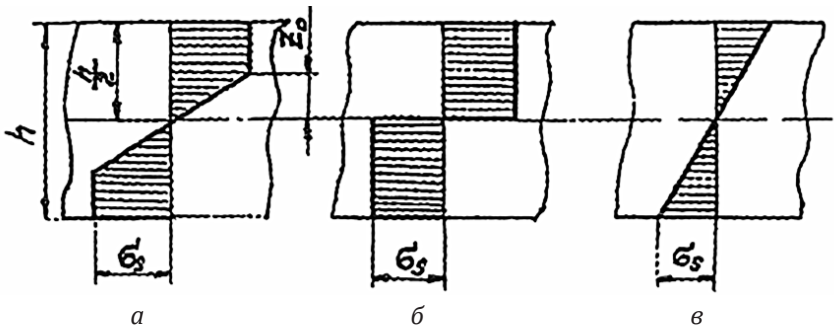


Рисунок 1.19 – Епюри розподілу напружень за товщиною листа при пружно-пластичному (а), пластичному (б) та пружному (в) вигині

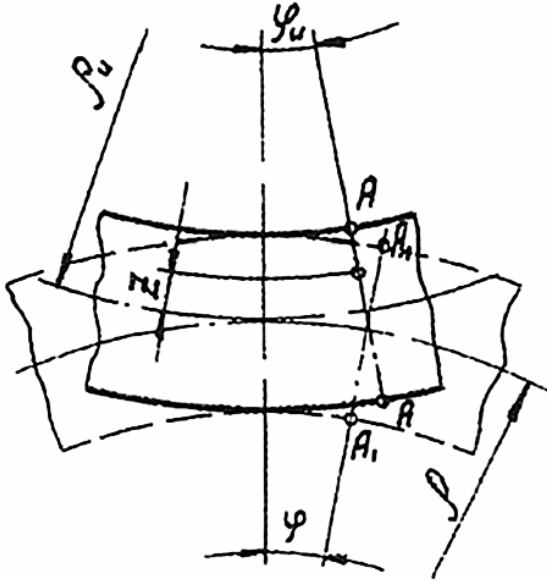


Рисунок 1.20 – Схема до визначення коефіцієнта k

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

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

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

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

На сьогодні розвиток аналітичних методів розрахунків процесів правки йде в напрямку подальшого уточнення рішень за рахунок урахування низки чинників і особливостей процесу.

Так, для оцінювання неоднорідності деформації за товщиною листа в роботі [83] була створена модель зміщення шару з нейтральним напруженням на основі теорії триточкового вигину, характеристик вигину сталевго листа та теорії шарів у процесі вирівнювання. Явище зміщення шару з нейтральним напруженням та взаємозв'язок між радіусом зворотного вигину, товщиною

пластини та деформаційною здатністю металу доведені теоретично та в експерименті з виправлення.

У роботі [84] враховані зміцнення та порядок додатку зовнішніх навантажень, які можуть як перевищувати межу плинності оброблюваного матеріалу, так і не досягати її.

Для оцінювання максимально припустимої деформації використовують результати випробувань на міцність. У роботі [85] розроблено методику з визначення пружності крайок для різних марок сталей, у тому числі й високоміцних.

Більшість сучасних рішень враховує ефект Баушингера, а саме гістерезисний характер шляхів навантаження – розвантаження металу при знакозмінному вигині. При цьому надають увагу випробуванням на циклічні навантаження та їх адаптації до проектних розрахунків процесів правки [86–88].

Методика розрахунків видовження смуги, що враховує зміцнення, була запропонована в роботах [89; 90]. При цьому для кожної зони пружного та пластичного навантаження (розвантаження) прийнята окрема математична залежність між деформацією та напруженням. У роботі [90] при рішенні задачі для визначення механічних властивостей матеріалу смуги при правці прийнята діаграма розтягування з пружною зоною та пластичною зоною зі зміцненням.

Методика графічної побудови епюри напружень при переході від кривизни середнього шару прокату з відомим розподілом напружень до остаточної кривизни наведена в роботах [91; 92].

Теоретичні основи методики розрахунків силових і геометричних параметрів процесу багаторазового пружно-пластичного вигину смуги з урахуванням зміцнення розроблені в роботах [93; 94]. За межею пружності поведінка матеріалу моделюється лінійним законом зміцнення з урахуванням принципу Мазінга. У випадку вигину авторами досить строго враховується історія деформування. Ця методика дозволяє одержувати досить точні результати тільки в граничному випадку, близькому до чистого пластичного вигину, тому що перехід до розтягування з вигином здійснюється приблизно, за допомогою відповідного коефіцієнта.

До однієї з найбільш повних за колом вирішених питань треба віднести роботу японських авторів [95], що спирається на теоретичні дослідження, представлені в роботах [96; 97]. Автором роботи [96] пропонується методика розрахунків подовження смуги на основі додавання площ епюр напружень у подовженому напрямку від розтягування та від вигину. Робота [97] зводиться до графічних побудов на основі наведеного рівняння поведінки матеріалу, що зміцнюється, в умовах плоского напруженого і деформованого станів.

Врахування наявності пластичної та пружної зони проводиться в роботі [98], причому метал, що деформується, розглядається як навантажена балка з трапецієподібною схемою виправлення. В області пластичних деформацій враховується зміцнення матеріалу за лінійним або степеневим законами [99–101]. Робиться висновок про необхідність врахування ефекту Баушингера при розрахунках збільшення натягіння. Розрахунок першого циклу навантаження проводиться аналітично, інших – чисельно.

Окрім аналітичних моделей напружено-деформованого стану металу при правці ряд авторів оцінюють також можливості реалізації процесу за умов захоплювання металу роликками правильної машини залежно від його кривизни та параметрів налаштувань роликів [102; 103].

Пропоновані методики, поряд із відносною простотою, мінімальною трудомісткістю та максимальною швидкодією чисельної реалізації, переважно спрямовані на визначення енергосилових параметрів процесу, залишаючи осторонь моделювання геометричної форми металу, що виправляється, величину та характер розподілу залишкових напружень. У перерахованих роботах авторами були запропоновані аналітичні залежності, основними недоліками яких є неможливість урахування впливу залишкових напружень від попереднього циклу навантаження на картину напружень у наступному циклі, а також формування залишкової кривизни, неможливість прогнозування локальних характеристик напружено-деформованого стану металу при реалізації процесу правки, відсутність урахування впливу

початкових показників якості готового металопрокату на величину залишкових дефектів.

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

Завдяки вищевикладеному з удосконаленням обчислювальної техніки був здійснений інтенсивний розвиток різноманітних математичних моделей процесів обробки тиском. З погляду кількості геометричних координат, уздовж яких враховується зміна умов пластичного деформування, ці математичні моделі можуть бути підрозділені на одномірні, двомірні та тривимірні. Розроблений також і клас імітаційних математичних моделей, що враховують додатково зміну умов реалізації процесів обробки тиском у часі [51; 88; 93; 102–110].

У роботі [64] для визначення розподілів остаточних напружень у листі після правки використано чисельну модель 7-роликів правильної машини. Для досягнення цієї мети було розроблено рішення, що ґрунтується на використанні трьох незалежних трикутників навантаження. Перший трикутник навантаження на другому роликів слугував для визначення пластичної деформації, трикутник у середині четвертого ролика – для визначення впливу на розподіл остаточних напружень, а за допомогою останнього на шостому роликів прогнозували площинність листа. Було запропоновано визначати характеристики листа шляхом вимірів сили в першому трикутнику навантаження. У роботі пропонується використовувати одержані результати для корегування налаштувань керування процесом правки, які можуть забезпечити як площинність листа, так і певний розподіл остаточних напружень залежно від характеристик листа.

Математична модель процесу правки відносно товстих листів, що була розроблена в Донбаській державній машинобудівній академії (ДДМА) та УкрНДІметалургмаші, ґрунтується

Таблиця 1.5 – Аналітичні залежності математичної моделі процесу правки на багатороликових правильних машинах УкрНДІметалургмаш – ДДМА [93]

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

При розробленні цієї математичної моделі в основу були покладені такі основні припущення:

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

У цій постановці задачі її рішення спирається на геометричні координати робочих роликів правильної машини, геометричні характеристики та показники механічних властивостей матеріалу листа, що правиться. У цьому випадку така характеристика ефективності умов реалізації технологічного режиму правки, як коефіцієнт проникнення, є розрахунковою та визначається на основі розв'язку пружної лінії листа. У рамках цього рішення був використаний ітераційний метод цілеспрямованого перебирання варіантів із наступним визначенням діючих на правильні

ролики сил, крутних моментів і результуючої кривизни виправлених листів.

До основних недоліків перерахованих робіт треба віднести припущення про досягнення кривизною штаби кривизни робочих роликів, що дало змогу звести постановку задачі до одномірної, однак призвело до істотного завищення одержуваних енергосилових параметрів; врахування далеко не всіх технологічних параметрів реалізованого процесу, наприклад, перекриттів і кроків між роликами; неможливість прогнозування більш складного характеру дефектів площинності, а також автоматизованого проектування технологічних режимів роботи механічного устаткування машин для правки з урахуванням вихідних і результуючих показників якості оброблюваного металопрокату. Більшість цих недоліків були усунені в роботах учених ДДМА [112; 113], однак у них також задачу правки було вирішено в одномірній постановці, що не дає можливості їх використання для моделювання виправлення поперечної хвилястості.

Найбільш строгими по постановці та водночас найбільш інформативними серед чисельних рішень є дво- і тривимірні математичні моделі, ґрунтуються на використанні варіаційних методів [114–116], методу скінченних елементів (МСЕ) [117–120] або методу граничних елементів [121].

У наш час найбільше поширення в теорії обробки тиском одержали математичні моделі, засновані на використанні методу скінченних елементів [117–120]. Розроблено низку пакетів програм, що реалізують зазначений метод як для дослідження процесів пластичної деформації, так і для розрахунків напружено-деформованого стану деталей і вузлів машин. До перших відносяться САЕ-пакети, серед яких найбільше поширення одержали DEFORM, QFORM, ABAQUS [117; 122–124]. Найпоширенішим для розрахунків устаткування є програмний продукт SolidWorks Simulation [125].

Стосовно до особливостей процесу правки знакозмінним вигином метод скінченних елементів використано в роботах [126–136], а стосовно можливостей та налаштувань правильних машин – у роботах [137–142]. Водночас низка питань, таких, як правка нерівномірно розподілених по ширині дефектів

площинності, для яких використання МСЕ представляється найбільш раціональним, залишається невирішеним.

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

Більш раціональною в цьому випадку є розроблення регресійних залежностей на основі реалізації скінченно-елементних моделей [143; 144], при цьому раціональним може бути підхід у комбінації МСЕ з теорією планованого експерименту [145–147].

Можливості сучасних ЕОМ із накопичення та обробки масивів інформації дали поштовх ще одному підходу до рішення задач вдосконалення роботи правильних машин. Він ґрунтується на використанні накопичених виробничих даних, одержаних із діючого обладнання. У роботі [148] для розроблення технологій правки був запропонований метод глибокого навчання. У цьому випадку використовується досвід правки, тобто з накопиченої інформації про технологічні режими правки вибирають найбільш вдалі налаштування листоправильних машин для правки цього сортаменту.

Підсумовуючи огляд літературних джерел, треба відмітити таке:

- з погляду теорії правки на багатороликових листоправильних машинах її розвиток йде шляхом уточнення математичних моделей за рахунок більш точного ірахування і опису фізичних явищ, умов і геометрії процесу з використанням сучасних методів теоретичних досліджень;

- розвиток технологій правки листів передбачає розширення видів дефектів листів, що можуть виправлятися, зокрема, усунення крім поздовжньої кривизни ще і хвилястості та коробуватості листів, що можливо в сучасних конструкціях листоправильних машин шляхом контрольованого вигину робочих роликів. На сьогодні цей напрям вивчено недостатньо, що обумовлює актуальність проведення дослідження процесу правки гарячекатаних листів.

2 | МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ЕНЕРГОСИЛОВИХ І ГЕОМЕТРИЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ПРОЦЕСУ ПРАВКИ ГАРЯЧКАТАНИХ ЛИСТІВ

2.1 Методи теоретичних досліджень процесів правки

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

Математичне моделювання напружено-деформованого стану металу та результуючих показників якості при реалізації процесів правки відносно товстих листів, штаб і заготовок може бути здійснене на основі використання різних підходів, аналітичних і чисельних, найбільш інформативним із яких у цей час є метод скінченних елементів [117–120]. Водночас у цьому випадку має місце досить істотна трудомісткість чисельної реалізації, а, отже, і витрати машинного часу, що не дають змогу використовувати ці підходи як цільові функції систем автоматизованого налаштування правильних машин і керування технологічними режимами їх роботи.

З огляду на зазначене становлять інтерес математичні моделі, засновані на використанні чисельно-аналітичних підходів, що представляють процес правки в системі двовимірних координат, при цьому заготовка розглядається як ідеальна пружно-пластична одномірна балка з наступним ітераційним рішенням системи рівнянь її геометричної форми [149; 150]. У цьому випадку виконується розбиття поперечних перерізів металу, що деформується, на кінцеву безліч елементарних об'ємів із наступним чисельним рекурентним рішенням, що впливає з умови статичної рівноваги. Реалізація цього підходу дає змогу

враховувати реальний характер розподілів граничних умов за висотою та шириною осередку деформації при прийнятних витратах машинного часу. Використання ж розглянутих вище більш строгих підходів у сполученні з результатами експериментальних досліджень є доцільним із погляду критеріальної оцінки ступеня вірогідності отриманих теоретичних рішень.

Для зниження трудомісткості та витрат на проведення наукових досліджень доцільним є також застосування теоретичних методів аналізу, як інженерних, так і заснованих на комп'ютерному моделюванні чисельними методами, які з високою точністю розраховують реальні фізичні процеси. Інтенсивне застосування комп'ютерних експериментів сприяє розширенню кількості одержуваної інформації завдяки урахуванню ступеня впливу основних технологічних і конструктивних параметрів на напружено-деформований стан (НДС) у заготовці. Для оцінювання ступеня вірогідності отриманих теоретичних результатів та уточнення вихідних даних по реології матеріалу для чисельного моделювання мають бути виконані відповідні експериментальні дослідження.

2.2 Математична модель із розрахунку енергосилових і геометричних параметрів процесів правки горячекатаних листів

На початкових стадіях проектуванні нового обладнання та удосконалення технології правки листового металопродукату, тобто, на стадії прийняття оціночних рішень, доцільним із погляду співвідношення часу на реалізацію та потрібної точності результатів є використання одновимірних методик розрахунків напружено-деформованого стану, які дають змогу вирішувати завдання оптимізаційного плану. Відповідно до цього в даній роботі достатня увага приділена аналітичній одновимірній моделі процесу правки, відмінною рисою якої є врахування таких чинників, як безперервність епюри кутів повороту на границях розрахункових ділянок листа, зсув точки контакту

від вершини ролика по горизонталі та вертикалі, вплив залишкових напружень, можливість переходу зосередженого контакту в розподілений і врахування зміцнення металу при виправленні.

Для спрощення моделі та зниження трудомісткості обчислень була прийнята низка припущень:

- геометрична лінійність задачі, що дає змогу внаслідок малості кутів нахилу листа описувати кривизну за спрощеною формулою $\chi = d^2 y / dx^2$;

- кусочно-лінійна апроксимація епюри згинальних моментів при вертикальному напрямку реакцій роликів через малість кутів нахилу листа;

- у моделі розглядається два випадки: матеріал листа або не зміцнюється, або його пластичний стан визначається принципом Мазінга та ефект Баушингера враховується як ідеальний [151; 152].

Розрахункова схема, що використовується при математичному моделюванні, представлена на рисунку 2.1, де показана i -та мікроликова ділянка.

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

Згідно з розрахунковою схемою лінійні координати дорівнюють:

$$\Delta x'_i = \Delta x_i + 0,5[(d_i + h) \sin \beta_i - (d_{i+1} + h) \sin \alpha_{i+1}]; \quad (2.1)$$

$$c'_i = c_i - [(d_i + h) \sin^2 0,5\beta_i + (d_{i+1} + h) \sin^2 \alpha_{i+1}]; \quad (2.2)$$

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

де c_i – прогин листа для цієї пари суміжних роликів без урахування зсуву;

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

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

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

$$k = Eh\chi / 2\sigma_T; \quad (2.3)$$

$$m = 6M / \sigma_T Bh^2. \quad (2.4)$$

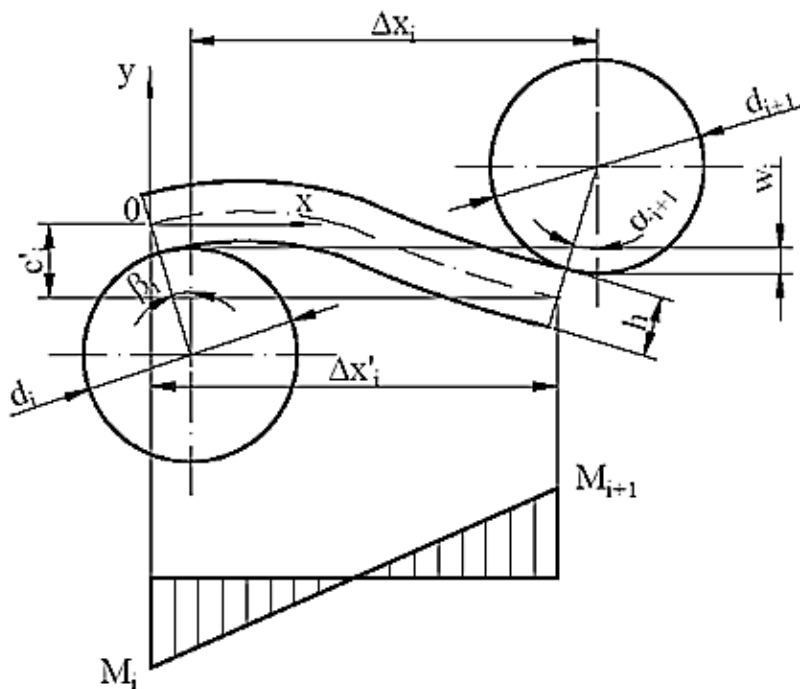


Рисунок 2.1 – Розрахункова схема до математичної моделі процесу правки листового металопрокату

У більшості випадків контакт листа з роликами в правці вигином є зосередженим, тобто для цього випадку рівняння (2.1)–(2.4) можуть бути доповнені умовами рівності:

$$\alpha_i = \beta_i \text{ при } i = 2 \dots n-1 \quad (2.5)$$

за допомогою яких забезпечується узгодження кутів нахилу листа на границях окремих ділянок і тим самим безперервність епюри кута повороту перерізів. Однак, для урахування всіх можливих випадків правки, доцільно передбачити також можливість переходу до розподіленого контакту, при якому на роликах виникають ненульові кути охоплення $\varphi_i = \alpha_i - \beta_i$, що можна врахувати при виконанні умови $k_i > k_{\text{lim } i}$, де $k_{\text{lim } i}$ – гранично можливе значення відносної кривизни вигину на ролику:

$$k_{\text{lim } i} = \frac{E h}{\sigma_m (d_i + h)}. \quad (2.6)$$

У цьому випадку замінюємо i -е рівняння (2.3) рівнянням (2.6).

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

$$k = \begin{cases} m - k_i + m_i, & -m_i \leq m \leq 0; \\ \varphi(m) - k_i + m_i, & 0 \leq m \leq m_{i+1}. \end{cases} \quad (2.7)$$

З аналізу моделі Мазінга випливає, що у випадку коливань з зростаючою амплітудою залежність між кривизною та моментом у межах одного циклу деформування узгоджується з цим принципом лише доти, поки ширина та висота гістерезисної напівпетлі не зрівнюються зі своїми старими значеннями наприкінці попереднього циклу, після чого процес знову буде описуватися в координатах k, m вихідною залежністю. Отже, у загальному випадку для i -ї ділянки:

$$k = \begin{cases} 2\phi\left(\frac{m_i + m}{2}\right) - k_i, & m \leq m(i)_{\max}; \\ \varphi(m) + (-1)^i k_0, & m > m(i)_{\max}; \end{cases} \quad (2.8)$$

$$m_{\max}(i) \dots = \max(m_1 \dots m_i), \quad (2.9)$$

де k_0 – безрозмірна вихідна кривизна.

Якщо амплітуда коливань починає убувати, петлі гістерезису стають розімкнутими й обчислення йдуть тільки за першою частиною формули (2.8). Для першої ділянки $m_{\max 1} = m_1 = 0$, й обчислення йдуть однозначно за другою частиною, тобто має місце вихідна залежність.

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

Вид функції $\varphi(m)$ з урахуванням (2.4) визначається прийнятим законом зміцнення. Для ідеального пружнопластичного тіла:

$$\varphi(m) = \begin{cases} m, & m \leq 1; \\ 1 / \sqrt{3-2m}, & m > 1. \end{cases} \quad (2.10)$$

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

$$\frac{d^2y}{dx^2} = \chi(M(x)) \quad (2.11)$$

з граничними умовами

$$x=0 \rightarrow y=0; \quad dy/dx = \operatorname{tg} \beta_i; \quad x = \Delta x_i \rightarrow y = -c_i; \quad dy/dx = \operatorname{tg} \alpha_{i+1}. \quad (2.12)$$

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

$$M = (M_i + M_{i+1})x / \Delta x_i' - M_i. \quad (2.13)$$

При $-M_i \leq M \leq M_{i+1}$ рішення рівняння кривизни $\chi = d^2y/dx^2$ з урахуванням формули (2.13) й умов (2.1)–(2.2):

$$\frac{\partial y}{\partial x} = \operatorname{tg}\beta_i + \frac{\Delta X_i'}{M_i + M_{i+1}} \int_{-M_i}^M \chi dM ;$$

$$y = \Delta X_i' \operatorname{tg}\beta_i \frac{M_i + M}{M_i + M_{i+1}} + \left(\frac{\Delta X_i'}{M_i + M_{i+1}} \right)^2 \int_{-M_i}^M dM \int_{-M_i}^M \chi dM . \quad (2.14)$$

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

$$\operatorname{tg}\beta_i = -\frac{2\sigma_T \times \Delta x_i'}{Eh} \times \frac{1}{(m_i + m_{i+1})^2} \int_{-m_i}^{m_{i+1}} dm \int_{-m_i}^m k \times dm - \frac{c_i'}{\Delta x_i'} ;$$

$$\operatorname{tg}\alpha_{i+1} = \frac{2\sigma_T \times \Delta x_i'}{Eh} \times \left[\frac{1}{(m_i + m_{i+1})^2} \int_{-m_i}^{m_{i+1}} dm \int_{-m_i}^m k \times dm - \frac{1}{m_i + m_{i+1}} \int_{-m_i}^{m_{i+1}} k dm \right] + \frac{c_i'}{\Delta x_i'}$$

при $i=1 \dots n-1$. (2.15)

Розглядаючи послідовно ділянки з умовами зв'язку $\alpha_i = \beta_i$, одержимо систему із $4n-6$ рівнянь (2.15) при $i=1 \dots n-1$, що становить основну частину математичної моделі.

Методика розрахунків була розроблена для прямої постановки задачі, метою якої є рішення системи рівнянь моделі відносно невідомих $\alpha_2 \dots \alpha_n$, $\beta_1 \dots \beta_{n-1}$, $m_2 \dots m_{n-1}$ (на крайніх роликах моменти дорівнюють нулю – $m_1 = m_n = 0$) при заданих перекриттях роликів $w_1 \dots w_n$ і визначення геометричних характеристик нейтральної лінії листа при правці. Під час рішення, крім моментів на роликах, обчислюються також невідомі значення кривизни $k_2 \dots k_n = k_{\text{ост}}$ на основі залежності (2.8), яка стає рекурентною формулою для кривизни, якщо приймати $m = m_{i+1}$.

У викладеній вище методиці розрахунків використовується ітераційна схема рішення. Для зручності розрахунків у методиці використовується ряд допоміжних функцій $f(k)$, $\varphi_1(m)$, $\varphi_2(m)$, $m_{\max}(i)$, $F_1(i)$ і $F_2(i)$:

$$f(k) = \begin{cases} k, & k \leq 1; \\ (3-1/k^2)/2, & k \triangleright 1; \end{cases} \quad (2.16)$$

$$\varphi_1(m) = \begin{cases} m^2/2, & m \leq 1; \\ 1,5 - \sqrt{3 - 2m}, & m > 1; \end{cases} \quad (2.17)$$

$$\varphi_2(m) = \begin{cases} m^3/6, & m \leq 1; \\ 1,5m + [(3-2m)^{1,5} - 5]/3, & m > 1; \end{cases} \quad (2.18)$$

$$m_{\max}(i) = \max(m_1, \dots, m_i). \quad (2.19)$$

$$F_1(i) = \frac{8\varphi_1[(m_i + m_{i+1})/2]}{m_i + m_{i+1}}; \quad F_2(i) = \frac{16\varphi_2[(m_i + m_{i+1})/2]}{(m_i + m_{i+1})^2} \quad (2.20)$$

при $m_{i+1} \leq m_{\max}(i)$;

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

$$F_2(i) = \frac{16\varphi_2(c_1) + 2\varphi_2(m_{i+1}) - 2\varphi_2(m_{\max})}{(m_i + m_{i+1})^2} + \frac{2c_2 \times [4\varphi_1(c_1) - \varphi_1(m_{\max})] + c_2^2 \times [k_i + (-1)^i k_0]}{(m_i + m_{i+1})^2} \quad (2.21)$$

при $m_{i+1} > m_{\max}(i)$.

На початку розрахунків перевіряється геометрична умова допустимості заданих перекриттів.

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

Зважаючи на те, що при пружному деформуванні є така ж залежність між поздовжніми компонентами напружень та деформації, як у випадку лінійного напруженого стану матеріалу з модулем пружності [153]:

$$E' = E / (1 - \nu^2), \quad (2.22)$$

де ν – коефіцієнт Пуассона оброблюваного матеріалу,

а при деформуванні за межами пружності поздовжнє напруження зі зростанням деформації прагне до значення опору деформації [153]:

$$\sigma_T' = 2\sigma_T / \sqrt{3} \quad (2.23)$$

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

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

Відносну деформацію, що входить у формулу (1.12), згідно з даними роботи [151] можна прийняти як:

$$\varepsilon = h / 2r, \quad (2.24)$$

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

З урахуванням вихідної кривизни листа χ_0 вираз (2.24) перетвориться в наступний [151]:

$$\varepsilon = \frac{(\chi_i - \chi_0)h / 2}{1 + \chi_0 h / 2}. \quad (2.25)$$

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

h, b – товщина та ширина листа;

σ_{T0} – напруження плинності даного металу або сплаву у вихідному, тобто, у відпаленому стані;

a_1, a_2, a_3 – коефіцієнти регресії, що описують залежність напружень плинності від деформації;

E, ν – модуль пружності та коефіцієнт Пуассона оброблюваного матеріалу;

χ_0 – вихідна кривизна листа;

n, d – кількість і діаметр робочих роликів;

t – горизонтальна відстань між роликами (крок роликів);

w_i – перегин листа на кожному з роликів.

Для коректного задавання вихідних даних треба врахувати таке:

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

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

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

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

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

$$\Delta x_i < (d_i + d_{i+1}) / 2 + h, \quad (2.26)$$

перевіряється умова:

$$f_i + f_{i+1} \leq (d_i + d_{i+1}) / 2 - \sqrt{[(d_i + d_{i+1}) / 2 + h]^2 - (\Delta x_i)^2}, \quad (2.27)$$

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

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

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

- якщо напружений стан вважається лінійним, то

$$\sigma_T' = \sigma_T; \quad E' = E, \quad (2.28)$$

- якщо напружений стан вважається плоским, то

$$\sigma_0' = 2\sigma_T / \sqrt{3}; \quad E' = E / (1 - \nu^2). \quad (2.29)$$

Відносна вихідна кривизна:

$$k_0 = E'h\chi_0 / (2\sigma_T'). \quad (2.30)$$

Граничні значення відносної кривизни вигину на роликах:

$$k_{i, \text{lim}} = E'h / [\sigma_T' \times (d_i + h)] \quad \text{при } i=2 \dots n-1. \quad (2.31)$$

Прогин листа для кожної пари роликів:

$$c_i = f_i + f_{i+1} + h \quad \text{при } i=1 \dots n-1. \quad (2.32)$$

Відносна кривизна вигину листа на першому ролику:

$$k_1 = k_0. \quad (2.33)$$

Відносні згинальні моменти на крайніх роликах:

$$m_1 = m_n = 0. \quad (2.34)$$

Початкові відносні значення кривизни та згинального моменту на інших роликах:

$$k_i = m_i = \min \left[\frac{3E'hc_{i-1}}{\sigma_T' \times (\Delta x_{i-1})^2}; 1,5 \right] \quad \text{при } i=2 \dots n-1. \quad (2.35)$$

Початкові значення кутів підходу листа до i -го ролику та сходу з попереднього $(i-1)$ -го ролика:

$$\alpha_i = 2\text{arctg} \frac{c_{i-1}}{2\Delta x_{i-1}}, \beta_{i-1} = -\alpha_i \quad \text{при } i=2 \dots n. \quad (2.36)$$

Початкове значення лічильника числа ітерацій:

$$j=0. \quad (2.37)$$

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

$$j=j+1. \quad (2.38)$$

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

$$\alpha = \alpha_2, \beta = \beta_1. \quad (2.39)$$

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

$$\begin{aligned} c_1' &= c_1 - (d_1 + h) \sin^2 0,5\beta - (d_2 + h) \sin^2 0,5\alpha. \\ c_1' &= c_1 - (d_1 + h) \sin^2 0,5\beta - (d_2 + h) \sin^2 0,5\alpha. \end{aligned} \quad (2.40)$$

Обчислюються нові значення кутів підходу та сходу:

$$a = \frac{\sigma_T' \times \Delta x_1'}{E'h} \times \left[k_0 - \frac{2\varphi_1(m_2)}{m_2} + \frac{2\varphi_2(m_2)}{m_2^2} \right] + \frac{c_1'}{\Delta x_1'}; \quad (2.41)$$

$$\alpha_2 = \alpha - \frac{\alpha - \text{arctg} a}{1 + 0,5(d_2 + h) a / \Delta x_1'}; \quad (2.42)$$

$$\beta_1 = \text{arctg} \left\{ \frac{2\sigma_T' \times \Delta x_1'}{E'h} \times \left[k_0 - \frac{\varphi_1(m_2)}{m_2} \right] - \text{tg}\alpha_2 \right\}. \quad (2.43)$$

Підраховується різниця між двома послідовними наближеннями:

$$s = |\alpha_2 - \alpha| + |\beta_2 - \beta|. \quad (2.44)$$

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

$$\alpha = \alpha_{i+1}, \beta = \beta_i. \quad (2.45)$$

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

$$\begin{aligned} \Delta x_i' &= \Delta x_i + 0,5(d_i + h) \sin \alpha_i - 0,5(d_{i+1} + h) \sin \alpha; \\ c_i' &= c_i - (d_i + h) \sin^2 0,5\alpha_i - (d_{i+1} + h) \sin^2 0,5\alpha. \end{aligned} \quad (2.46)$$

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

$$k_i = \frac{E'h}{\sigma_T \times \Delta x_i'} \times \left(\frac{c_i'}{\Delta x_i'} + \operatorname{tg} \alpha_i \right) + F_2(i). \quad (2.47)$$

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

$$\begin{aligned} \Delta x_i' &= \Delta x_i + 0,5(d_i + h) \sin \beta - 0,5(d_{i+1} + h) \sin \alpha; \\ c_i' &= c_i - (d_i + h) \sin^2 0,5\beta - (d_{i+1} + h) \sin^2 0,5\alpha. \end{aligned} \quad (2.48)$$

Обчислюється відносний згинальний момент на i -му ролику:

$$m_i = 2f \left[(k_{i-1} + k_i) / 2 \right] - m_{i-1}. \quad (2.49)$$

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

$$m_i = f \left[k_i + (-1)^i k_0 \right]. \quad (2.50)$$

Обчислюються нові значення кутів підходу та сходу:

$$F_1 = F_1(i); \quad (2.51)$$

$$a = \frac{\sigma_T' \times \Delta x_i'}{E'h} \times \left[k_i - F_1 + F_2(i) \right] + \frac{c_i'}{\Delta x_i'}; \quad (2.52)$$

$$\alpha_{i+1} = \alpha - \frac{\alpha - \operatorname{arctg} a}{1 + 0,5(d_{i+1} + h) a / \Delta x_i'}; \quad (2.53)$$

$$\beta_i = \operatorname{arctg} \left[\frac{\sigma_T' \times \Delta x_i'}{E'h} \times (2k_i - F_1) - \operatorname{tg} \alpha_{i+1} \right]. \quad (2.54)$$

Підраховується сумарна похибка між двома послідовними наближеннями:

$$s = s + |\alpha_{i+1} - \alpha| + |\beta_i - \beta|. \quad (2.55)$$

Розрахунки за формулами (2.46)–(2.55) повторюють доти, поки похибка виявиться строго рівною нулю або похибка через обмежену машинну точність обчислень перестане зменшуватися, причому число ітерацій у цей момент буде більше гранично припустимого значення (з досвіду розрахунків подібних завдань можна прийняти гранично припустимим $j=12$) [149].

Відносна залишкова кривизна:

$$k_{\text{ост}} = k_n = m_{n-1} - k_{n-1}. \quad (2.56)$$

Абсолютна залишкова кривизна:

$$\chi_{\text{ост}} = 2\sigma_m k_{\text{ост}} / (E'h). \quad (2.57)$$

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

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

$$P_i = (M_{i-1} + M_i) / \Delta x_{i-1} + (M_i + M_{i+1}) / \Delta x_i, \quad (2.58)$$

де Δx_i обчислюються згідно з формулою (2.1). Без урахування зсувів при $\Delta x_i \equiv t/2$ ця формула збігається з відомою [153]:

$$P_i \approx 2(M_{i-1} + 2M_i + M_{i+1}) / t. \quad (2.59)$$

Переходячи з відносних величин до абсолютних, одержимо:

$$P_i = p_i \times \sigma_T \times B \times h,$$

де

$$p_1 = m_2 h / 6\Delta x_1;$$

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

$$p_n = m_{n-1} h / 6\Delta x_{n-1}. \quad (2.60)$$

Горизонтальна сила, необхідна для протягування листа через i -ту мікроликову ділянку машини [153]:

$$\Delta T_i = - \int_{-M_i}^{M_{i+1}} \chi dM = \frac{\sigma_T B h^2}{6 \Delta x_i} \times (m_i + m_{i+1}) (\operatorname{tg} \beta_i + \operatorname{tg} \alpha_{i+1}). \quad (2.61)$$

Звідси для відносної сумарної сили протягування:

$$T_{\text{пр}} = \sum_{i=1}^{n-1} \Delta T_i / (\sigma_T B h), \quad (2.62)$$

впливає формула:

$$T_{\text{пр}} = 1/6 \sum_{i=1}^{n-1} (m_i + m_{i+1}) \times (\operatorname{tg} \beta_i + \operatorname{tg} \alpha_{i+1}) h / \Delta x_i. \quad (2.63)$$

Останню формулу можна використовувати в наближеному вигляді:

$$T_{\text{пр}} \approx \frac{\sigma_T}{E} \sum_{m_i > 1} \frac{(k_i - 1)^2}{k_i}, \quad (2.64)$$

яка отримана в припущенні, що петля гістерезисної залежності між кривизною та моментом для двох сусідніх мікроликових ділянок є приблизно замкненою та зміцнення матеріалу відсутнє. Похибка формули (2.64) у порівнянні з попередньою (2.63) у більшості випадків не перевершує декількох відсотків.

Сумарний крутний момент, що витрачається на здійснення роботи пластичного деформування, при однаковому діаметрі приводних роликів d виражається через параметр $T_{\text{пр}}$ формулою [153]:

$$M_{\text{кр.}\Sigma} = 0,5 (d + h) \sum_{i=1}^{n-1} \Delta T_i = T_{\text{пр}} \sigma_T B h \times (d + h) / 2. \quad (2.65)$$

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

Як приклад результатів реалізації розробленої моделі на рисунках 2.2 і 2.3 (див. с. 59) представлені розрахункові розподіли різниці у витяжках по середині листа та по його хвилястих крайках, а також відносної кривизни залежно від довжини та амплітуди хвилі.

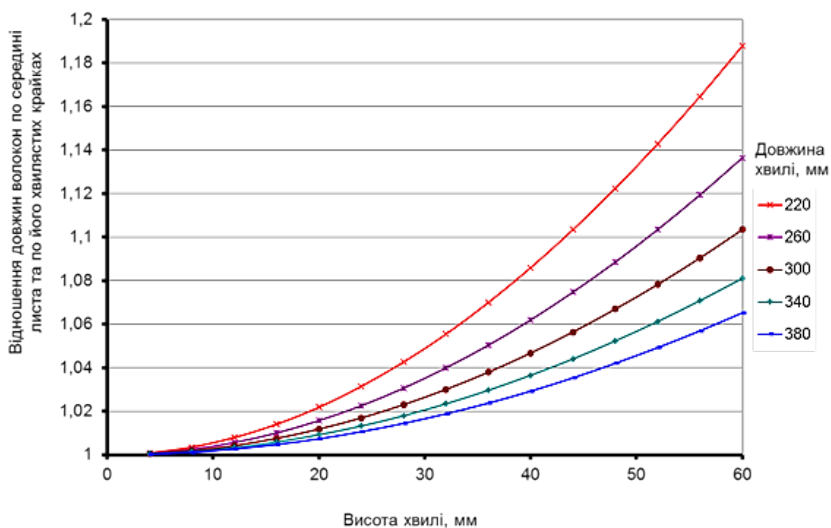


Рисунок 2.2 – Залежність різниці у витяжках по середині листа та по його хвилястих крайках від висоти та довжини хвилі ($n=13$; $h=4$ мм; $d=210$ мм; $t=230$ мм; $b=2000$ мм; сталь 08кп)

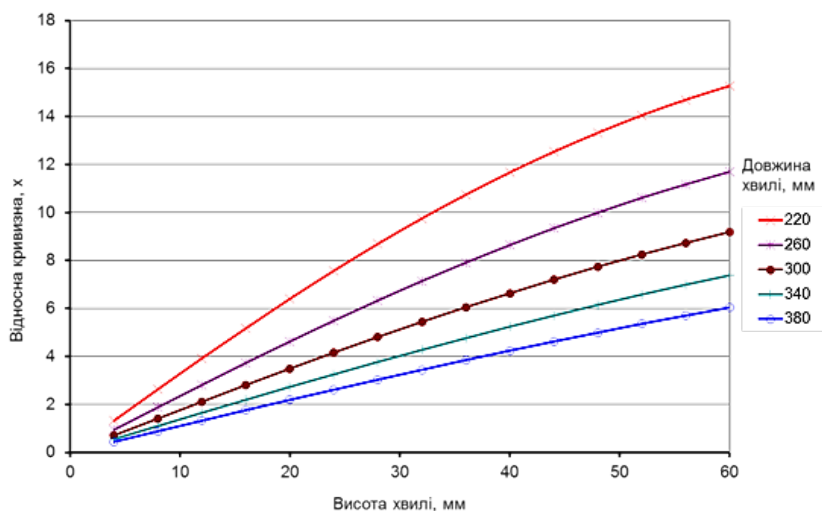


Рисунок 2.3 – Залежність відносної кривизни від висоти та довжини хвилі ($n=13$; $h=4$ мм; $d=210$ мм; $t=230$ мм; $b=2000$ мм; сталь 08кп)

Аналізуючи результати, треба враховувати, що за В. К. Пірсоном показник форми, який відповідає поперечній кривизні радіусом 10^4 см елементу завширшки 1 см, коли він вилучений із листа та розташований на площині, вимірюється в мон [3]. Згідно з дослідженнями В. К. Пірсона, критичне з погляду втрати площинності значення відносної різниці витяжок на одиницю ширини при створенні хвилі по краях становить 0,02 мон. При величині характеристики форми $\Phi=0,02-0,1$ мон спостерігається дуже добрий стан площинності листів із хвилею по краях без перевищення амплітуди в 4 мм/м.

При характеристиці форми $\Phi=0,1-1$ мон спостерігається гарний стан поверхні з амплітудою хвилі 4–8 мм/м. При характеристиці форми $\Phi=1-2$ мон – задовільний стан поверхні з амплітудою хвилі 8–12 мм/м [3].

Розглянуті в рамках цього розділу теоретичні рішення склали повний алгоритм з автоматизованого розрахунку локальних та інтегральних показників напружено-деформованого стану металу при холодній правці.

На основі викладеного алгоритму розроблені програмні засоби в лінгвістичному середовищі MS VB6.1. Як приклад чисельної реалізації розроблених програмних засобів на рисунках 2.4–2.8 (див. с. 61–63) представлені розподіли сил правки та відносної кривизни листа по роликах правильної машини при правці листів різної товщини від 4 до 14 мм стосовно до умов реалізації процесу на листоправильній машині $13 \times 210 \times 2800$ лінії обробки листів.

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

– зі збільшенням крайової хвилястості листів при одних і тих же налаштуваннях ЛПМ різниця в подовженні волокон по середині листа і його крайках збільшується, що підвищує ефективність процесу, проте кінцева кривизна листів також зростає, але з меншою інтенсивністю (рис. 2.6);

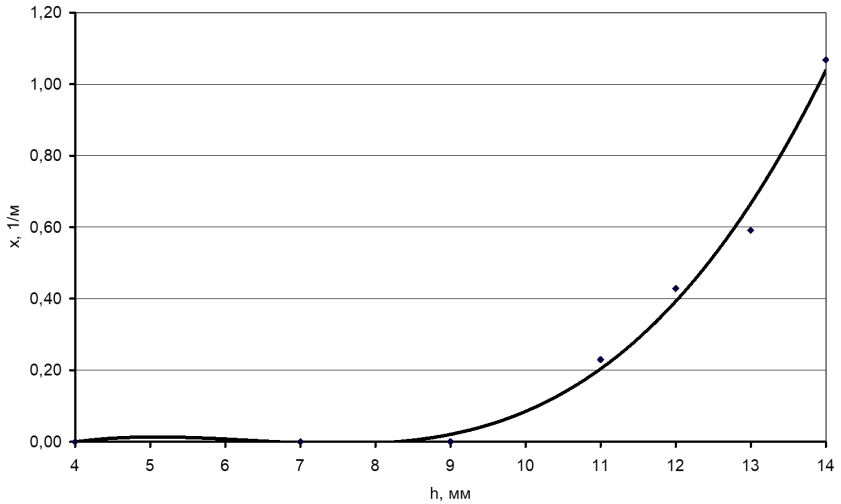


Рисунок 2.4 – Розрахункові розподіли кінцевої відносної кривизни від товщини прокату ($n=13$; $d=210$ мм; $t=230$ мм; $b=2000$ мм; сталь 08кп)

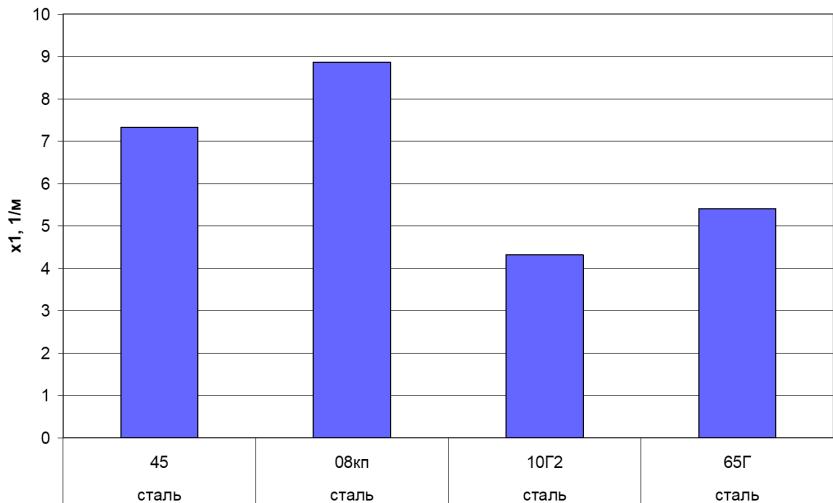


Рисунок 2.5 – Розрахункові розподіли кінцевої відносної кривизни від матеріалу прокату ($n=13$; $h=4$ мм; $d=210$ мм; $t=230$ мм; $b=2000$ мм)

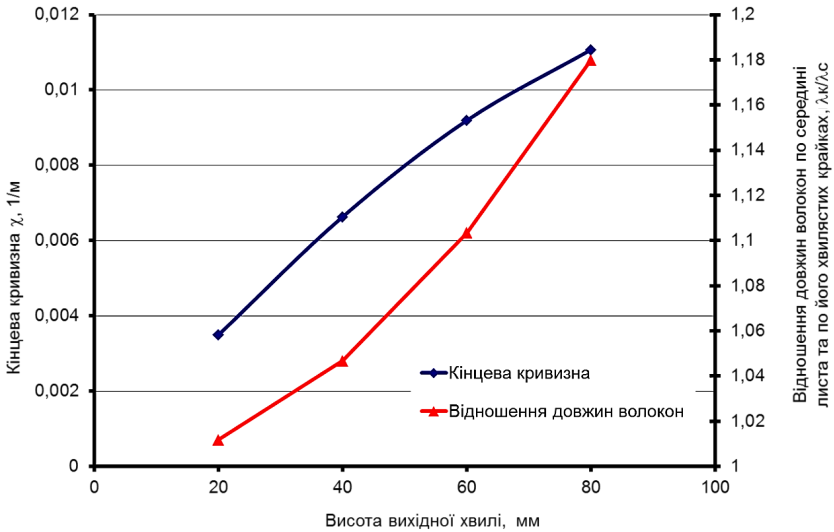


Рисунок 2.6 – Залежність відносної кривизни та різниці у витяжках по середині листа і його хвилястих краяхках від висоти хвилі ($n=13$; $h=4$ мм; $d=210$ мм; $t=230$ мм; $b=2000$ мм; сталь 08кп)

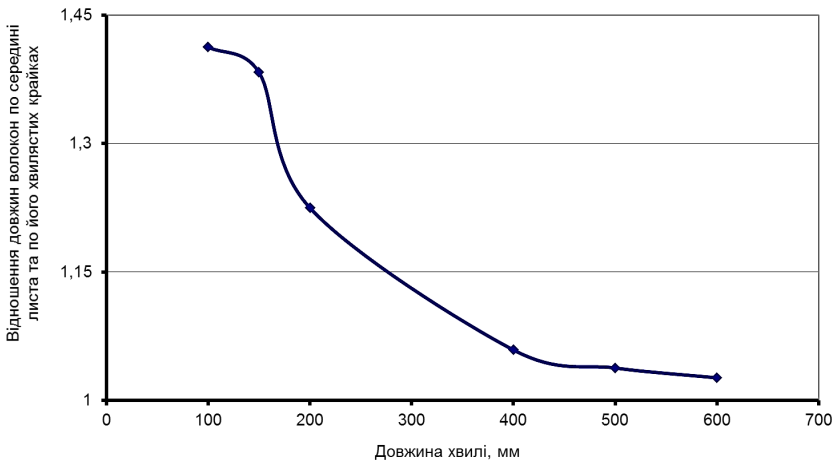


Рисунок 2.7 – Залежність відношення довжин волокон по середині листа та по його хвилястих краяхках від висоти хвилі ($n=13$; $h=4$ мм; $d=210$ мм; $t=230$ мм; $b=2000$ мм; сталь 08кп)

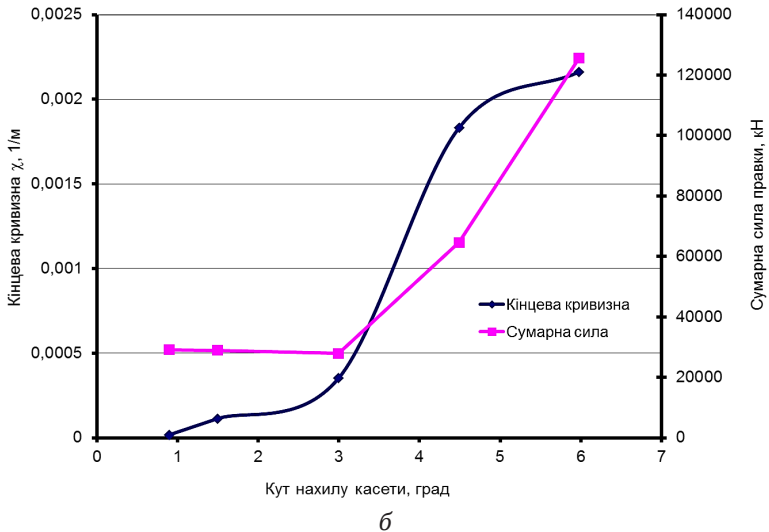
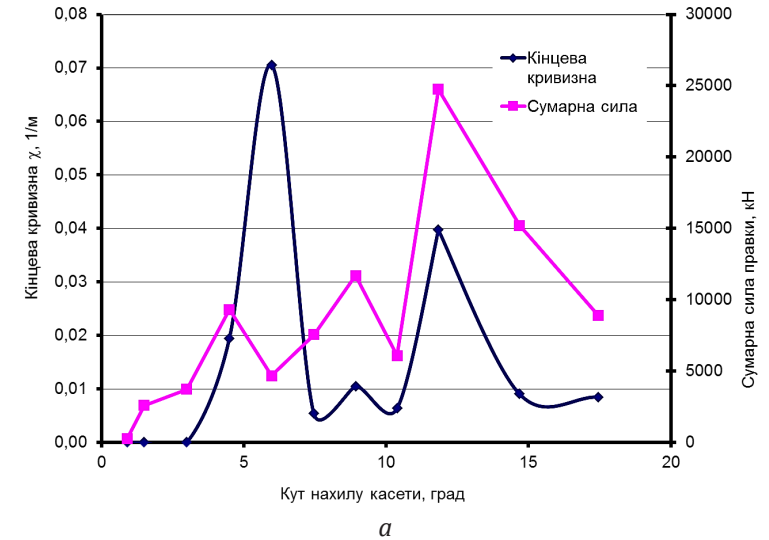


Рисунок 2.8 – Розрахункові розподіли кінцевої відносної кривизни та сумарної сили правки залежно від кута нахилу касети ($n=13$; $h=4$ мм (а); $h=14$ мм (б); $d=210$ мм; $t=230$ мм; $b=2000$ мм; сталь 08кп)

– зі збільшенням довжини хвилі крайової хвилястості листів різниця в подовженні волокон по середині і крайках листа зменшується, що свідчить про необхідність урахування крім амплітуди хвилі й цього параметра з визначення налаштувань роликів (рис. 2.7);

– зі збільшенням перекриття роликів (умовно кута нахилу касети, оскільки використовувалася індивідуальне налаштування роликів) кінцева кривизна листів змінюється нерівномірно з яскраво вираженими мінімумами функцій, що засвідчує про необхідність вирішення задач оптимізаційного плану з визначення перекриття роликів залежно від параметрів вихідного листа (рис. 2.8).

2.3 Скінченно-елементне моделювання процесу правки хвилястості на листопробірних машинах

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

Для визначення впливу згину роликів на виправлення нерівномірно розподілених за шириною листів дефектів площинності теоретичне дослідження процесів правки здійснювалося МСЕ, як одним із достовірних методів, що дають повну інформацію про

процес деформування в порівнянні з іншими теоретичними методами дослідження (див. підрозд. 1.3) [118–120; 132–136; 140; 144].

У якості програми використовувався ліцензійний продукт Deform 3D та Abaqus CAE. Математичний апарат цих CAE-систем докладно розкритий у літературі [123; 124].

Чисельна модель процесу деформування ґрунтується на теорії плину. Матеріал заготовки розглядається як нестиснене пружно-пластичне тіло.

Тривимірне моделювання процесу правки методом скінчених елементів полягало у визначенні напружено-деформованого стану листа в момент правки [156; 157].

Важливим критерієм при правці листа є нерівномірність розподілу деформацій у тілі заготовки, яка оцінювалася, як $\Delta e = e_{\max} - e_{\min}$.

Виходячи із цього для аналізу напружено-деформованого стану металу при виправленні поздовжньої та поперечної кризисності листів були виконані розрахунки з використанням методу скінчених елементів у системі Abaqus CAE [109; 120; 158].

Розглянута стосовно до аналізу процесу правки листів на привильних машинах розрахункова схема, яка являла собою лист 4, три робочих 1–3 і два 5, 6 напрямних ролика, представлена на рисунку 2.9, а (див. с. 66).

При дослідженні використовувалася площина симетрії, що дало можливість скоротити час розрахунків. Дослідженню підлягала правка ефекту крайової хвилястості з використанням диференційованого прикладення сили за шириною листа шляхом примусового контрольованого вигину робочих роликів.

З урахуванням викладеного вище було виконано дискретизацію об'єму (побудова скінчено-елементної сітки), котрий займає модель, на елементарні області (скінчені елементи) (рис. 2.9, б (див. с. 66)). Для моделювання роликів були використані тривимірні жорсткі елементи. Для моделювання листа були використані елементи типу C3D8R – восьмивузлові лінійні, твердотільні скорочені елементи з контролем руйнування [120].

Вихідна скінчено-елементна модель має наступні граничні умови: нижні ролики машини 1 і 2, а також напрямні ролики 5 і 6 (рис. 2.9, а) мають один обертальний ступінь свободи, ролик 3

має два ступені свободи: можливість обертання навколо своєї осі, а також переміщення по осі «2» глобальної системи координат. У розрахунках використовувалася модель класичної пластичності металу, у якості матеріалу листа була прийнята сталь 08кп (криву зміцнення показано на рисунку 2.10) [73].

Відповідно до розрахункової схеми (рис. 2.9, а) крок машини було прийнято 250 мм, діаметр усіх робочих роликів $D=220$ мм.

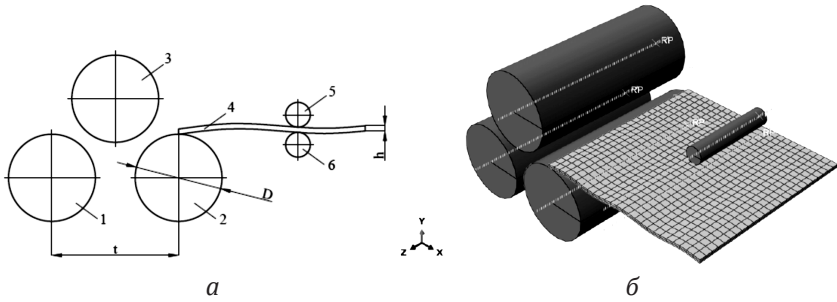


Рисунок 2.9 – Розрахункова (а) і скінчено-елементна в глобальній системі координат (б) модель процесу правки листів на листопрямильних машинах:

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

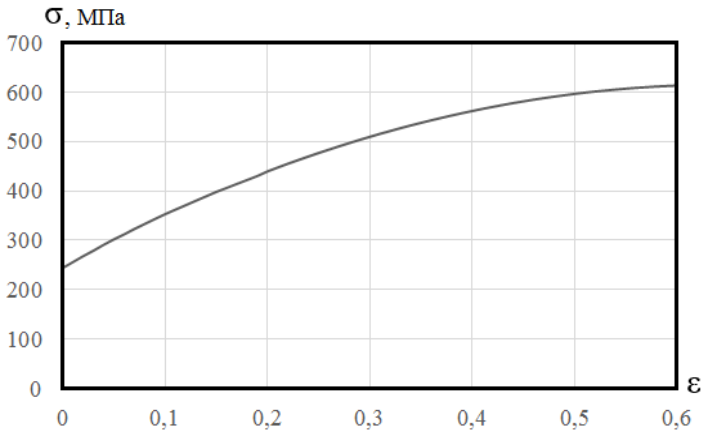


Рисунок 2.10 – Крива зміцнення матеріалу листа (сталь 08кп, використувувана при розрахунках процесу правки) [73]

Безпосереднє моделювання процесу правки було виконано для листа товщиною 10 мм. Моделювання вигину осі робочих роликів виконували приданням бочці роликів опуклості, що дорівнювала величині їх прогину.

Для дослідження процесу правки крайової хвилястості використовували імпортовану модель листа, отриману в пакеті SolidWorks (рис. 2.11). Сам же лист розбивали на різну кількість елементів, а саме: 300; 1224; 4545; 7191; 15 014 (рис. 2.12) [158].

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

Після цього усі 3 робочих ролика, а також 2 напрямних приводилися в обертання з кутовою швидкістю 0,95 і 4 рад/с відповідно, що, з урахуванням їх діаметра, відповідає лінійній швидкості руху листа вздовж осі «1» глобальної системи координат 0,1 м/с. Час кроку був прийнятий 6 с.

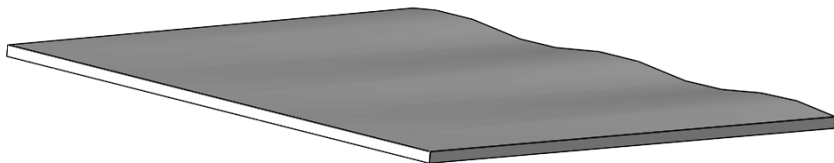


Рисунок 2.11 – Модель листа з крайовою хвилястістю (половина листа щодо осі симетрії)

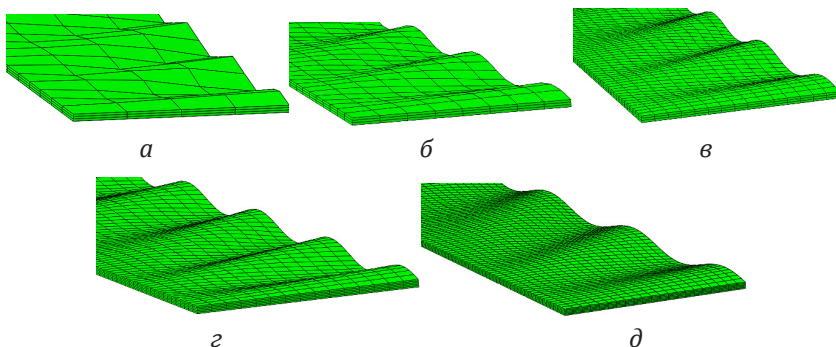


Рисунок 2.12 – Моделі листів із різною дискретизацією об'єму:
а – 300; б – 1 224; в – 4545; г – 7191; д – 15 014

Для оцінювання отриманих результатів вихідними в цьому випадку параметрами були обрані проєкції реакцій у контрольних точках роликів у глобальній системі координат, що збігалися з їх центрами обертання, а також переміщення, деформації та напруження у вузлах скінченних елементів листа.

При скінченно-елементному моделюванні важливим чинником є дискретність розбиття об'єму деформованого матеріалу, яка впливає на точність і час розрахунку. Зі збільшенням дискретності точність розрахунку збільшується, але при цьому різко зростає час на його виконання. Для визначення мінімально достатньої кількості скінченних елементів при збереженні точності за аналогією з роботою [159] були виконані дослідження процесу правки листів на багатороликовій правильній машині з вигином робочого ролика.

Реалізація моделі була виконана на ЕОМ із процесором Intel Core i3-4005U і об'ємом оперативної пам'яті 4 ГБ. У процесі розрахунку фіксувались час розрахунку (рис. 2.13) і сила правки на третьому ролику (рис. 2.14, див. с. 69).

Використовуючи отриманий під час розрахунку ряд значень сил правки було визначено коефіцієнт варіації їх розкиду для кожного випадку дискретизації об'єму.

Він склав більше 65 % у разі використання сітки з 300 елементів і приблизно 20–25 % при збільшенні дискретизації більше

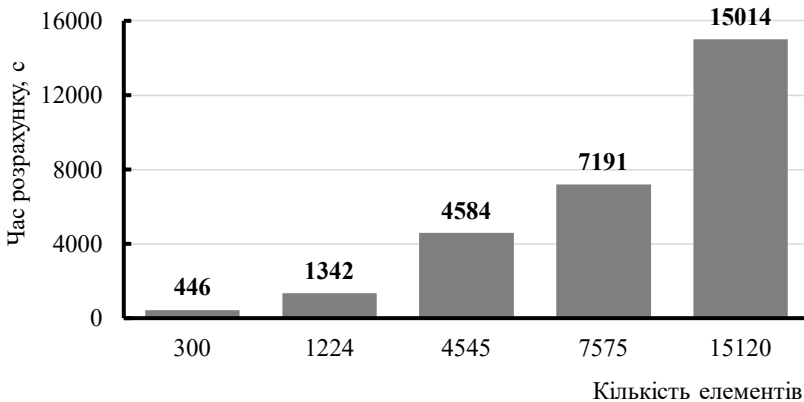


Рисунок 2.13 – Залежність часу розрахунку від кількості елементів

4000 елементів (рис. 2.15, див. с. 70). Це дає змогу зробити висновок про достатність розбиття об'єму металу на рівні 4500 скінченних елементів при відношенні діаметра робочих роликів до товщини листа $D/h=40$ або 15 елементів на 1 мм погонної довжини листа, при цьому час реалізації моделі складає приблизно 1,3 год при варіації сил правки на 3 % вище щодо більш точного рішення.

Для аналізу впливу технологічних параметрів на геометричні параметри листів, що виправляються, була виконана низка розрахунків. Зокрема, розрахунки були зроблені для різних перекриттів і різної величини прогину (опуклості) бочки роликів [160]. На рисунку 2.16 (див. с. 71) представлені поля розподілу еквівалентних деформацій по поверхні листа при різних перекриттях ($a-e$) і прогинів робочих роликів ($e-z$).

З аналізу представлених розподілів видно, що зі збільшенням величини перекриття роликів (рис. 2.16, $a-e$) еквівалентна

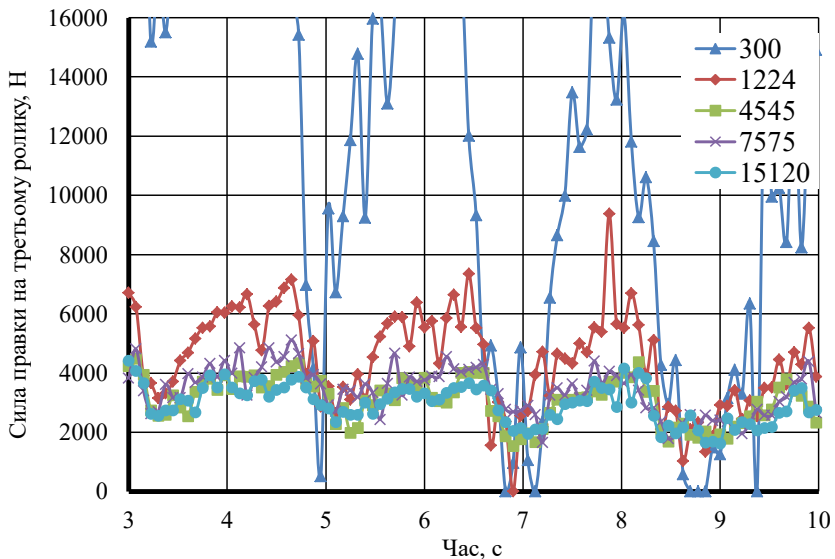


Рисунок 2.14 – Значення сил правки під час протікання процесу деформації залежно від кількості елементів

деформація в середній частині листа (плоска ділянка) зростає, а характер розподілу визначається хвилястістю бічних крайок.

Зокрема, при збільшенні перекриття з 3 до 10 мм максимальне значення еквівалентної деформації зросло у 2 рази – з 3 до 6 %. При зростанні величини прогину робочого ролика також спостерігається збільшення еквівалентної деформації в середній частині листа (плоска ділянка). За відсутності прогину ролика (рис. 2.16, ж) спостерігається відносно рівномірний розподіл деформації по поверхні листа на рівні 3,5 %.

При зростанні прогину ролика деформація середніх ділянок листа збільшується (рис. 2.16, е, з) і при величині прогину 2 мм перебуває на рівні 6,0 %, а при величині прогину 5 мм – на рівні 6,5 %, причому зона деформації зростає.

На рисунку 2.17 (див. с. 72) представлені розрахункові розподіли поздовжньої деформації по нижній поверхні листів при різних прогинах робочих роликів. З аналізу даних розподілів можна зробити висновок, що при правці листів із крайовою хвилястістю спостерігаються чергування деформації стиску та розтягання за довжиною листа, при цьому зі збільшенням прогину

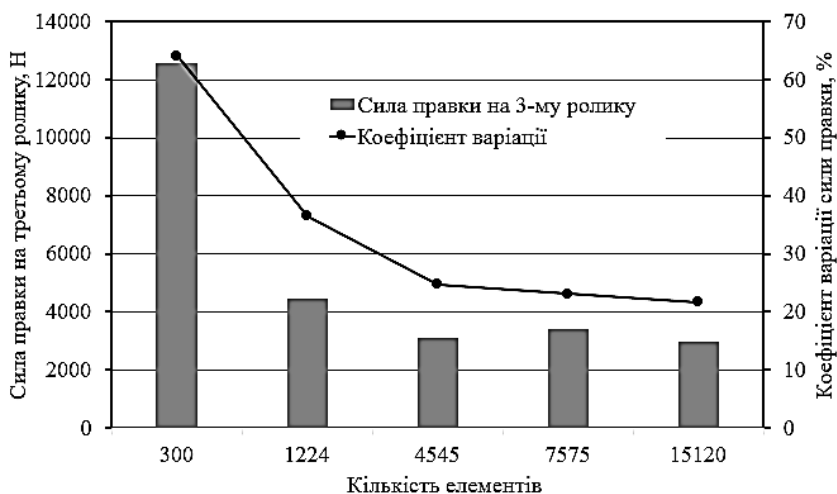


Рисунок 2.15 – Значення сили правки на третьому ролику і його коефіцієнта варіації залежно від кількості елементів

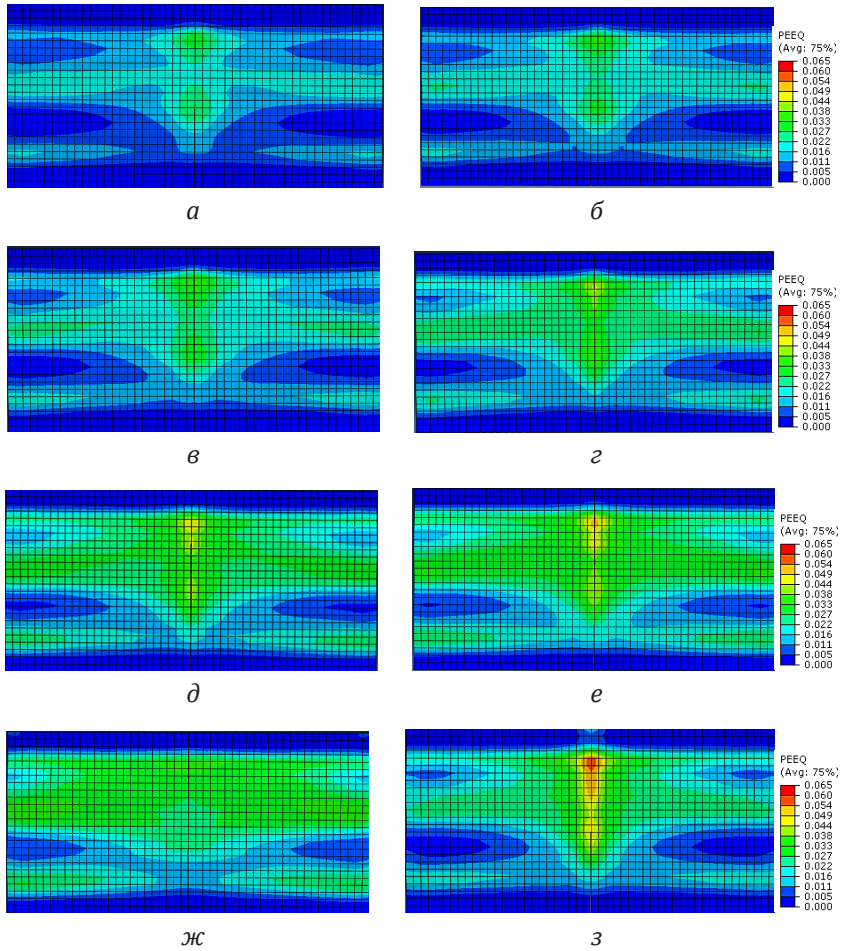


Рисунок 2.16 – Поля розподілу еквівалентних деформацій (PEEQ) по поверхні листів при різних перекриттях (а-е) і прогинах (ж, з) робочих роликів:

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

роликів dW . У зв'язку з більшими витратами машинного часу на розрахунки був розглянутий лист довжиною, рівною подвійному кроку правильної машини, що призвело до деякого викривлення цього результату по першій і третій хвилі через неповну обробку переднього та заднього кінця листа.

З аналізу представленого на рисунку 2.18 розподілу видно, що зі збільшенням прогину ролика крайова хвилястість зменшується. Зокрема, за відсутності прогину висота хвилі зменшувалась із 4,0 до 3,65 мм, при прогині 1 мм – до 2,8 мм, при прогині 2 мм – до 1,04 мм, при прогині 5 мм – до 0,52 мм.

Цей факт підтверджує дієвий вплив величини вигину роликів на правку хвилястості листів і можливість використання цього підходу для підвищення якості правки, а також використовувати отримані залежності для визначення раціональної величини прогину робочих роликів для виправлення хвилястості. Ця модель була взята за основу при побудові регресійної моделі для визначення кінцевої кривизни листів із дефектами хвилястості.

3 | ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСІВ ПРАВКИ ГАРЯЧЕКАТАНИХ ЛИСТІВ НА ЛИСТОПРАВИЛЬНИХ МАШИНАХ ІЗ ДИФЕРЕНЦІЙОВАНИМ ДОДАТКОМ СИЛИ ПРАВКИ ПО ШИРИНІ ПРОКАТУ

3.1 Обладнання та методи експериментальних досліджень процесів правки гарячекатаних листів

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

Треба зазначити, що зростаючі вимоги щодо обсягів наданої інформації, а також необхідність оцінки ступеню вірогідності чисельних математичних моделей роблять актуальним проведення експериментальних досліджень не тільки енергосилових, а й результуючих геометричних характеристик прокату після правки.

Відповідно до викладеного вище, лабораторні експериментальні дослідження інтегральних характеристик енергосилових параметрів і показників результуючої кривизни, одержуваної при виправленні знакозмінним вигином заготовок зі свинцю та сталі різних марок, були проведені на спеціально створеній за участю авторів для цих цілей лабораторній листоправильній машині 9×100×250 конструкції Новокраматорського машинобудівного заводу (НКМЗ), загальний вигляд, конструктивні особливості та склад устаткування якої ілюстровані рисунками 3.1–3.5 (див. с. 75–78).



Рисунок 3.1 – Загальний вигляд лабораторної листопробірної машини $9 \times 100 \times 250$, призначеної для експериментального дослідження процесу правки відносно товстих листів

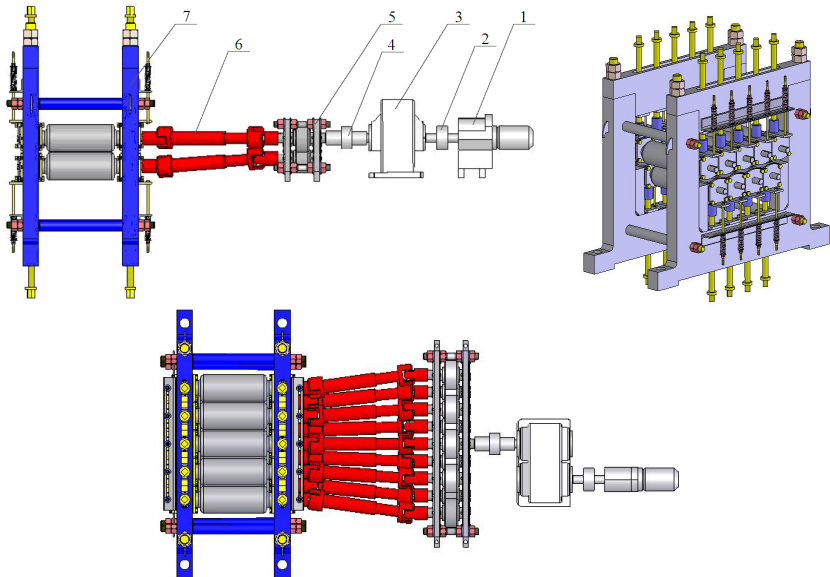


Рисунок 3.2 – Принципова схема лабораторної листопробірної машини $9 \times 100 \times 250$, призначеної для експериментального дослідження процесу правки відносно товстих листів:

1 – двигун; 2 – муфта; 3 – редуктор; 4 – муфта; 5 – шестеренна кліть; 6 – шпинделі; 7 – робоча кліть

Ця конструкція має дев'ять робочих роликів, вісім із яких приводні, що дає змогу більш повно моделювати процес правки в умовах промислового виробництва.

Листопривильна машина (рис. 3.1, 3.2 (див. с. 75)) приводиться від мотор-редуктора 1 через моторну муфту 2, одноступінчастий циліндричний редуктор 3, проміжну муфту 4, шестеренну кліть 5 і шпинделі 6 на ролики робочої кліті 7.

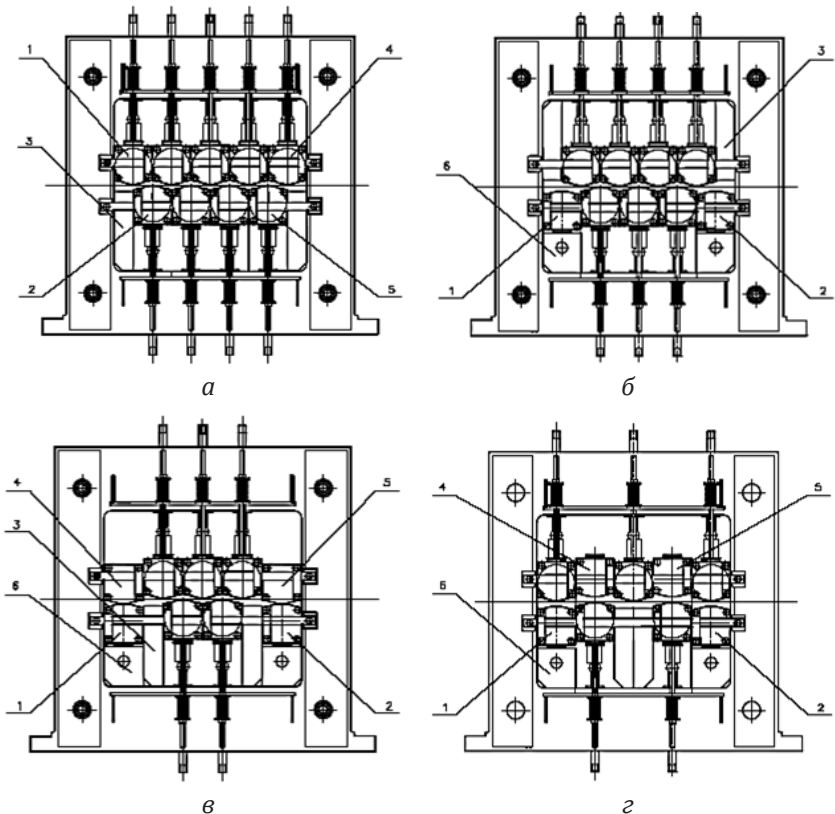


Рисунок 3.4 – Перетворення 9-роlikової листопривильної машини (а) у 7-роlikову (б) і 5-роlikову (в)

зі зміною кроку роликів (г):

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

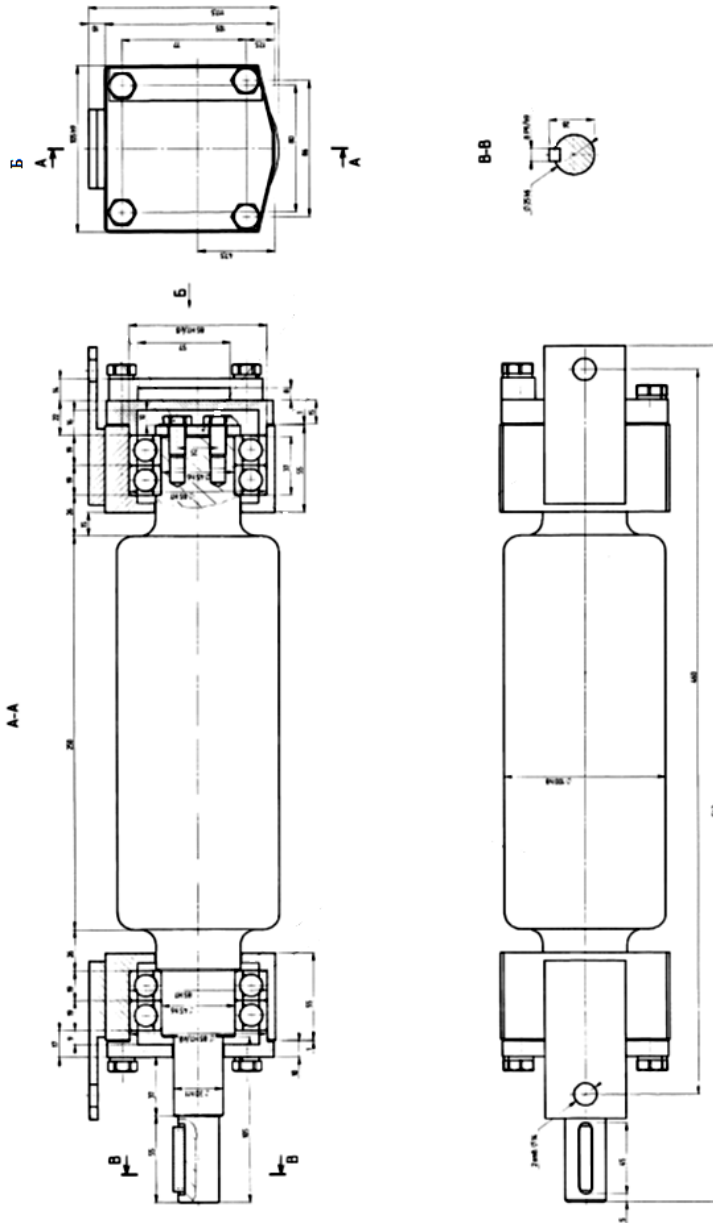


Рисунок 3.5 – Конструкція вузла ролика робочої кліті листоправильної машини 9 × 100 × 250

що з урахуванням передатного відношення одноступінчастого циліндричного редуктора 4 забезпечило частоту обертання робочих роликів правильної машини 10 об/хв, яка також відповідала швидкості правки порядку 50 мм/с.

Кліть робоча, конструкція якої ілюстрована рисунками 3.3 (див. с. 76) і 3.4 (див. с. 77), містить у собі вузол станин 1, дев'ять блоків робочих правильних роликів 2 з подушками 3, натискні гвинти 4 і системи врівноваження пружинного типу 5. Подушки 3 кожного з робочих роликів 2 були сполучені зі своїми натискними гвинтами 4 за допомогою кулькової опори 6 і месдоз 7. Гайки натискних механізмів 8 були розміщені безпосередньо в станинах 1, а для осьової фіксації подушок робочих роликів 3 була використана регульовальна планка 9.

Безпосередньо робочі ролики 1 (рис. 3.5 (див. с. 78)) були виготовлені зі сталі 45, і встановлені в подушках 2 кожний на здвоєних однорядних радіальних підшипниках 3.

Треба зазначити, що розглянута експериментальна установка була виконана з можливістю зміни кількості робочих роликів, задіяних у процесі правки, тобто з урахуванням можливості 5-ти, 7-ми або 9-роликового компонування (рис. 3.4).

Для перетворення з 9-роликової (рис. 3.4, а) у 7-роликову правильну машину (рис. 3.4, б) з установки демонтуються блоки роликів 1 і 2, подушки яких потім будуть встановлені в нижню частину станини як проставки. У верхню частину станини встановлюються проставки 3. Для перетворення з 9-роликової в 5-роликову правильну машину (рис. 3.4, в) з установки демонтуються блоки роликів 1, 2, 4, 5 подушки яких потім будуть встановлені у верхню та нижню частину станини як проставки. Також, для забезпечення фіксації подушок нижніх роликів у поперечному напрямку, встановлюються проставки 3.

Створена конструкція експериментальної установки правильної машини дає змогу встановлювати робочі ролики з довільно змінюваним кроком від 105 до 210 мм. Для цієї мети між подушками правильних роликів встановлюються проставки 3, подушки 1, 2, 4, 5 також використовуються в якості проставок, при цьому нижні подушки встановлюються на підставки 6 (рис. 3.4, г).

Для забезпечення можливості приводу як мінімум на 8 робочих роликів була спроектована та виготовлена спеціалізована шестеренна кліть, загальний вигляд і конструкція якої ілюстровані рисунками 3.6 і 3.7 (див. с. 81). Дев'ять зубчастих коліс 1 було виготовлено зі сталі 40ХН. Конструкція вузла станин 2 шестеренної кліті зварена. Вхідний хвостовик валу 3 центрального зубчастого колеса сполучений з приводом головної лінії робочої кліті, а вихідні хвостовики валів усіх зубчастих коліс за допомогою універсальних шпинделів на підшипниках кочення сполучені з приводними хвостовиками відповідних робочих роликів правильної машини.

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

- величина сумарного крутного моменту правки;
- величина сили правки на кожному ролику;

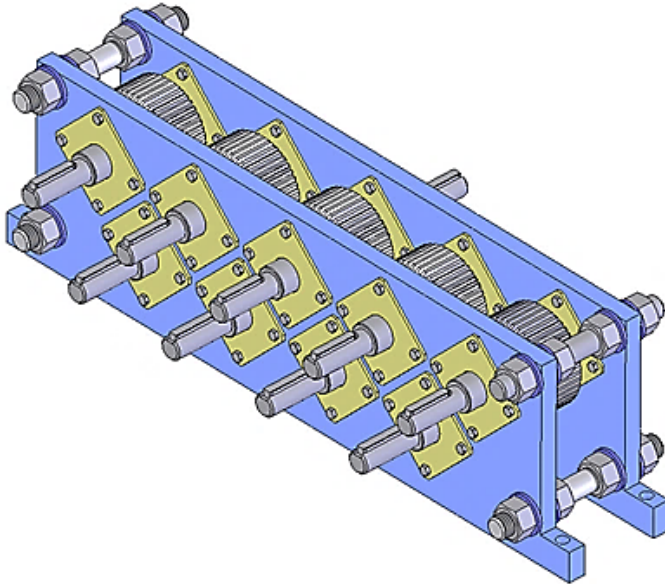


Рисунок 3.6 – Загальний вигляд шестеренної кліті лабораторної листоправильної машини 9×100×250

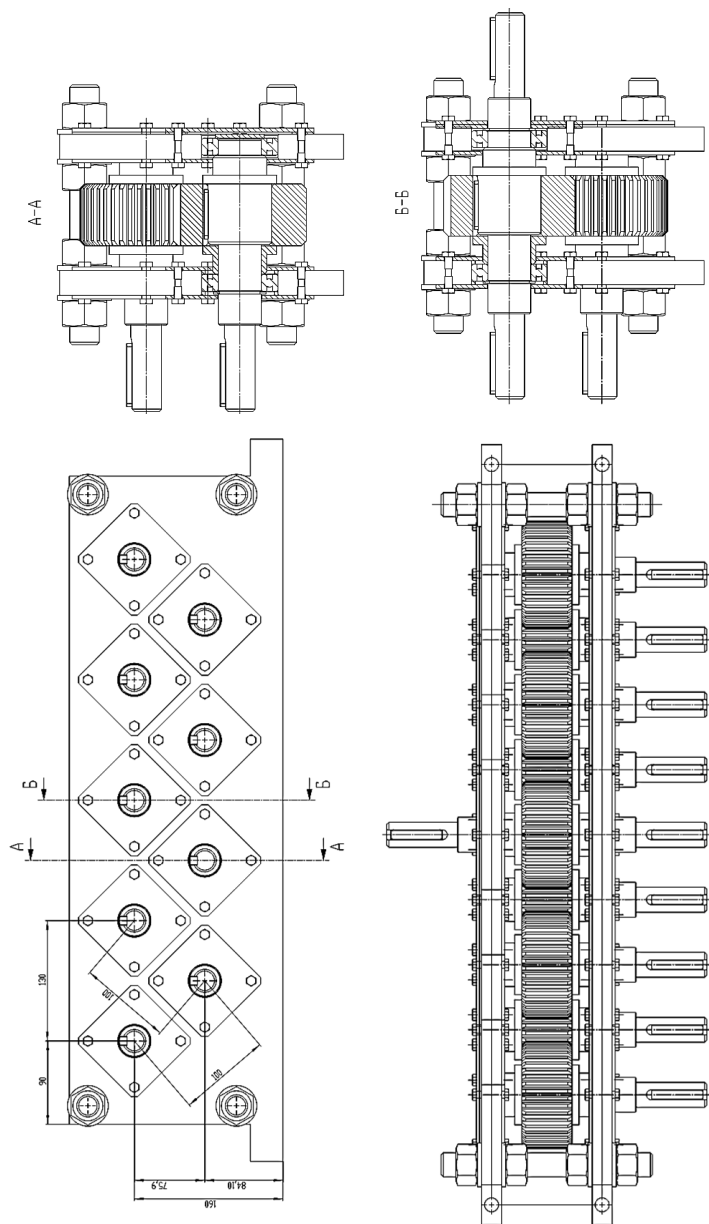


Рисунок 3.7 – Конструкція шестеренної кліті лабораторної листопривильної машини 9 × 100 × 250

– початкова та кінцева кривизна заготовок, що вимірювалися відповідно до методики роботи [161] за допомогою вимірів стріли прогину на базовій довжині.

Сумарний момент правки фіксувався за допомогою тензометричних датчиків опору, наклеєних відповідно до методик робіт [162; 163] на тіло валу входу в шестеренну кліть (рис. 3.8). Під натискними гвинтами кожного з дев'яти правильних роликів були розміщені месдозы з кільцевим пружним елементом, розраховані на сприйняття навантаження до 10 000 Н (рис. 3.9, див. с. 83).

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

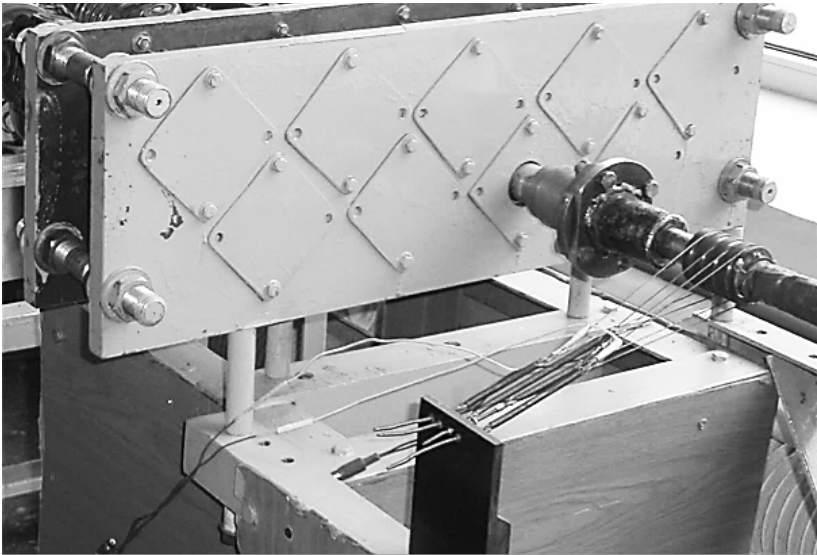


Рисунок 3.8 – Система струмознімачів датчиків моменту на корінному валу шестеренної кліті

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

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

Обробку результатів експериментальних досліджень, а також оцінку ступеню відповідності отриманих теоретичних рішень виконували із використанням загальноприйнятих методів теорії ймовірності та математичної статистики [164–167]. Для відповідності явищ, які протікають у натурному зразку та моделі було забезпечено відповідність основним умовам і законам подібності: геометричної, силової, реологічної та кінематичної [165].

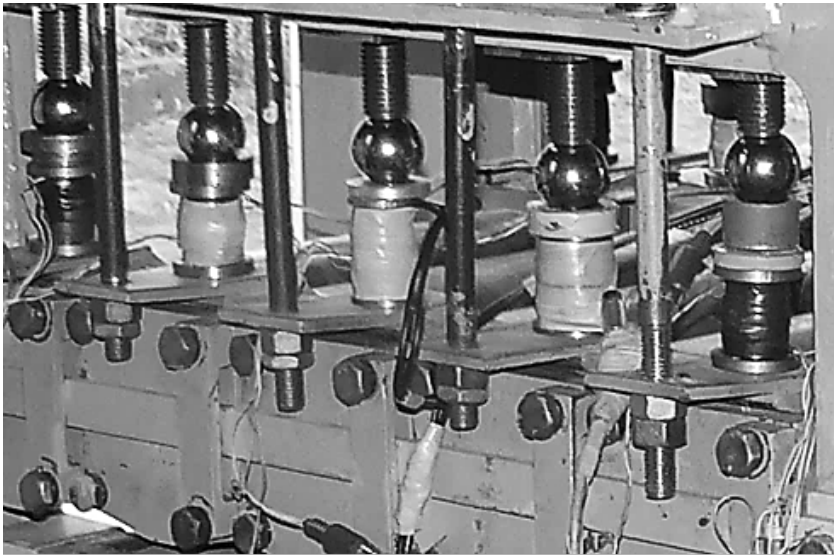


Рисунок 3.9 – Система силовимірювальних месдоз під натискними гвинтами листопривильної машини

3.2 Експериментальні дослідження процесів правки на листоправильній машині з диференційованим додаванням сили правки по ширині прокату

Особливістю процесу правки на листоправильній машині з диференційованим додаванням сили правки по ширині смуги є усунення хвилястості прокату, яке досягається шляхом вигину робочих роликів силами правки на величину, обумовлену положенням опорних роликів. На цій листоправильній машині були проведені дослідження як безпосередньо з вигином одного з робочих роликів, так і з імітацією примусового вигину застосуванням профільованого робочого ролику, опуклість якого відповідає величині його прогину.

У першому випадку для забезпечення різного подовження волокон за шириною було виготовлено спеціальне пристосування для диференційованого додавання сили до ролика листоправильної машини (рис. 3.10). Пристосування являє собою

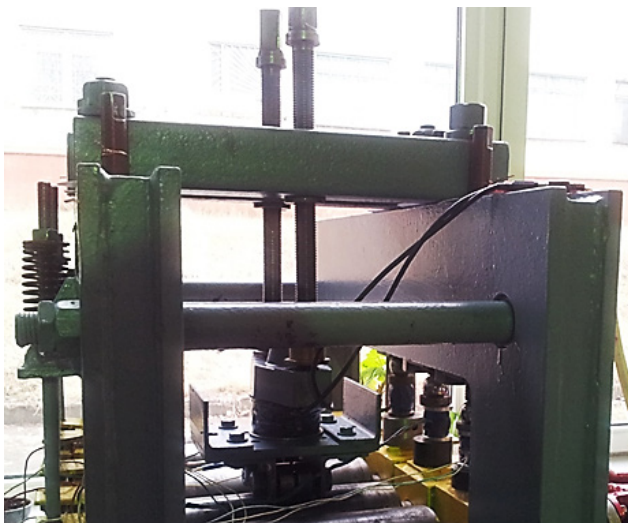


Рисунок 3.10 – Загальний вигляд спеціального пристосування для диференційованого додавання сили до ролика листоправильної машини

2 натискні гвинти, закріплені на станинах робочої кліті правильної машини, які через каретку з роликами (рис. 3.11) здійснюють вигин робочого ролика листопробірної машини.

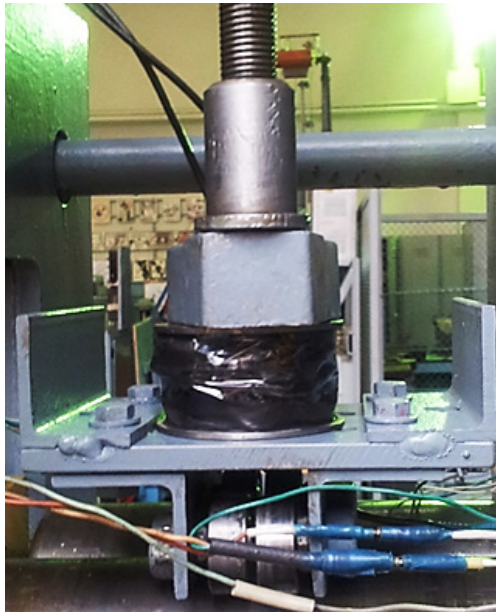


Рисунок 3.11 – Загальний вигляд каретки для диференційованого додавання сили до ролика листопробірної машини

Фіксацію прогину ролика виконували за допомогою індикатора годинникового типу (рис. 3.12, *а* (див. с. 86)) шляхом торкання голкою мікрометра каретки пристрою для диференційованого додавання сили до ролика листопробірної машини (рис. 3.12, *б* (див. с. 86)).

Сили, що діють на робочі ролики, вимірювали за допомогою штифтових месдоз із кільцевим пружним елементом, розміщених між відповідними подушками та натискними гвинтами (рис. 3.9), а сили вигину ролика – месдозою, розташованою між натискним механізмом і кареткою пристрою диференційованого додавання сили (рис. 3.13, див. с. 86).

Тарування кільцевих месдоз виконували на розташованому безпосередньо біля установки гідравлічному пресі (рис. 3.14, див. с. 87) шляхом їхнього попарного імітаційного навантаження силою відомої величини без розбирання комутаційного електричного ланцюга підключення датчиків до аналого-цифрового перетворювача.

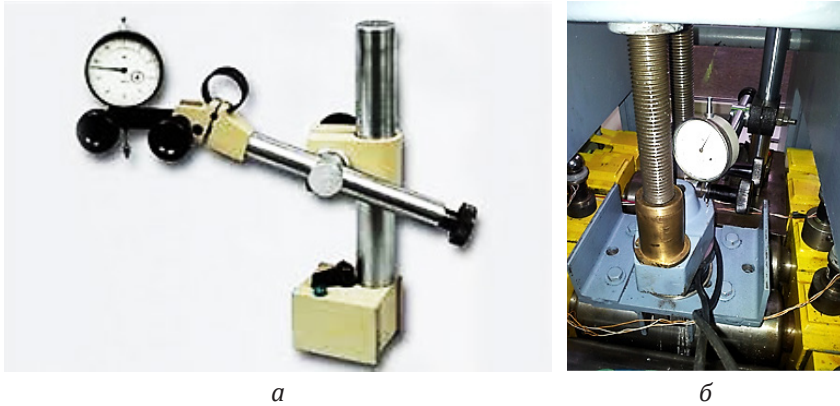


Рисунок 3.12 – Загальний вигляд індикатора годинникового типу (а), а також спосіб (б) вимірювання прогину ролика листоправильної машини



Рисунок 3.13 – Месдоза під кареткою пристрою диференційованого додавання сили

Запис поточних у часі значень усіх реєстрованих параметрів виконували за допомогою багатофункціонального модуля АЦП-ЦАП М-DAQ12, який приєднувався до ПК через USB-Інтерфейс (Highspeed). Підключення сигналів здійснювалося через роз'єм, розташований на бічній стінці модуля. Їхнє наступне розшифрування здійснювали з використанням ЕОМ шляхом аналітичної інтерпретації відповідних тарувальних графіків (рис. 3.15).



Рисунок 3.14 – Тарування кільцевих месдоз на гідравлічному пресі

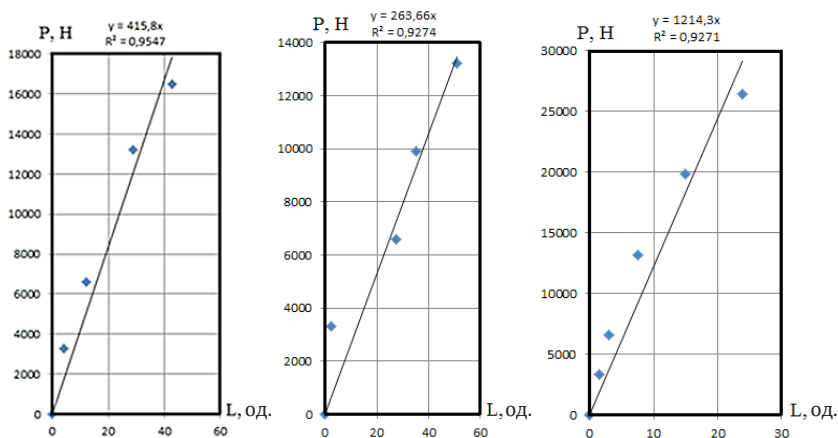


Рисунок 3.15 – Тарувальні графіки вимірників сили під 3-м (а), 5-м (б) роликками, а також під кареткою (в) пристрою диференційованого додавання сили при дослідженні процесу правки листа

Ступінь невідповідності показань при таруванні у відносному вимірі не перевищував $\pm 8\%$.

При проведенні експериментальних досліджень використовували в якості зразків сталеві листи перерізом $2,5 \times 152$ мм (рис. 3.16), а також листи зі свинцю перерізом 10×200 мм (рис. 3.17).

Геометричні параметри, що характеризують налаштування робочих роликів експериментальної листопральної



Рисунок 3.16 – Загальний вигляд сталевих листів, використовуваних при експериментальному дослідженні



Рисунок 3.17 – Загальний вигляд листів зі свинцю, використовуваних при експериментальному дослідженні

машини 9×100×250 при дослідженні процесів правки листів товщиною 2,5 мм і шириною 152 мм зі сталі представлено в таблиці 3.1. Аналогічні дані стосовно до правки листів зі свинцю марки С1 товщиною 10 мм і шириною 200 мм зведено в таблицю 3.2.

Таблиця 3.1 – Налаштування робочих роликів експериментальної листоправильної машини 9×100×250 при дослідженні процесу правки зразків товщиною 2,5 мм і шириною 152 мм зі сталі 45

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

Таблиця 3.2 – Налаштування робочих роликів експериментальної листоправильної машини 9×100×250 при дослідженні процесу правки зразків товщиною 10 мм і шириною 200 мм зі свинцю С1

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

Налаштування роликів листоправильної машини здійснювали в такий спосіб.

Робоча кліть і всі нижні ролики листоправильної машини встановлюються по нульовому рівні. Налаштування на сортамент здійснюється натискними гвинтами листоправильної машини (рис. 3.3, поз. 11) за такою схемою:

- абсолютно рівний лист кладеться на нижні ролики листоправильної машини;
- верхні ролики опускаються до торкання з поверхнею листа;
- пропускається лист крізь листоправильну машину без здійснення перегинів на роликах;
- це налаштування приймається за базове.

Наступне налаштування роликів листоправильної машини здійснюється натискними гвинтами згідно з таблицями 3.1, 3.2, виходячи з умови, що 1 оберт гвинта (360°) дорівнює переміщенню ролика на 2,5 мм.

Для визначення подовження волокон листа, на його поверхні були нанесені мітки, відповідні довжинам волокон (рис. 3.18).

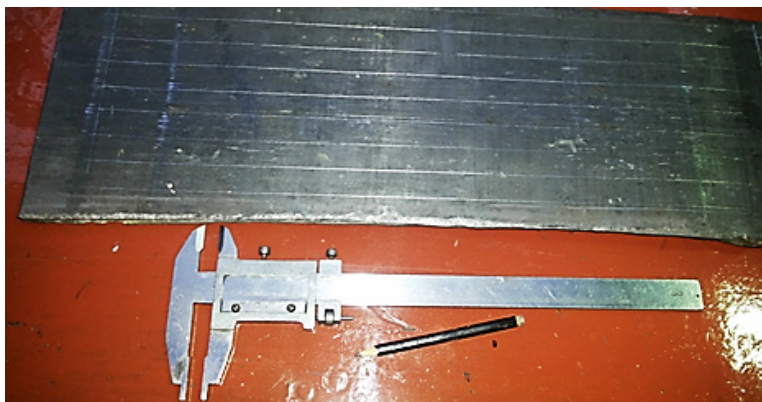


Рисунок 3.18 – Загальний вигляд поверхні листів для визначення подовження волокон при експериментальному дослідженні на листопрямильній машині з диференційованим додаванням сили правки по ширині листа

При експериментальних дослідженнях було виправлено 12 листів, типові приклади осцилографічних розподілів сил, вимірюваних на кожному з правильних роликів, а також різниця по ширині довжин волокон листа при виправленні до та після додавання диференційованої сили правки наведені на рисунку 3.19 (див. с. 91) і в таблиці 3.3 (див. с. 92) [168].

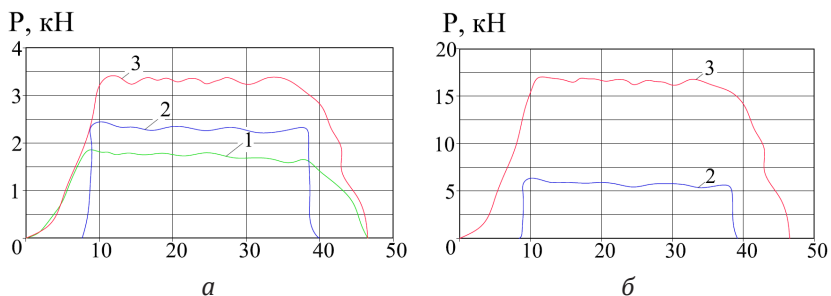
Згідно з вихідними даними, що відповідають наведеним у таблицях 3.1 і 3.2 умовам налаштувань робочих роликів, були виконані розрахунки енергосилових параметрів процесу правки. Зіставлення експериментальних та теоретичних результатів представлено таблицею 3.4 (див. с. 92) і 3.5 (див. с. 93).

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

Під час експериментальних досліджень правки сталевих зразків різниця витяжок складала порядку 1,001 при теоретичній 1,00141, а свинцевих – 1,008–1,012 при теоретичній – 1,01064. При цьому похибка розрахунків різниці довжин волокон для сталевих листів не перевищила 12,9 %, а для свинцевих – 11,34 %.

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

Сила правки. Пропуск № 1



Сила правки. Пропуск № 2

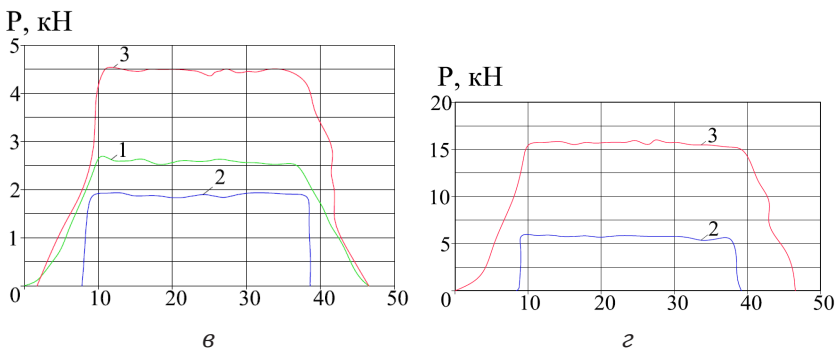


Рисунок 3.19 – Типові значення сил правки під 3-м (1) і 5-м (2) роликками, а також під кареткою (3) при експериментальному дослідженні на листопробірній машині з диференційованим додатком сили правки по ширині смуги на зразках зі сталі 45 (а) і свинцю С1 (б)

Для виявлення більш повної картини були також проведені дослідження правки листів у роликах із бочкоподібною формою робочої поверхні, що дозволяє в достатній мірі імітувати вигин по центру ролика (рис. 3.20, див. с. 93).

Було проведено експериментальні дослідження холодної правки сталевих листів із дефектом площинності у вигляді хвилястості крайок. Згідно з результатами теоретичних досліджень

Таблиця 3.3 – Геометричні параметри, що характеризують різницю довжин волокон листа при виправленні до та після додавання диференційованої сили при дослідженні процесу правки зразків товщиною 10 мм і шириною 200 мм зі свинцю С1

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

Таблиця 3.4 – Сили правки при дослідженні зразків у холодному стані при правці до та після додавання диференційованої сили

Номер пропуску	Сила правки, Н					
	до вигину ролика			після вигину ролика		
	P _з	P ₅	P _б	P _з	P ₅	P _б
Сталеві листи перерізом 2,5×152 мм						
1	6237	4614,05	0	0	6591,5	17 000,2
2	7267,5	5536,86	0	0	6855,16	15 178,75
Листи зі свинцю перерізом 10×200 мм						
1	—	—	—	1739,7	2121,8	3195,92
2	—	—	—	2609,55	1803,53	4565,6

Таблиця 3.5 – Порівняння сил правки при теоретичних і експериментальних дослідженнях процесу правки

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

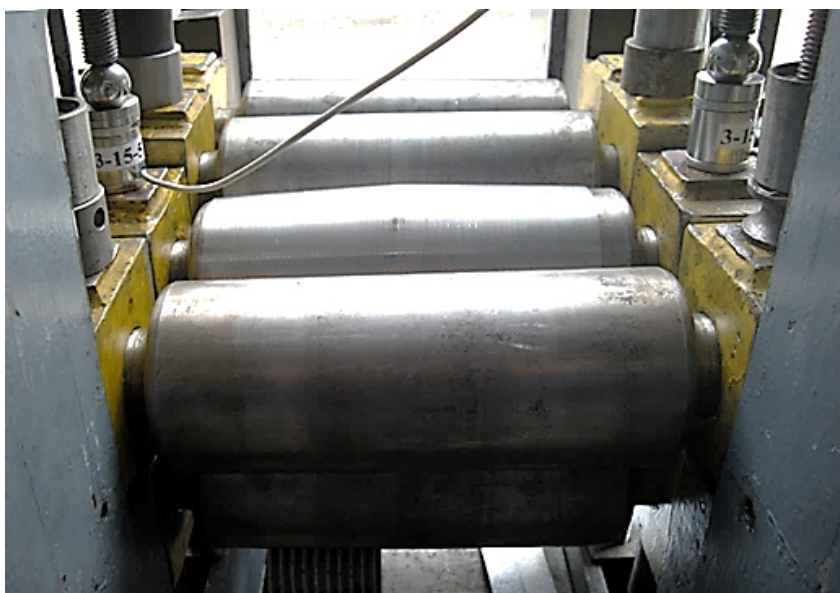


Рисунок 3.20 – Роликова система листопробивальної машини з 3-м роликом бочкоподібної форми для імітації вигину по центру листа

правку такого дефекту здійснюють роликком із вигином посередині бочки. При цьому диференційоване додавання сили по ширині листа моделювали шляхом використання ролика з бочкоподібним профілюванням робочої поверхні, що забезпечує різне перекриття і, як наслідок, різну величину сили правки по ширині прокату. Відповідно до результатів теоретичних досліджень профільованим був виконаний тільки третій ролик листоправильної машини. Різниця діаметрів на ньому по середині та по краях складала 5 мм, що відповідало величині прогину робочої поверхні 2,5 мм.

Для експериментальних досліджень у якості зразків використовували сталеві листи розміром 2,5×150×900 мм (рис. 3.21), на крайках яких механічним способом виконували хвилястість. Матеріал листів – сталь 45. Оскільки подовження волокон у центральній частині сталевих листів при правці з бочкоподібним роликком на базі 900 мм не перевищує 1 мм, для більшої наочності правки дефекту була виконана вихідна хвилястість з амплітудою в діапазоні $A=2,3-4$ мм. Усього було виправлено по 10 зразків.

Геометричні параметри, що характеризують налаштування робочих роликів експериментальної листоправильної машини 9×100×250 при дослідженні процесів правки листів товщиною 2,5 мм і шириною 150 мм зі сталі 45, вибиралися



Рисунок 3.21 – Загальний вигляд сталевого зразка, використовованого при експериментальному дослідженні

з урахуванням результатів теоретичних досліджень і представлених в таблиці 3.6.

Таблиця 3.6 – Геометричні параметри налаштування робочих роликів експериментальної ЛПМ 9×100×250 ДДМА при дослідженні процесу правки

№ проходу	Перекриття роликів щодо листа, мм			
	1 ролик	3 ролик		5 ролик
		по центру	по крайці	
1	0	5	2,5	0
2	0	7,5	5	0
3	0	10	7,5	0

При експериментальних дослідженнях листи правили за 3 проходи, з налаштуванням роликів, зазначеним у таблиці 3.6. Типові приклади осцилографічних розподілів сил і моментів на шпинделях робочих роликів (рис. 3.22, див. с. 96), а також зміни амплітуди хвилястості після кожного проходу (рис. 3.23, див. с. 97) наведені нижче.

Для коректного зіставлення результатів теоретичних і експериментальних досліджень процес правки на лабораторній установці був промодельований за допомогою тривимірної скінчено-елементної моделі (див. розд. 2), для якої як вихідні параметри були прийняті параметри експерименту.

Встановлено, що при експериментальному дослідженні для випадку правки листа з максимальною вихідною амплітудою хвилі на крайці 4 мм (рис. 3.23, а) після першого проходу амплітуда хвилі склала 3,3 мм (рис. 3.23, б), після другого проходу – 2,7 мм (рис. 3.23, в), після третього – 1,8 мм (рис. 3.23, г) зі середньоквадратичним відхиленням за результатами експериментів відповідно 0,12, 0,11 і 0,09 мм. Водночас при тривимірному моделюванні амплітуда хвилястості на крайці склала після першого проходу 2,9 мм, після другого проходу – 2,3 мм, а після третього – 1,6 мм (рис. 3.24, див. с. 98).

Похибка результатів у всіх випадках не перевищила 15 %, що свідчить про достатній ступінь вірогідності теоретичної моделі стосовно результуючих параметрів форми листа.

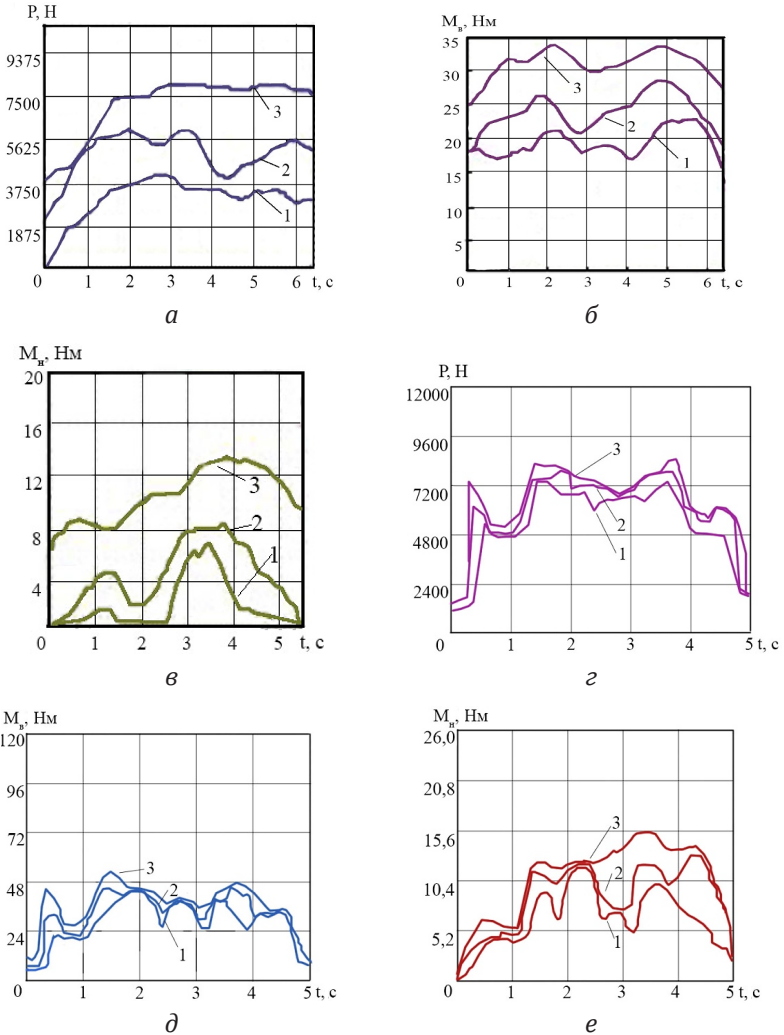


Рисунок 3.22 – Енергосиліві параметри при експериментальному (а-в) і тривимірному (г-д) дослідженні: а – сила на 3-му ролику; б – момент на шпинделі 3-го ролика; в – момент на шпинделі 4-го ролика; г – сила на 3-му ролику; д – момент на шпинделі 3-го ролика; е – момент на шпинделі 4-го ролика

Аналогічні результати мали місце і для випадку правки інших зразків, при цьому абсолютні показники були нижче, а статистичні відрізнялися незначно.

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

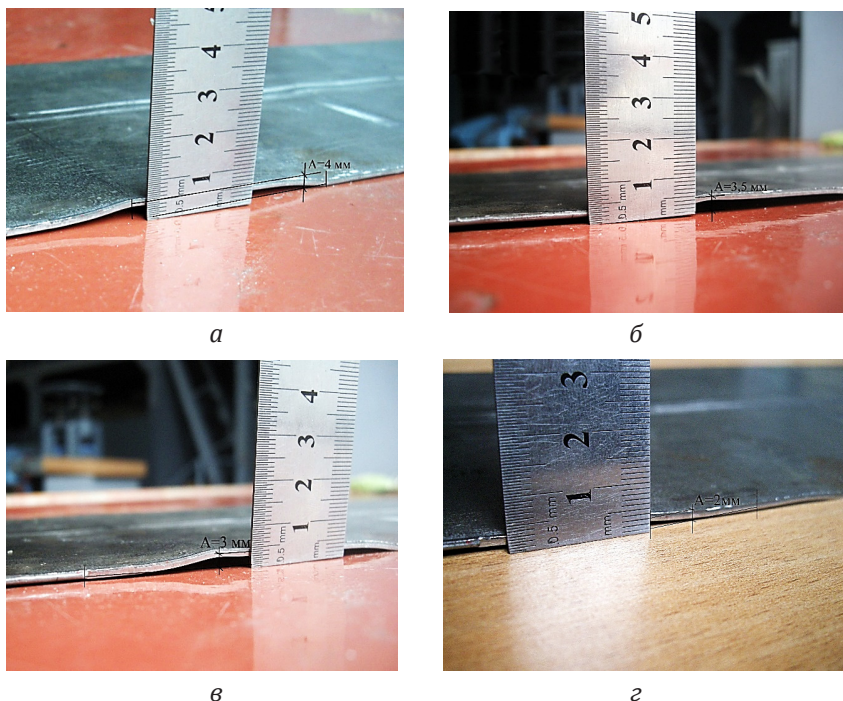


Рисунок 3.23 – Зміна амплітуди хвилястості на крайках листа:
а – вихідна хвилястість; б – хвилястість після 1-го проходу;
в – після 2-го проходу; г – після 3-го проходу

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

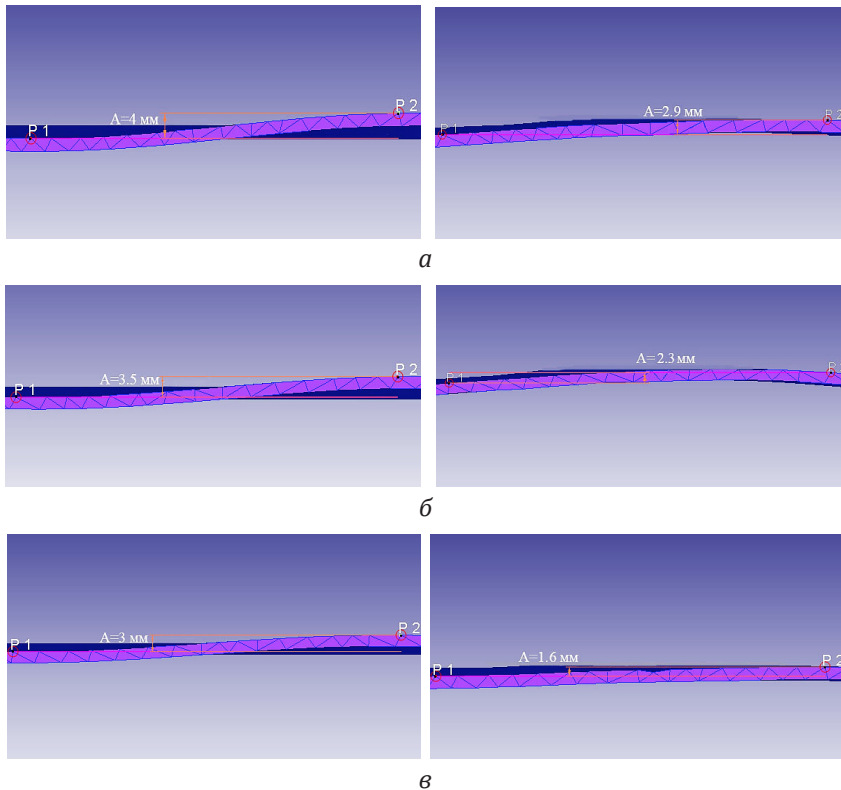


Рисунок 3.24 – Форма крайки листа, отримана при математичному моделюванні процесу правки – зміна хвилястості після: 1-го проходу (а); 2-го проходу (б); 3-го проходу (в)

3.3 Експериментальне дослідження процесу правки на листоправильній машині в промислових умовах

Для промислової адаптації розроблених математичних моделей і програмних засобів були проведені експериментальні дослідження в умовах діючого цеху на листоправильній машині товстолистового стану 2800 Ашинського металургійного заводу. Ця листоправильна машина контрукції НКМЗ уведена в експлуатацію в грудні 2013 р. та має такі переваги [169]:

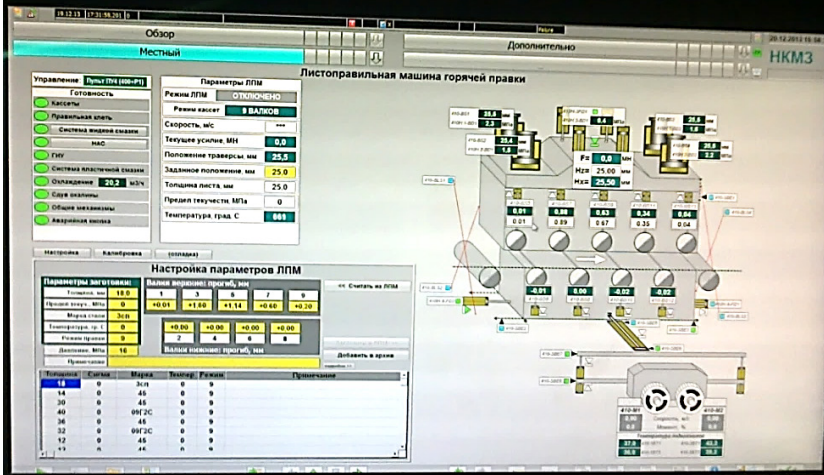
- листоправильна машина ТЛС 2800 АМЗ є однією з найбільш сучасних і дає змогу реалізувати індивідуальне налаштування робочих роликів;

- система автоматичного керування листоправильною машиною оснащена діагностичним комплексом ІВА, який дозволяє вести моніторинг великої кількості параметрів роботи устаткування, таких, як переміщення та фактичне положення траверси листоправильної машини та кожного з правильних роликів, тиск у натискних гідравлічних циліндрах, задану та фактичну швидкість, силу струму та моменту на кожному з двигунів приводу правильних роликів та ін.

Дослідження проводилися в такий спосіб. Оператор одержував із пульта керування робочої кліті ТЛС інформацію про марку металу і його товщину. При наближенні листа до листоправильної машини встановленим на вході пірометром фіксувалася температура листа. Отримані вихідні дані вручну вводилися на першому етапі в переносну ЕОМ, а на другому – у керуючу програму ЛПМ з установленими програмними засобами на основі описаних у розділі 3 математичних моделей. Інтерфейс керуючої програми представлено на рисунку 3.25 (див. с. 100). Після завершення розрахунків результати повідомлялися операторові, який виконував налаштування листоправильної машини. Якість виправленого металу оцінювалося працівниками ОТК цеху згідно з діючими стандартами та умовами.

Записи енергосилових і кінематичних параметрів процесу фіксувалися протоколами системи ІВА. Приклад осцилографічного представлення протоколу запису технологічних

параметрів в автоматичній системі діагностики ІВА показано на рисунку 3.26. Після розшифрування та зіставлення даних з інформацією рапортів прокатки по чистовій кліті (даних про геометричний і марочний сортамент прокатоного металу)



а



б

Рисунок 3.25 – Інтерфейс керуючої програми (а) і пульт керування (б) ЛПМ ТЛC 2800 АМ3

аналізувалося відповідність результатів розрахунків енергосило-
вих параметрів і їх фактичних значень.

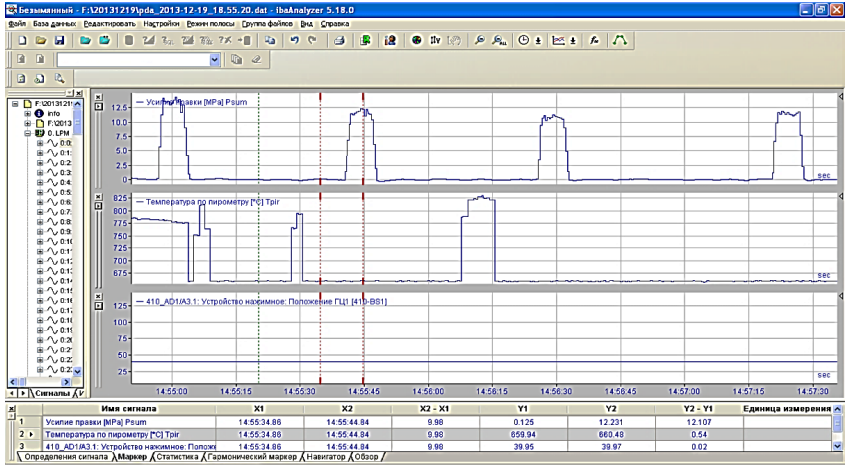


Рисунок 3.26 – Розподіли параметрів процесу правки на ЛПМ ТЛС 2800 АМЗ, що відображені в системі ІВА

Процес експериментальної правки відбито на рисунках 3.27 і 3.28 (див. с. 102), а стан листів після правки – на рисунку 3.29 (див. с. 103). У зв'язку з тим, що робота проводилася на діючому устаткуванні, обсяг і кількість зразків, що піддавалися правці з використанням розрахованих технологічних налаштувань, обмежувалися програмою завантаження стану.

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

Сумарна сила правки визначалася в такий спосіб. У ненавантаженому стані обчислювалося середнє значення тиску в натискних та врівноважувальних гідроциліндрах, при правці визначалася різниця між тиском у натискних гідроциліндрах і середніми значеннями отриманих тисків за такою залежністю:



Рисунок 3.27 – Вхід металу в ЛПМ ТЛС 2800 АМЗ



Рисунок 3.28 – Вихід металу із ЛПМ ТЛС 2800 АМЗ

$$P_{\Sigma} = \sum_{i=1}^4 P_i - \sum_{i=1}^4 P_{cp_i} - \left(\sum_{i=1}^n P_{вр_i} - G_{ТР} \right), \quad (3.1)$$

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

ρ – тиск рідини в гідроциліндрах;

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

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

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

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

Під час промислової адаптації були внесені зміни у визначенні вихідних даних для розрахунків налаштування роликів.

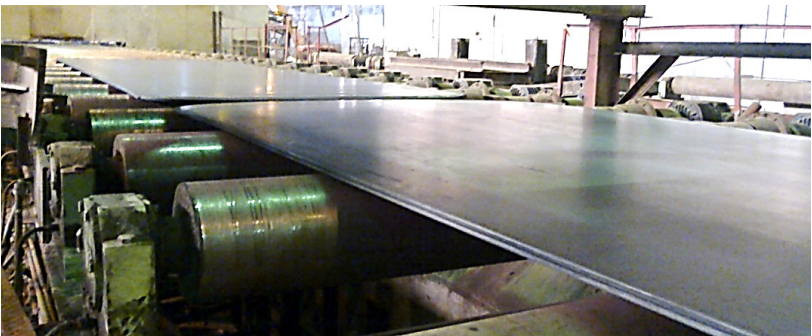


Рисунок 3.29 – Метал після правки на ЛПМ ТЛС 2800 АМЗ

Зокрема, через неможливість визначення напруження плинності матеріалу листів була здійснено 3 варіанти введення даних:

1. Явне задавання напруження плинності в мегапаскалях.

2. Задавання групи сталей. За рекомендаціями фахівців АМЗ марки сталей були розбиті на 6 груп. За базові прийняті типові марки сталі з характерними механічними властивостями для своєї групи: 1 – сталь 03сп; 2 – 17Г1С; 3 – 09Г2С; 4 – 10ХСНД; 5 – 40Х; 6 – 30ХГСА. Обчислення напруження плинності виконувалося за методикою Андреюка (див. підрозд. 1.3).

3. Задавання хімічного складу сталі, а саме змісту в процентному співвідношенні вуглецю; марганцю; кремнію; хрому; нікелю; вольфраму; молібдену; ванадію; титану; алюмінію; кобальту; ніобію та міді. Тут треба зазначити, що цей спосіб виконаний на перспективне введення нового пічного обладнання, яке дозволяє одержувати даний вид інформації.

Дані про розмірний і марочний сортамент листів, підданих правці з використанням розрахованих на підставі розроблених математичних моделей технологічних налаштувань, наведено в таблиці 3.7 (див. с. 106–107). Тут же наведені результати

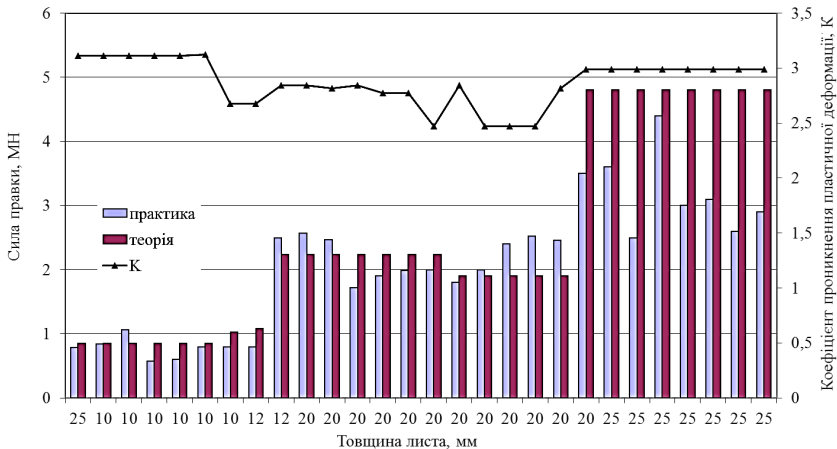


Рисунок 3.30 – Порівняння експериментальних і теоретичних сил правки залежно від товщини для листів зі сталі 03сп

теоретичного розрахунку сили правки та відповідна похибка. На рисунках 3.30–3.32 наведені гістограми порівняння сил правки залежно від марки сталі та товщин листів.

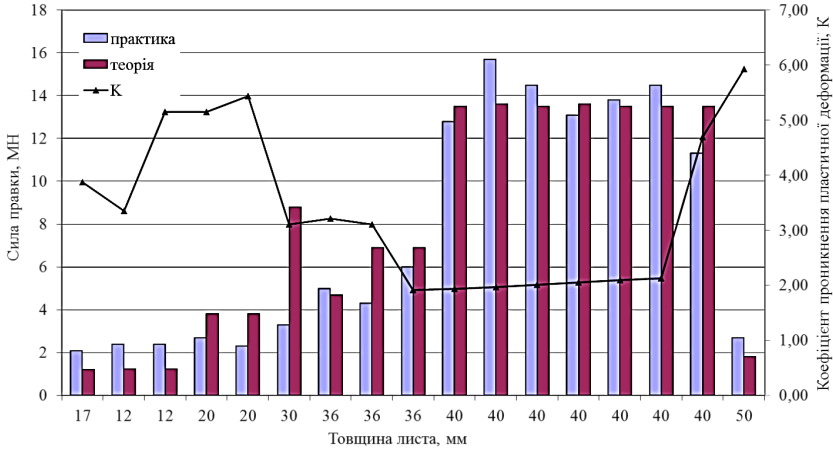


Рисунок 3.31 – Порівняння експериментальних і теоретичних сил правки залежно від товщини для листів зі сталі 09Г2С

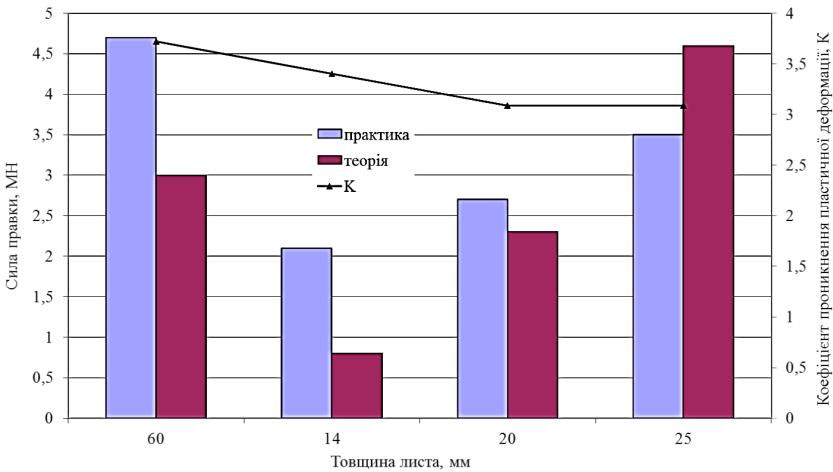


Рисунок 3.32 – Порівняння експериментальних і теоретичних сил правки залежно від товщини для листів зі сталі 30ХГСА

Таблиця 3.7 – Результати промислового експерименту

Матеріал	Товщина		Ширина		Налаштування роликів, мм								Сила прайки		Температура		Кількість		Р _{теор}		Похибка	
	мм	2	мм	3	1	3	5	6	7	7	8	9	МН	9	10	штук	11	МН	12	%	13	
1																						
3сп	8	2000	0	2,95	2,04	1,04	0,03	0,6	650	1	0,535	-12,1										
3сп	10	1500	0	2,21	1,56	0,8	0,03	0,79	650	1	0,855	7,6										
3сп	10	1500	0	2,21	1,56	0,8	0,03	0,84	650	1	0,855	1,8										
3сп	10	1500	0	2,21	1,56	0,8	0,03	1,06	650	1	0,855	-24,0										
3сп	10	1500	0	2,21	1,56	0,8	0,03	0,57	650	6	0,855	33,3										
3сп	10	1500	0	2,21	1,56	0,8	0,03	0,6	650	1	0,855	29,8										
3сп	10	1500	0	2,2	1,55	0,79	0,04	0,8	710	1	0,855	6,4										
3сп	12	1500	0	2,14	1,5	0,76	0,02	0,8	755	3	1,028	22,2										
3сп	12	1500	0	2,14	1,5	0,76	0,02	0,8	810	3	1,08	25,9										
3сп	20	1500	0	1,21	0,9	0,44	0,07	2,5	750	1	2,24	-11,6										
3сп	20	1500	0	1,21	0,9	0,44	0,07	2,57	750	1	2,24	-14,7										
3сп	20	1500	0	1,22	0,92	0,47	0,04	2,47	750	1	2,24	-10,3										
3сп	20	1500	0	1,21	0,9	0,44	0,07	1,72	750	1	2,24	23,2										
3сп	20	1500	0	1,24	0,93	0,49	0,05	1,9	750	1	2,24	15,2										
3сп	20	1500	0	1,24	0,93	0,49	0,05	1,99	750	1	2,24	11,2										
3сп	20	1500	0	1,39	1,01	0,53	0,04	2,0	750	1	2,24	10,7										
3сп	20	1500	0	1,21	0,92	0,47	0,05	1,8	750	1	1,9	5,3										
3сп	20	1500	0	1,39	1,01	0,53	0,04	2,0	750	1	1,9	-5,3										
3сп	20	1500	0	1,39	1,01	0,53	0,04	2,4	750	1	1,9	-26,3										
3сп	20	1500	0	1,39	1,01	0,53	0,04	2,52	750	1	1,9	-32,6										

Закінчення таблиці 3.7

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
3сп	20	1500	0	1,22	0,93	0,47	0,04	2,46	750	4	1,9	-29,5
09Г2С	20	1800	0,01	1,62	1,17	0,6	0,03	2,7	700	1	3,8	28,9
30ХГСА	20	2000	0	1,01	0,76	0,39	0,02	2,7	750	1	2,3	-17,4
3сп	25	2000	0,01	0,92	0,73	0,38	0,02	3,5	750	1	4,8	27,1
3сп	25	2000	0,01	0,92	0,73	0,38	0,02	3,6	750	1	4,8	25,0
3сп	25	2000	0,01	0,92	0,73	0,38	0,02	4,4	750	1	4,8	8,3
30ХГСА	25	2000	0,01	0,89	0,67	0,35	0,04	3,5	750	1	4,6	23,9
30ХГСА	25	2000	0,01	0,89	0,67	0,35	0,04	3,35	750	1	4,6	27,2
09Г2С	36	2000	0	1,2	0,82	0,40	0	5,0	850	1	4,7	-6,4
09Г2С	36	2000	0	1,16	0,8	0,37	0	4,3	900	1	6,9	37,7
09Г2С	36	2000	0	1,2	0,81	0,40	0	6,0	900	1	6,9	13,0
09Г2С	40	2000	0	2,57	1,74	0,88	0	12,8	800	2	13,5	5,2
09Г2С	40	2000	0	2,59	1,73	0,90	0	15,7	900	1	13,6	-15,4
09Г2С	40	2000	0	2,60	1,73	0,90	0	14,5	850	1	13,5	-7,4
09Г2С	40	2000	0	2,58	1,74	0,90	0	13,1	900	1	13,6	3,7
09Г2С	40	2000	0	2,57	1,74	0,90	0	13,8	800	2	13,5	-2,2
09Г2С	40	2000	0	2,56	1,69	0,81	0,02	14,5	850	1	13,5	-7,4
09Г2С	40	2000	0	2,56	1,68	0,82	0,02	11,3	850	1	13,5	16,3
3сп	40	1500	0	2,57	1,72	0,88	0,02	10	850	2	13,5	25,9
3сп	40	1500	0	1,47	1,07	0,54	0,02	10	850	2	14,2	29,6

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

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

Холодній правці піддавали листи товщиною 8–25 мм, що мали яскраво виражені дефекти площинності такі як: коробуватість і поздовжня хвилястість, що перевищувала 30 мм/м (рис. 3.33).

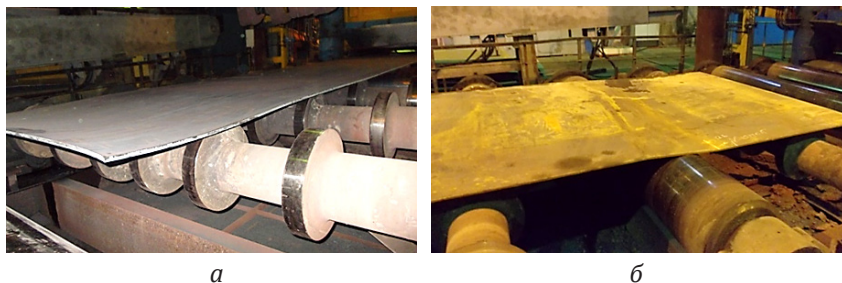


Рисунок 3.33 – Листи товщиною 16 мм (а) і 8 мм (б) зі сталі 09Г2С до холодної правки

Листи укладали цеховим краном на рольганг перед листопривальною машиною, очищали поверхню від забруднень і заміряли товщину в трьох-чотирьох точках по довжині листа, а також геометричні параметри вихідних дефектів площинності. Для вимірів використовували перевірочні лінійки довжиною 1 м і 2 м, штангенциркуль, лінійку та набір щупів. На рисунках 3.34, 3.35 (див. с. 109) показаний принцип вимірів дефектів площинності на прикладі листа товщиною 16 мм зі сталі 3сп. Поверхня листа

мала поздовжню хвилю величиною до 32 мм/м, а також коробуватість у хвостовій частині листа порядку 12 мм на ширині 2 м. Зафіксовані дефекти на поверхні листів відзначалися крейдою зі вказівкою виду дефекту і його величини.

У результаті правки площинність оброблених листів була доведена до показників, що задовольняють вимогам ГОСТ і навіть перевищуючих їх (рис. 3.35). В основному правка виконувалася за один прохід.

При проведенні промислових експериментів як гарячої, так і холодної правки були використанні різноманітні значення коефіцієнтів проникнення пластичної деформації, котрі визначалися положенням третього робочого ролика (рис. 3.30–3.32).



Рисунок 3.34 – Виміри товщини металу, що виправляється, і вихідних дефектів площинності:
а – хвилястості; б – коробуватості



Рисунок 3.35 – Виміри дефектів площинності листа після правки:
а – хвилястості; б – коробуватості

На основі результатів контролю площинності отриманих листів було встановлено, що для гарячої правки найбільш раціональне значення коефіцієнту проникнення пластичної деформації лежить у діапазоні 2,5–4, а для холодної правки – 4–6.

Вибір значення цього коефіцієнту в межах рекомендованих діапазонів залежить від вихідної кривизни листів (чим більше кривизна, тем вище значення). Крім цього було встановлено, що для холодної правки листів із високим рівнем коробуватості потрібно 2 проходи для одержання площинності понад вимоги ГОСТ, а саме нижче 1 мм/м.

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

4 | АВТОМАТИЗОВАНЕ ПРОЄКТУВАННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИХ НАЛАШТУВАНЬ ЛИСТОПРАВИЛЬНОЇ МАШИНИ З ДИФЕРЕНЦІЙОВАНИМ ДОДАВАННЯМ СИЛИ ПРАВКИ ПО ШИРИНІ ЛИСТІВ

4.1 Автоматизоване проєктування технологічних налаштувань листопривильної машини на основі чисельно-аналітичної моделі процесу правки багаторазовим знакозмінним вигином

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

В основі такої автоматизованої системи лежить розроблена математична модель (див. розд. 2), а також її програмна реалізація. Розроблений алгоритм математичної моделі дає змогу визначити необхідні для правки поздовжньої кривизни технологічні налаштування првилльної машини, що зводиться до визначення координат кожного зі встановлюваних роликів залежно від відомих параметрів металу, що виправляється, геометричних параметрів листопривильної машини, а також значення допустимої залишкової кривизни металу після правки. При цьому особливістю цієї моделі є можливість застосування такого налаштування роликів листопривильної машини, при якому виправляється дефект, пов'язаний із різним подовженням волокон за шириною листа.

Вивчаючи досвід експлуатації устаткування, для полегшення задавання металу в првилльну машину перший по ходу

металу ролик – верхній доцільно встановлювати на товщину металу, а значення прогину металу першими роликами на вході в машину [133]:

$$f_3 = \frac{\sigma_s t^2}{KEh}, \quad (4.1)$$

де σ_s – границя текучості матеріалу прокату, що правиться, МПа;

t – крок роликів правильної машини, мм;

E – модуль пружності, МПа;

h – товщина прокату, мм;

K – коефіцієнт проникнення пластичної деформації.

У якості вихідних даних були використані такі:

- діаметр роликів d листоправильної машини;
- крок роликів t листоправильної машини;
- кількість n роликів, а також особливість їх розташування¹;
- товщина листа h , фізико-механічні властивості матеріалу листа, його напруження текучості σ_s та коефіцієнти, що описують криву зміцнення;
 - вихідна кривизна листа χ_0 ;
 - заданий коефіцієнт проникнення пластичної деформації K [133];
 - максимально припустима кривизна листа після правки $[\chi_1]$.

Ґрунтуючись на зазначених передумовах, отриманих із досвіду експлуатації, та використовуючи вищенаведені вихідні дані, був розроблений наступний алгоритм автоматизованого проектування технологічного налаштування багатороликової листоправильної машини, приведений для конструкції з можливістю правки листів із хвилястістю [169].

На першому етапі для всього циклу проектування всі нижні ролики лежать в одній площині на рівні правки, а верхні ролики від нижніх встановлюються на відстані, рівній товщині металу, що правиться (рис. 4.1, а (див. с. 113)).

¹ Під особливостями розташування правильних роликів мається на увазі порядок їх розташування у верхній і нижній касетах (верхній або нижній ролики перший по ходу руху металу), можливість регулювання положення вхідного та вихідного роликів, паралельне, похиле або індивідуальне налаштування інших роликів і розташування регульованих роликів – у верхній або нижній касетах.

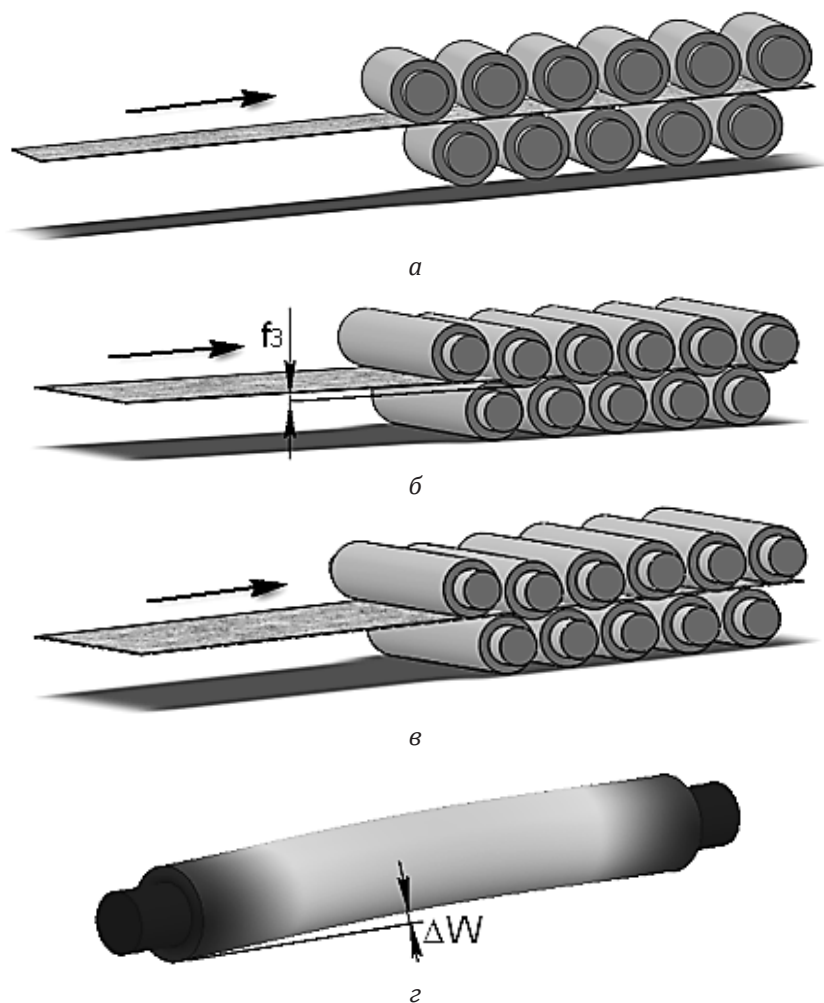


Рисунок 4.1 – Розрахункова схема до алгоритму автоматизованого проектування технологічного налаштування багатороликової листопробірної машини:

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

На другому етапі перший ролик залишається без змін, а наступні верхні ролики, починаючи з 2-го, опускаються на величину, рівну розрахунковому прогину f_3 (4.1) (рис. 4.1, б (див. с. 113)).

Третій етап полягає в моделюванні процесу правки для отриманих координат правильних роликів. Відбувається перевірка, яка полягає в наступному: коли кривизна металу на виході з машини менше або дорівнює припустимій, проектування завершується, налаштування вважається прийнятним. Якщо ж кривизна прокату на виході з листоправильної машини перевищує припустиме значення, то ролики № 1 і 3 залишаються на місці, а верхні ролики, починаючи з № 5, починають підніматися на величину, що регламентується точністю позиціонування осей роликів наявним натискним механізмом (рис. 4.1, в (див. с. 113)).

Для отриманих координат знову проводиться повтор третього етапу.

Після того, як залишкова поздовжня кривизна листа увійде в інтервал припустимої кривизни, перевіряється показник форми листа (див. підрозділ. 2.1), і якщо буде потреба – проводять вигин ролику № 3 (рис. 4.1, г (див. с. 113)). Величину вигину збільшують із мінімально можливої до максимально припустимої з умов міцності цього ролику. У випадку задовільного показника форми листа цей етап припиняють, у противному випадку при максимальному вигині поточного ролика починають процедуру вигину наступного по ходу ролика.

Укрупнену блок-схему цього алгоритму рішення показано на рисунку 4.2 (див. с. 115).

Ці програмні засоби були адаптовані до процесу гарячої та холодної правки на ЛПМ № 1 ТЛС 2800 Ашинського металургійного заводу [170]. Програма була виконана згідно з вимогами замовника у вигляді бібліотеки DLL, що динамічно підключається.

Для перевірки адекватності розробленого алгоритму автоматизованого розрахунку технологічного налаштування багатороликової листоправильної машини було виконано низку розрахунків для різного типорозміру листів із різних матеріалів.

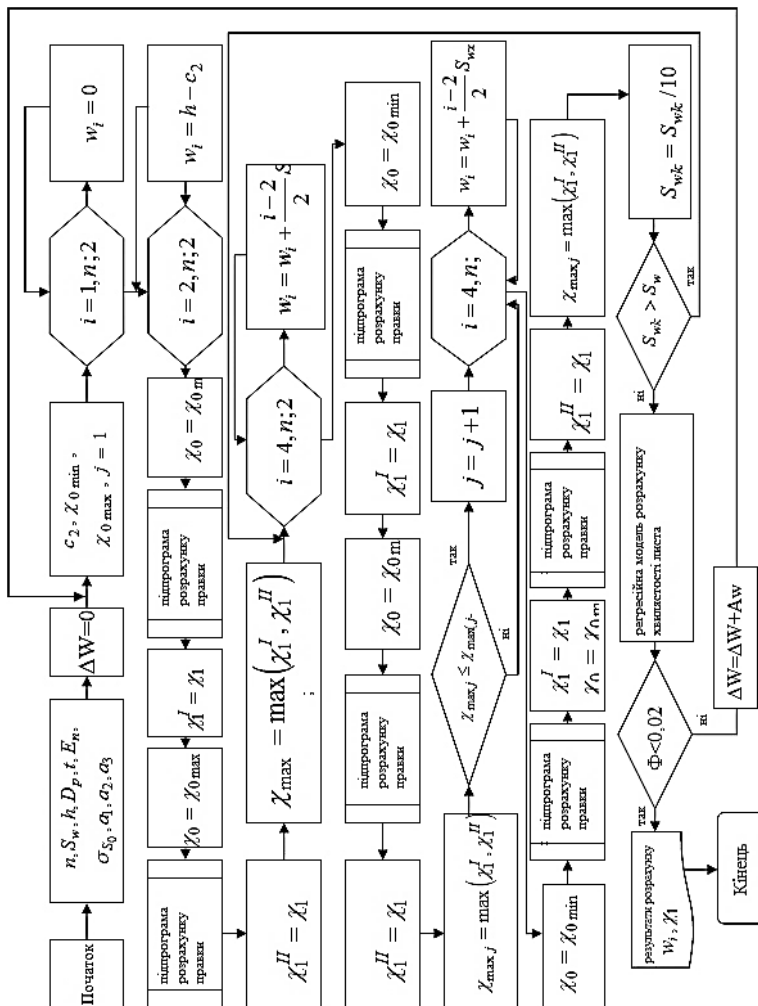


Рисунок 4.2 – Укрупнена блок-схема алгоритму автоматизованого розрахунку технологічного налаштування багатопролікової листопробильної машини

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

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

Приклади розрахункових розподілів залишкової кривизни листів для діапазону товщин від 4 мм до 16 мм наведено на рисунку 4.3 (див. с. 116–118).

Тут треба вказати, що з метою візуалізації результатів під кутом нахилу касети приймали комбінацію індивідуальних налаштувань робочих роликів. Як видно з графіків, при збільшенні кута нахилу верхньої касети залишкова кривизна зменшується до свого мінімального значення, близького до нуля, а потім

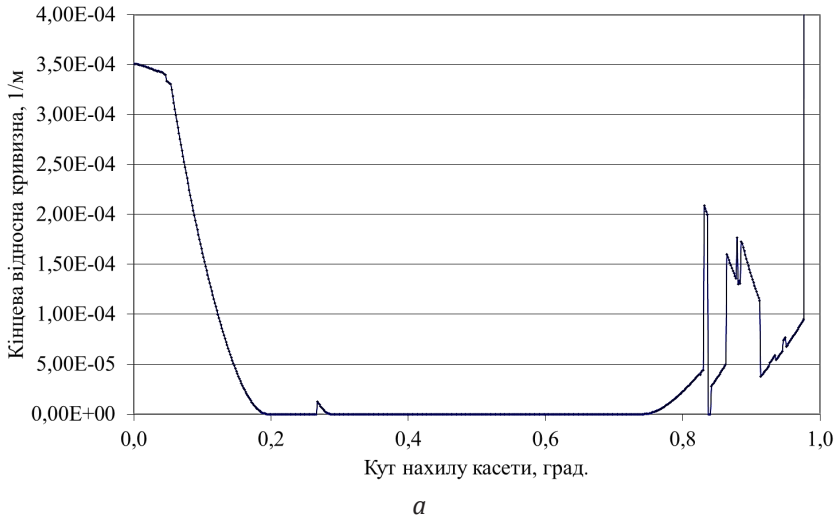
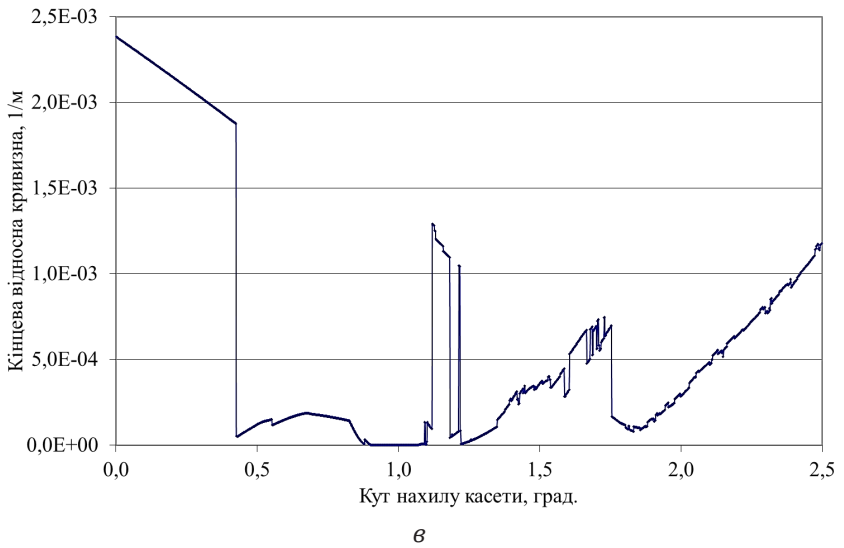
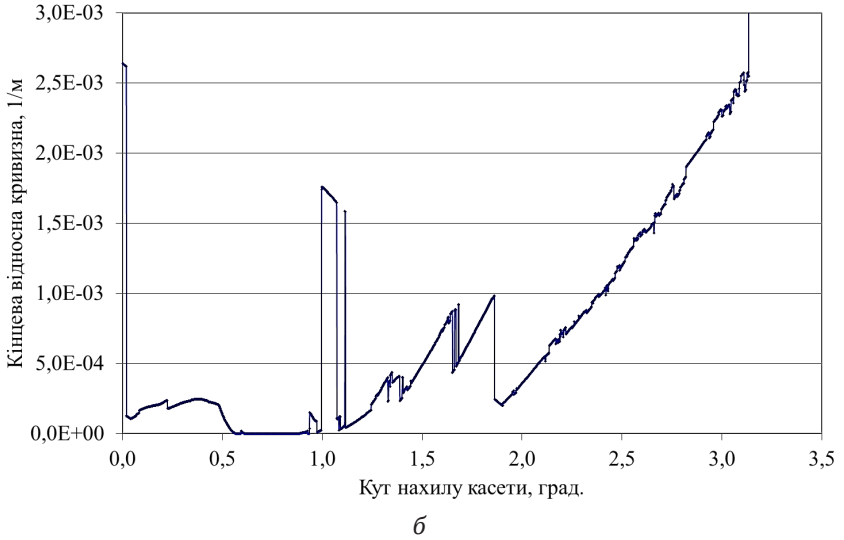
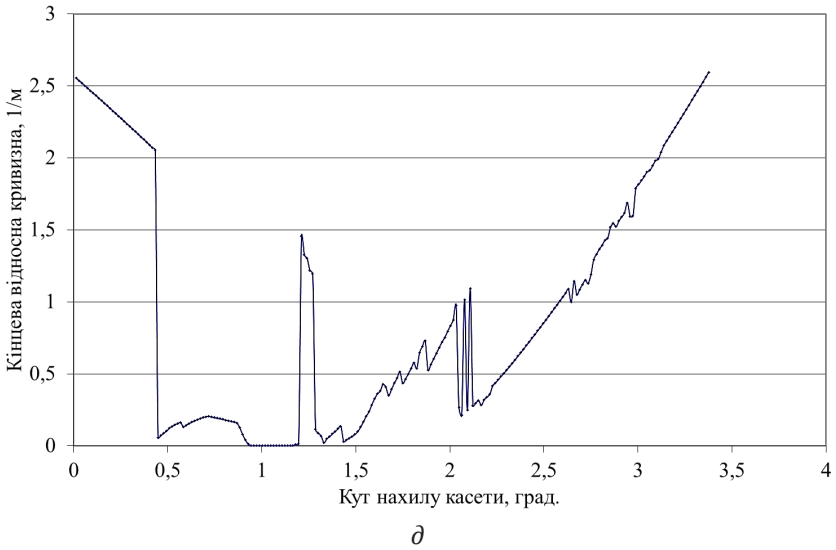
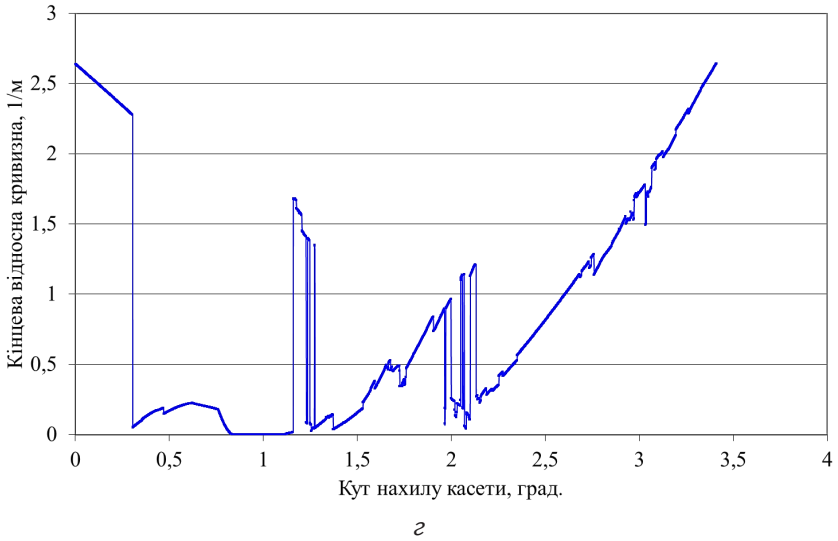


Рисунок 4.3 – Зміна кінцевої відносної кривизни при збільшенні кута нахилу верхньої касети для листів різної товщини:
а – 4 мм; б – 6 мм; в – 8 мм; г – 12 мм; д – 14 мм



Продовження рисунка 4.3, Лист 2



Закінчення рисунка 4.3, Лист 3

спостерігається її безсистемна хаотична зміна з різким збільшенням. Із представлених розподілів видно, що зі збільшенням товщини металу, що правиться, для досягнення заданої залишкової кривизни листа кут нахилу верхньої траверси збільшується.

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

На основі описаного алгоритму були виконані дослідження з проектування технологічних налаштувань для різних геометричних параметрів листа, що правиться, й аналіз отриманих налаштувань залежно від вихідних параметрів процесу. Приклади отриманих розрахункових розподілів показано на рисунках 4.4–4.5 (див. с. 119–122). З проведених розрахунків

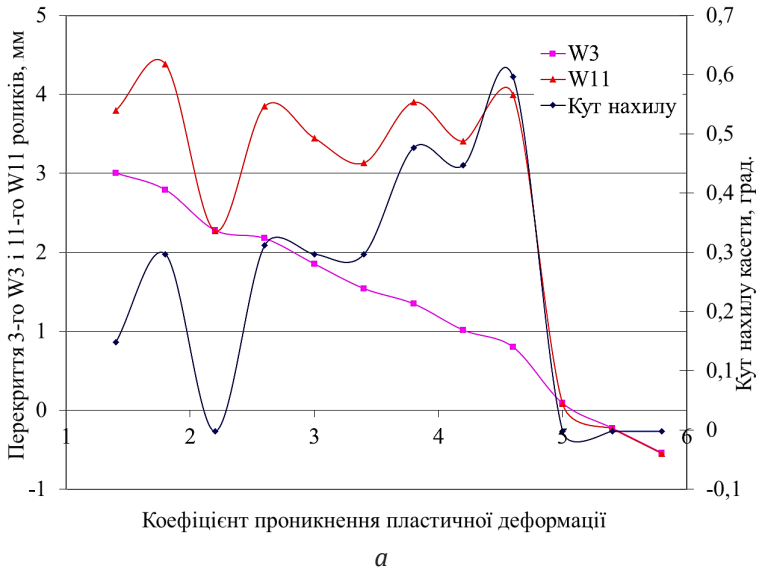
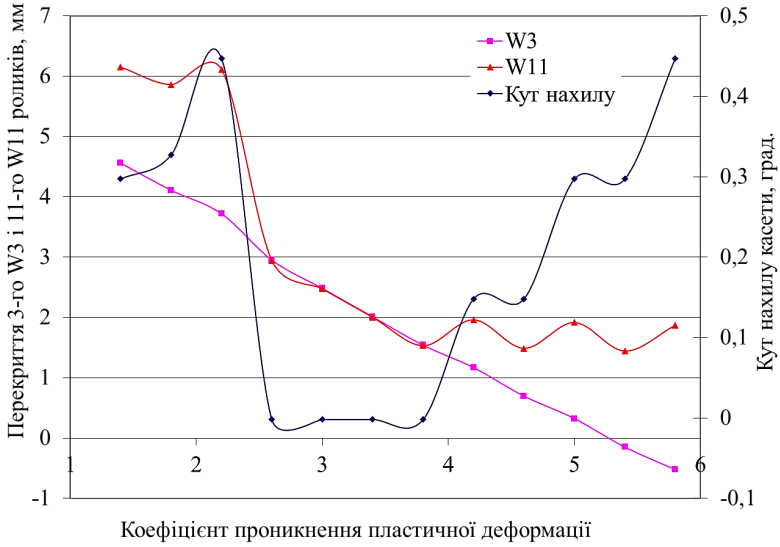
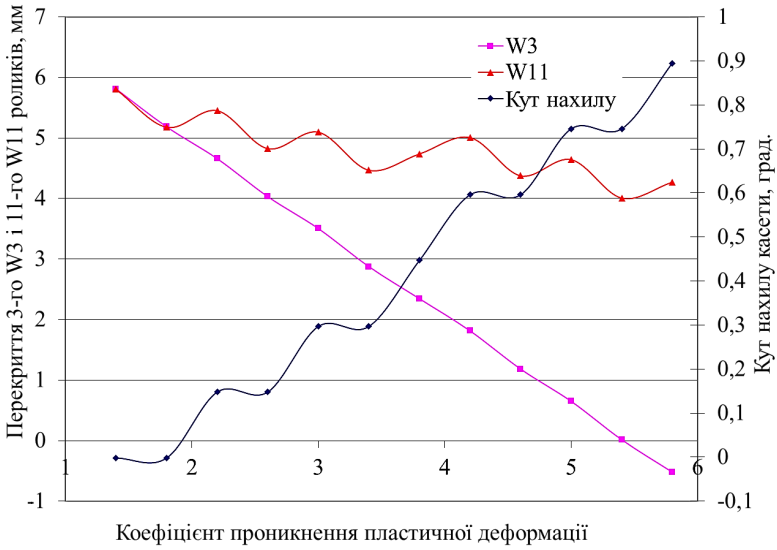


Рисунок 4.4 – Залежність кута нахилу верхньої касети, положення третього W3 і одинадцятого W11 роликів від величини коефіцієнта проникнення пластичної деформації:
a – при $h=4$ мм; *б* – при $h=6$ мм; *в* – при $h=8$ мм; *г* – при $h=10$ мм;
д – при $h=12$ мм; *е* – при $h=14$ мм

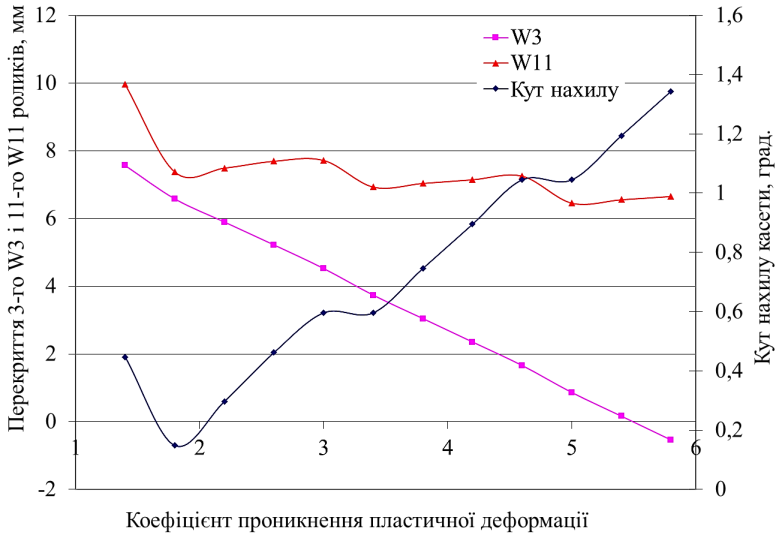


б

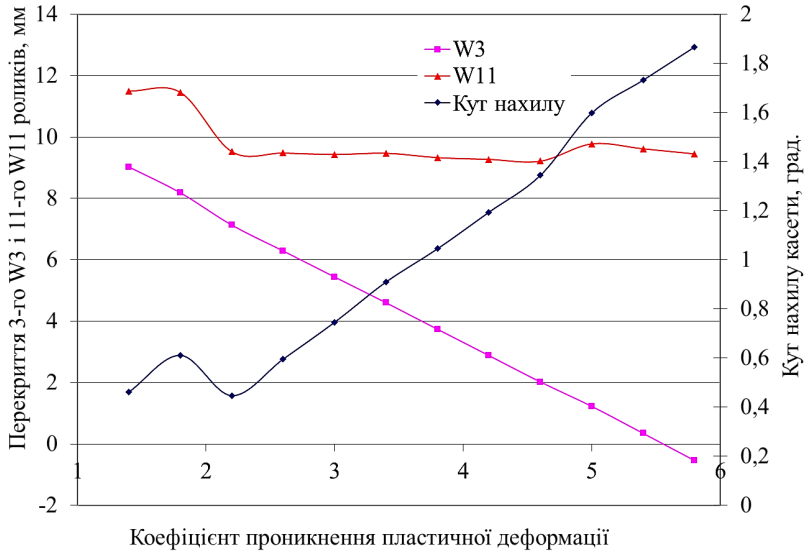


б

Продовження рисунка 4.4. Лист 2

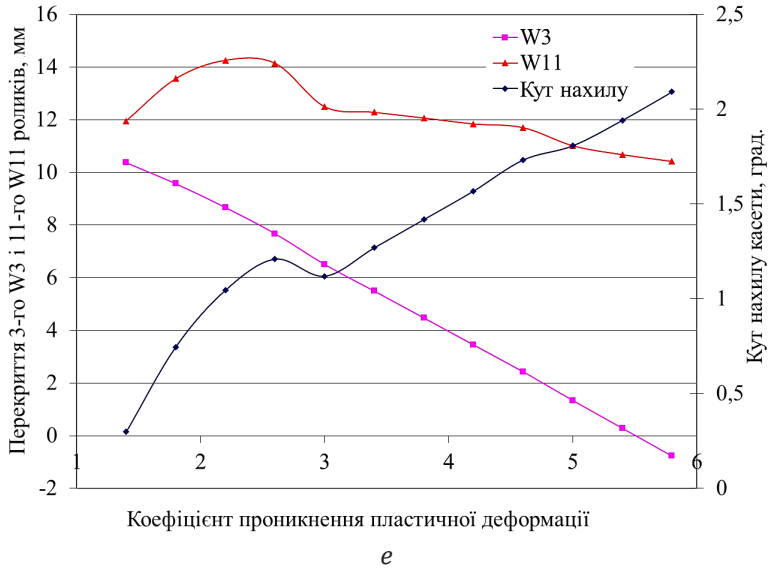


з



д

Продовження рисунка 4.4. Лист 3



Продовження рисунка 4.4. Лист 4

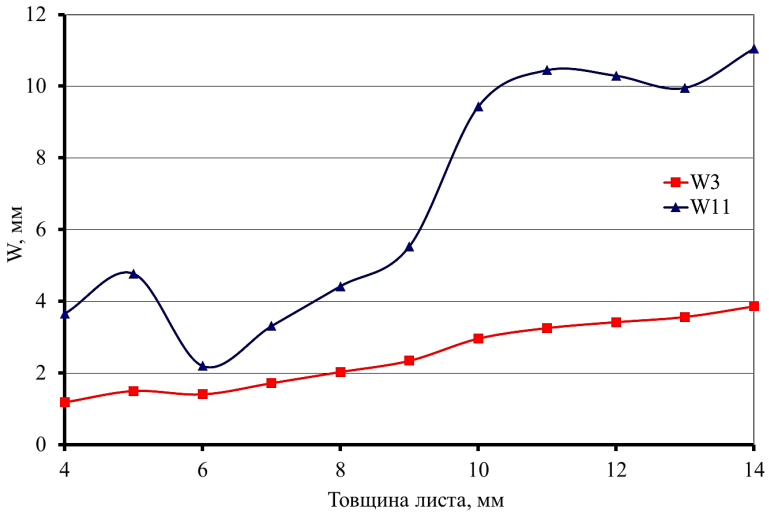


Рисунок 4.5 – Залежність положення 3-го W3 і 11-го W11 роликів від товщини прокату

для різних типорозмірів і аналізу графіка, видно, що оптимальне значення коефіцієнта проникнення пластичної деформації лежить у діапазоні 4–4,5, причому менше значення відноситься до меншої товщини прокату.

Застосування програмної реалізації описаної математичної моделі з погляду багатокритеріального пошуку екстремумів для знаходження найбільш раціональних параметрів технологічних процесів для заданих вихідних характеристик механічного устаткування та сортаменту металопркату дозволяє вибрати такий набір технологічних налаштувань, при якому, з одного боку, досягається мінімальний прогин листа й, відповідно, мінімальна величина сили та моменту правки, що є актуальним для рішення задач розширення сортаменту оброблюваного металопркату на існуючих листопривильних машинах з обмеженими технологічними можливостями, а з іншого боку, знаходження налаштувань, що забезпечують найкращу якість готової продукції на сучасних листопривильних машинах, здатних реалізувати індивідуальне налаштування првивильних роликів, включаючи врахування показників площинності листа.

Для зменшення витрат часу на виконання розрахунків можна рекомендувати в цьому випадку виконання проєктувальних розрахунків із використанням програмної реалізації розробленої одномірної математичної моделі, а після одержання результатів виконати уточнюючі розрахунки з використанням методу скінченних елементів у його програмній реалізації на основі прикладного пакета САЕ-системи, що дає змогу оцінити розподіл залишкових напружень у металі, що правиться, як по товщині, так і по ширині листа.

4.2 Автоматизоване проектування технологічних налаштувань листопрямильної машини на основі регресійної моделі процесу правки багаторазовим знакозмінним вигином

Скінченно-елементна модель, представлена в Розділі 2, має низку переваг і значно розширює можливості автоматизованого проектування технологічних налаштувань листопрямильних машин у порівнянні із чисельно-аналітичною моделлю, але займає досить багато машинного часу, що ускладнює вирішення задач оптимізаційного плану й унеможливорює застосування їх в автоматичній системі керування. Тому доцільною є розробка простої та швидкодіючої моделі, яка може бути виконана створенням регресійної моделі на основі чисельного експерименту. Для цього було виконано реалізації скінченно-елементної моделі з використанням стратегії методу планованого експерименту [171–173] з подальшою закладеною в цьому методі математичною обробкою результатів та отриманням відповідної регресійної залежності.

Розрахунки процесу правки листа являють собою дослідницьку задачу, у якій треба визначити вплив великої кількості факторів на цей процес. Ціль планування чисельного експерименту – одержання регресійного рівняння залежності площинності прокату ($P_{\text{пл}}$), сили правки ($P, \kappa H$) від основних параметрів, що впливають на процес правки листа. Для реалізації процесу моделювання необхідно вибрати значимі фактори. Ці фактори можна розділити на параметри вихідні та параметри для налаштування машини. До вихідних факторів відносяться: ширина листа (B), його товщина (h) і початкова хвилястість у поперечному напрямку, яку найзручніше виразити в математичному сенсі через різницю довжин волокон або витяжок (λ_0). На правку вихідної хвилястісті серед чинників, що відносяться до параметрів налаштування, впливають величина перекриття (W) і різниця перекриттів по ширині бочки робочого ролика (ΔW). Попередні розрахунки показали, що такий параметр матеріалу, як напруження текучості, на правку хвилястісті суттєво

не впливає. Швидкість деформування, коефіцієнт тертя постійні та не міняються. Таким способом було виділено 5 основних факторів, що впливають на правку крайової хвилястості (табл. 4.1).

У якості функції відгуку був обраний параметр λ_k , що показує кінцеву різницю витяжок по краях та посередині листа.

Таблиця 4.1 – Рівні варіювання факторів

Інтервал варіювання та рівні факторів	h	W/h	ΔW	B	λ_0
Основний рівень $x_{j0}=0$	7	0,5	5	2175	1,015
Інтервал варіювання Δx_j	3	0,5	5	675	0,015
Верхній рівень $x_j=+1$	10	1,0	10	2850	1,03
Нижній рівень $x_j=-1$	4	0	0	1500	1,0
Кодове позначення	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5

Треба відмітити, що застосування моделі повнофакторного експерименту призводить до невиправдано завищеного числа експериментів. У цьому випадку раціональніше застосовувати дробову модель. План Хартлі більш економічний, ніж ортогональний і рототабельний центральний композиційний план, та рекомендується при побудові інтерполяційних моделей квадратичного полінома для об'єктів із малим рівнем шумів [171].

Для нелінійної моделі з п'ятьма факторами доцільно застосувати план Хартлі (Hartley) $Ha5$ [171; 173]. На основі методики планованого експерименту була розроблена відповідна програма проведення реалізацій скінченно-елементної моделі в програмі DEFORM 3D [123]. Результати розрахунків були одержані у вигляді розподілів деформацій, напружень, силових характеристик процесу правки та зміни геометрії листа. Для виміру геометрії листа після правки в програмі DEFORM 3D на різних стадіях проводився експорт контурів заготовки (файл формату *.stl) для побудови 3D-моделі Solidworks. Для реалізації плану $Ha5$ необхідно було провести 27 математичних експериментів. Розширена матриця планування експерименту представлена в таблиці 4.2 (див. с. 126). Для цієї моделі рівняння регресії має такий вигляд:

$$\begin{aligned}
 y = & b_0 + b_1 \times x_1 + b_2 \times x_2 + b_3 \times x_3 + b_4 \times x_4 + b_5 \times x_5 + b_{12} \times x_1 \times x_2 + \\
 & + b_{13} \times x_1 \times x_3 + b_{14} \times x_1 \times x_4 + b_{15} \times x_1 \times x_5 + b_{23} \times x_2 \times x_3 + \\
 & + b_{24} \times x_2 \times x_4 + b_{25} \times x_2 \times x_5 + b_{34} \times x_3 \times x_4 + b_{35} \times x_3 \times x_5 + \\
 & + b_{45} \times x_4 \times x_5 + b_{11} \times x_1^2 + b_{22} \times x_2^2 + b_{33} \times x_3^2 + b_{44} \times x_4^2 + b_{55} \times x_5^2.
 \end{aligned}
 \tag{4.2}$$

Таблиця 4.2 – Розширена матриця планування експерименту

№	Код					y_{ug}
	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	
1	+1	+1	+1	+1	+1	0,995
2	-1	-1	+1	+1	+1	1,019
3	-1	+1	-1	-1	-1	1,0
4	+1	-1	-1	-1	-1	1,0
5	-1	+1	-1	+1	+1	1,026
6	+1	-1	-1	+1	+1	1,025
7	+1	+1	+1	-1	-1	0,993
8	-1	-1	+1	-1	-1	0,997
9	-1	+1	+1	+1	-1	0,989
10	+1	-1	+1	+1	-1	0,988
11	+1	+1	-1	-1	+1	1,02
12	-1	-1	-1	-1	+1	1,028
13	-1	+1	+1	-1	+1	1,016
14	+1	-1	+1	-1	+1	1,017
15	+1	+1	-1	+1	-1	1,0
16	-1	-1	-1	+1	-1	1,0
17	0	0	0	0	0	1,008
18	+1	0	0	0	0	1,0079
19	-1	0	0	0	0	1,0094
20	0	+1	0	0	0	1,0065
21	0	-1	0	0	0	1,01
22	0	0	+1	0	0	1,0016
23	0	0	-1	0	0	1,012
24	0	0	0	+1	0	1,0066
25	0	0	0	-1	0	1,0096
26	0	0	0	0	+1	1,02
27	0	0	0	0	-1	0,997

Вплив обраних параметрів носить нелінійний характер, тому в результаті планування експерименту необхідно одержати квадратичну модель.

Перехід від умовних параметрів до натуральних проводиться за такими залежностями:

$$x_1 = \frac{h-7}{3}; \quad x_2 = \frac{W/h-0,5}{0,5}; \quad x_3 = \frac{\Delta W-5}{5};$$

$$x_4 = \frac{B-2175}{675}; \quad x_5 = \frac{\lambda_0-1,015}{0,015}.$$

У результаті реалізації скінченно-елементної моделі та обробки розрахункових даних одержані коефіцієнти регресії рівняння (4.2). Коефіцієнти регресії визначалися по наступних формулах [171]:

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

$$b_{i,i} = O_3 \times \sum_{k=1}^N \left\{ \left[(x_{k,i})^2 - \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N (x_{k,i})^2 \right] \times y_k \right\}; \quad (4.3)$$

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

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

Визначення коефіцієнтів регресійного рівняння здійснювали по розробленій у середовищі РТС Mathcad математичній моделі.

У таблиці 4.3 (див. с. 128) наведені коефіцієнти для рівняння регресії, що описує залежність параметра λ_k від факторів варіювання.

Як показав аналіз коефіцієнтів регресії рівняння (4.2), на зниження кінцевої різниці витяжок (правки крайової хвилястості) переважно впливає різниця перекриттів. Товщина листа та відносне перекриття на правку листа впливають рівною вагомою мірою. Зокрема, аналіз вагомості коефіцієнтів показав, що вплив коефіцієнтів b_{45} , b_{11} , b_{55} незначний і ними можна знехтувати (рис. 4.6, див. с. 129). За отриманою регресійною моделлю

побудовані графіки залежності різниці витяжок краю та середини листа ($\lambda_k = L_k / L_c$) від геометричних параметрів вихідної заготовки та параметрів процесу правки (рис. 4.7, див. с. 130).

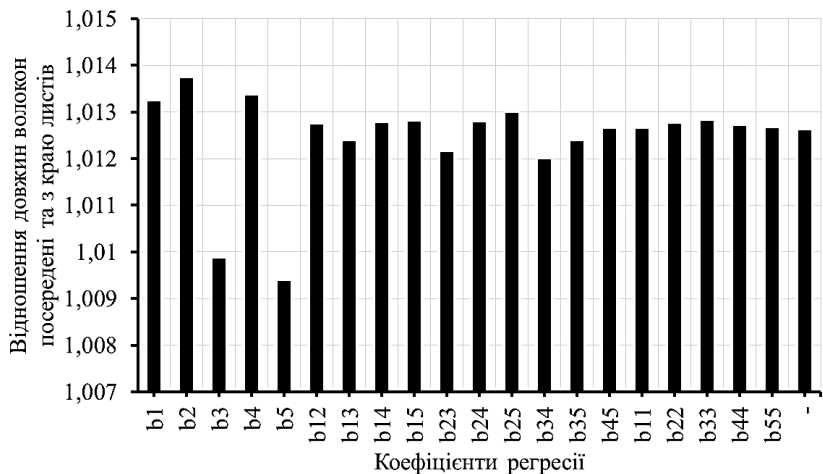
Таблиця 4.3 – Коефіцієнти регресійного рівняння

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

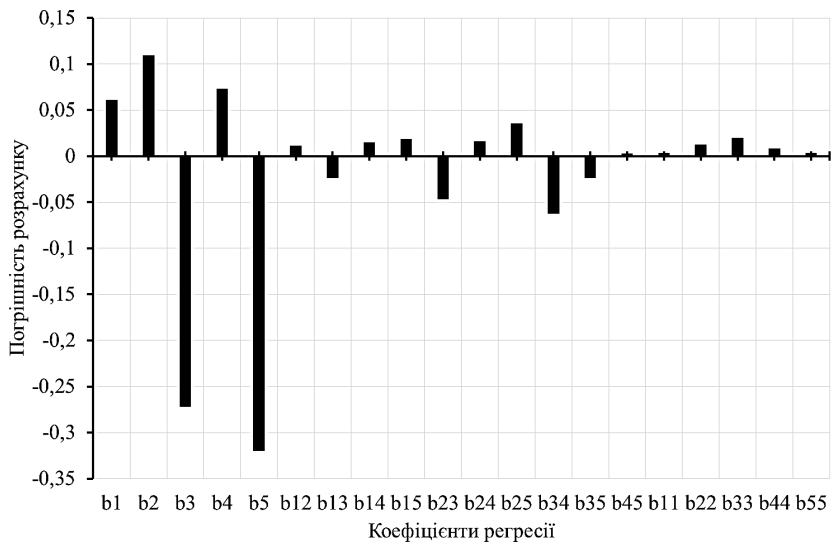
Далі було проведено аналіз результатів розрахунків за одержаним регресійним рівнянням із метою оцінки впливу різних факторів на якість правки листів. Встановлено, що істотно впливає на правку листа різниця прогинів ролика, яким здійснюється безпосередньо правка. Зі збільшенням різниці перекриття ΔW , перекриття W , товщини листа h і його ширини b , кінцева різниця довжин волокон посередині та крайкам листа зменшується практично лінійно.

Встановлено, що в процесі правки листа шириною 2800 мм, товщиною 4 мм, з вихідною різницею витяжок $\lambda_0 = 1,015$ зі збільшенням прогину ролика ΔW від 0 до 8 мм, різниця витяжок зменшується з 1,014 до 1,008 при перекритті $W = 0$ мм і з 1,013 до 1,003 при $W = 4$ мм. Також встановлено, що зі збільшенням прогину ролика інтенсивність правки зі збільшенням перекриття також зростає. Так, наприклад, у процесі правки роликом з $\Delta W = 0$ мм при збільшенні перекриття різниця витяжок зміниться не суттєво (з 1,014 до 1,013), а у випадку $\Delta W = 8$ мм λ_k зменшується від 1,008 до 1,003.

Вихідна різниця витяжок також впливає на правку листа. Зі збільшенням вихідної різниці витяжок зростає і різниця витяжок після правки при тих самих умовах процесу. Так якщо правити лист шириною 2800 мм, товщиною 4 мм, роликом з $\Delta W = 8$ мм і $\lambda_0 = 1,015$, то при перекритті $W = 0$ мм різниця



a



б

Рисунок 4.6 – Результати визначення вагомості коефіцієнтів регресії в абсолютних (а) та відносних (б) значеннях

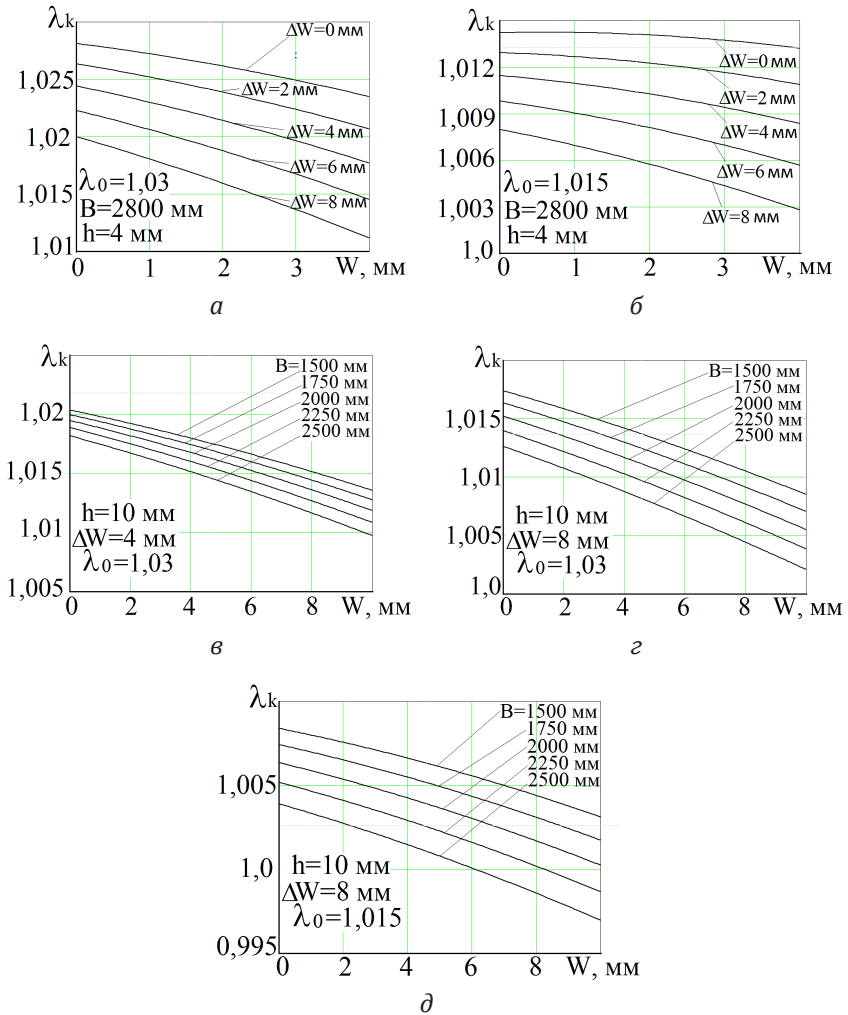


Рисунок 4.7 – Графіки залежності різниці витяжок посередині та краю листа від параметрів правки та параметрів вихідної заготовки: величини згину робочого ролика (а, б); ширини листа (в–д) при різних товщинах листа і вихідній хвилястості в поперечному напрямку

витяжок буде рівною 1,008. Якщо ж $\lambda_0=1,03$, то за тих самих умов кінцева різниця витяжок буде рівною 1,02.

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

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

На рисунках 4.8–4.12 (див. с. 132–136) наведені поля розподілів осьових компонентів деформацій, середніх напружень і інтенсивності напружень по поверхні заготовки в процесі правки листів при різних параметрах процесу.

З рисунку 4.8 (див. с. 132) видно, що при виправленні листа товщиною 10 мм величина деформації більше, ніж у листі товщиною 4 мм. Це пояснюється більшим ходом ролика в процесі правки.

Аналіз поля розподілу деформацій дозволяє зробити висновок про те, що волокна металу, розташовані в середній частині листа, деформуються інтенсивніше, ніж волокна металу по краю листа. Це видно по градієнту розподілу деформацій у середній частині листа та по краю. Інтенсивність напружень, що виникають у заготовці, також вище при виправленні більш товстого листа.

Результати, приведені на рисунку 4.9 (див. с. 133), дозволяють зробити висновок, що відносне перекриття роликів значно впливає на напружено-деформований стан заготовки. Отже, при $W/h=1$ більш інтенсивно розтягуються волокна середньої частини листа, ніж при $W/h=0$, про що свідчать значні величини деформацій у заготовці.

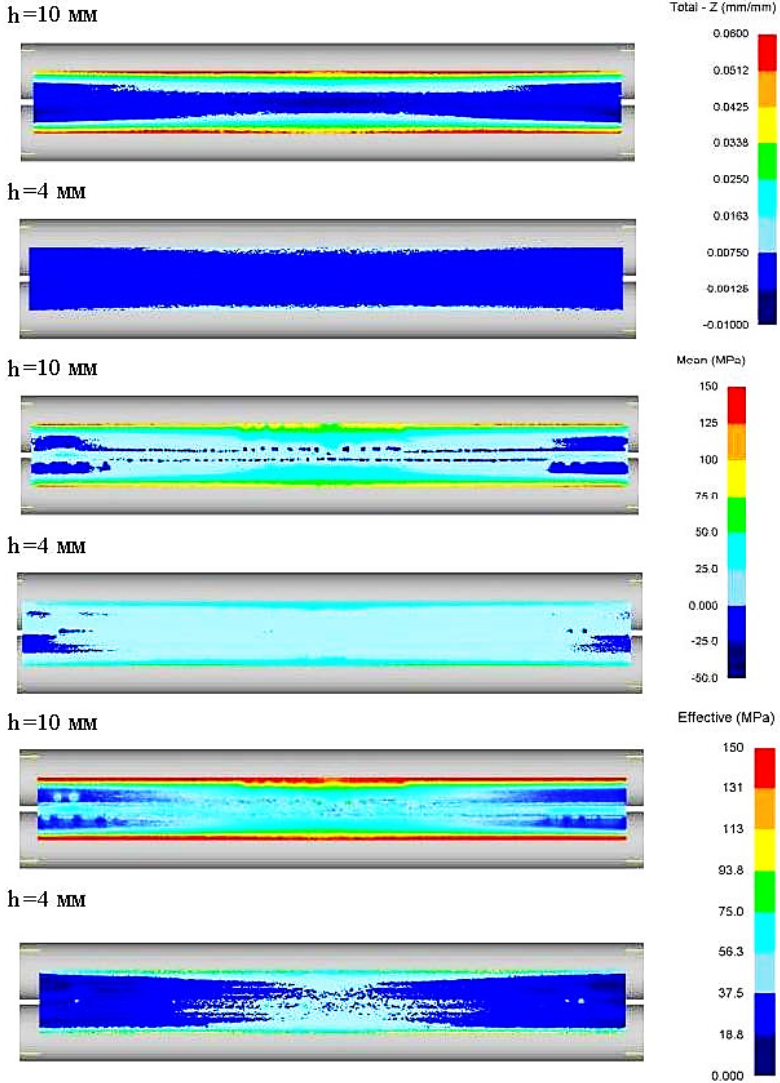


Рисунок 4.8 – Поля розподілу компонентів деформацій, середніх напружень та інтенсивності напружень на поверхні заготовки в процесі правки ($W/h=0,5$, $\Delta W=5$ мм, $B=2175$ мм, $\lambda_0=1,015$), вид зверху

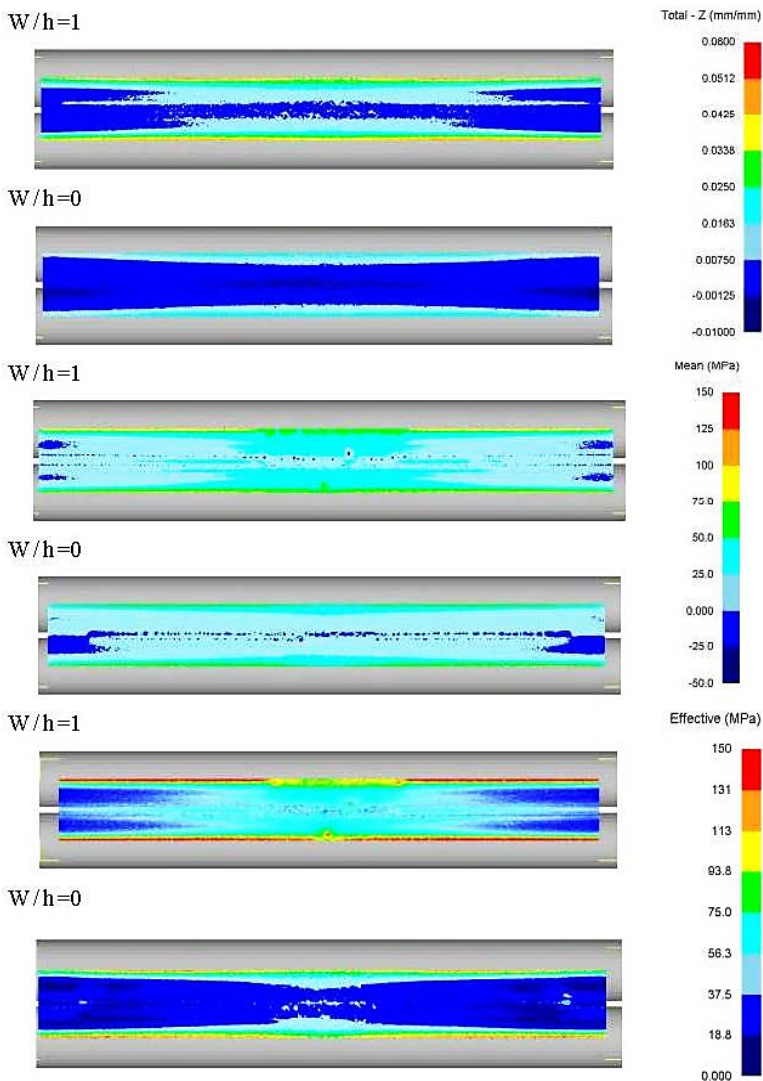


Рисунок 4.9 – Поля розподілу компонентів деформацій, середніх напружень та інтенсивності напружень на поверхні заготовки в процесі правки ($h=7$ мм, $\Delta W=5$ мм, $B=2175$ мм, $\lambda_0=1,015$), вид зверху

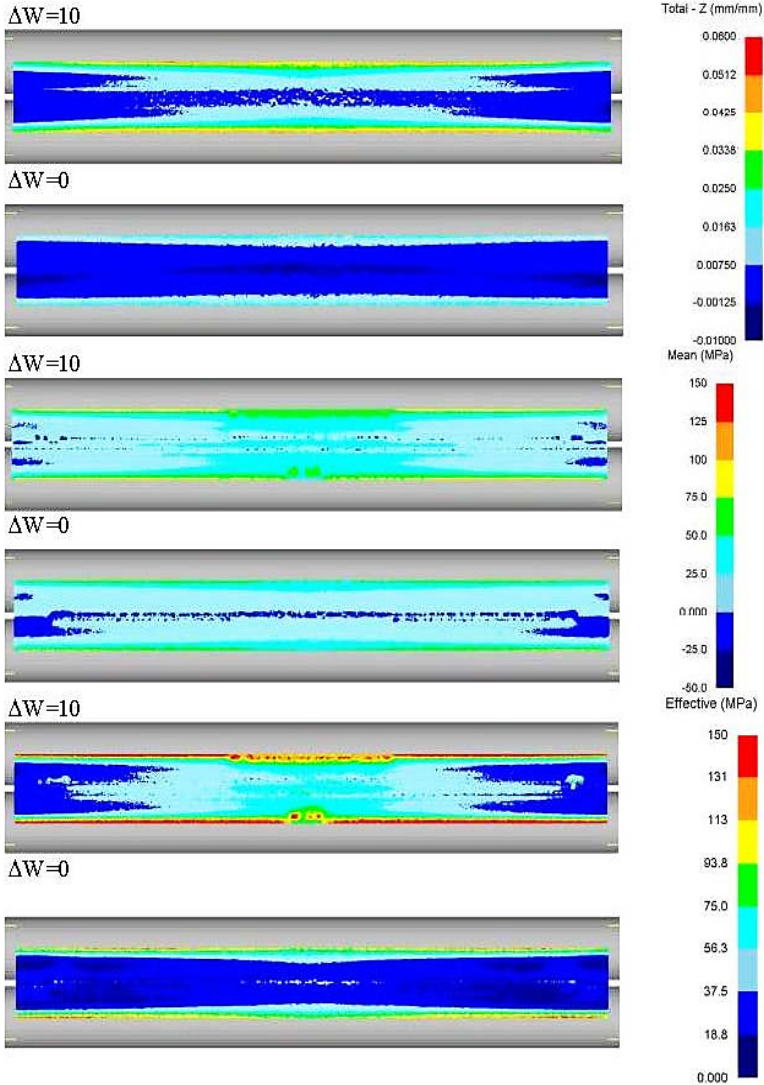


Рисунок 4.10 – Поля розподілу компонентів деформацій, середніх напружень та інтенсивності напружень на поверхні заготовки в процесі правки ($h=7$ мм, $W/h=0,5$, $B=2175$ мм, $\lambda_0=1,015$), вид зверху

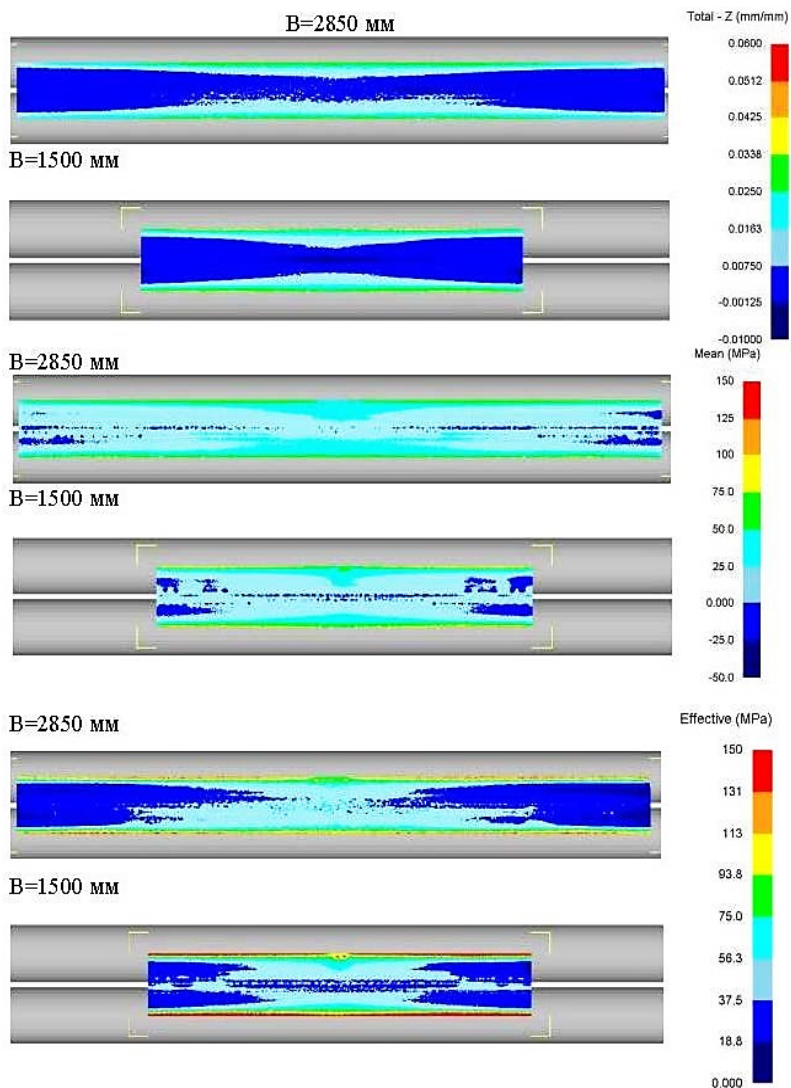


Рисунок 4.11 – Поля розподілу компонентів деформацій, середніх напружень та інтенсивності напружень на поверхні заготовки в процесі правки ($h=7$ мм, $W/h=0,5$, $\Delta W=5$ мм, $\lambda_0=1,015$), вид зверху

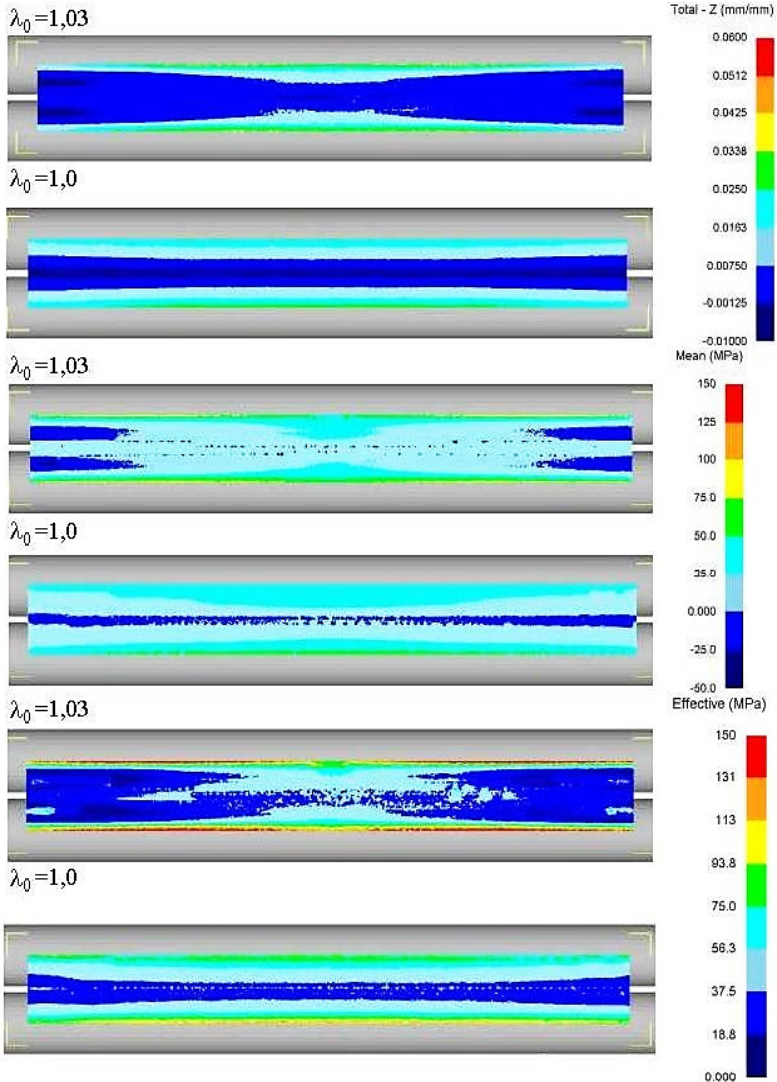


Рисунок 4.12 – Поля розподілу компонентів деформацій, середніх напружень та інтенсивності напружень на поверхні заготовки в процесі правки ($h=7$ мм, $W/h=0,5$, $\Delta W=5$ мм, $B=2175$ мм), вид зверху

На рисунку 4.10 (див. с. 134) показано, що зі збільшенням різниці перекриттів картина розподілу деформацій у заготовці істотно змінюється, більш інтенсивно починають деформуватися волокна середньої частини листа. До такого ж ефекту призводить і збільшення ширини листа (рис. 4.11, див. с. 135).

На рисунках 4.13 та 4.14 (див. с. 138) представлені результати розрахунку площинності стосовно процесу правки листів товщиною від 4 до 14 мм при фіксованому перекритті роликів на величину 3,5 мм, тобто при різних відношеннях W/h (від 0,875 до 0,214), та однаковою амплітудою вихідної хвилястості, рівною $A=60$ мм/м. З аналізу даних залежностей можна зробити висновок, що зменшення хвилястості листа можна досягти як збільшенням перекриттів роликів, так і величиною їх згину. Водночас розрахунки показують, що при цій хвилястості одно-разовим вигином роликів досягти необхідну хвилястість крайок ($A < 8$ мм/м) не є можливим. Найбільш значущим фактором

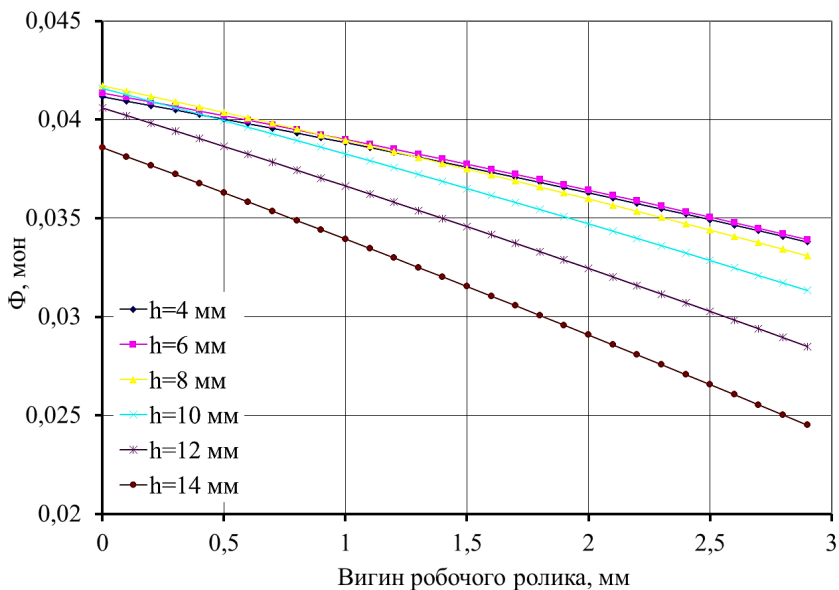


Рисунок 4.13 – Залежність показника площинності листа від вигину робочих роликів

при цьому є зменшення параметра W/h до рівня 0,25, який досягається, як правило, третім роликот та обмежується нормованим коефіцієнтом проникнення пластичної деформації. При цьому, як показують розрахунки, необхідного рівня площинності ($\Phi=0,1-1,0$ мон) можна досягти вигином робочих роликів до величини 1,5–2,0 мм.

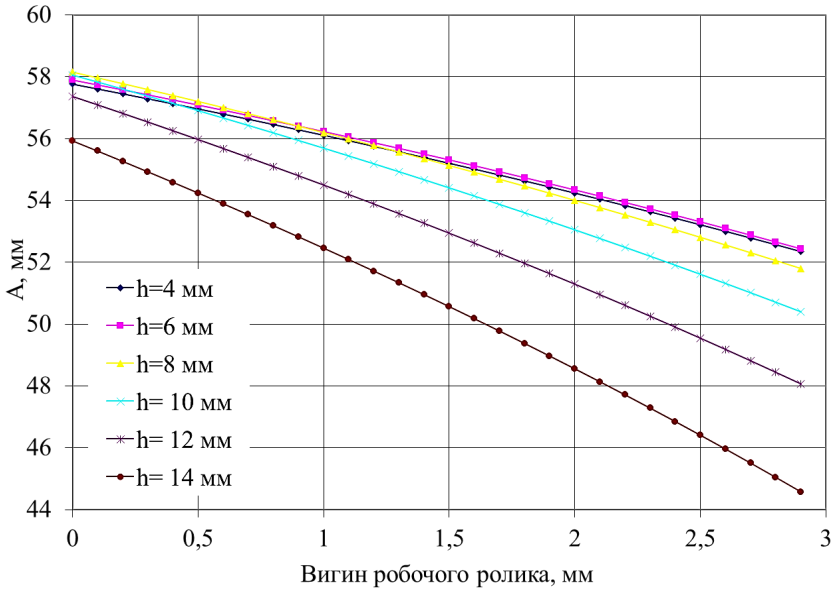


Рисунок 4.14 – Залежність амплітуди крайової хвилястості листа від вигину робочих роликів

4.3 Автоматизоване проєктування налаштування вигинів робочих роликів

Відмінною особливістю листопрямильної машини з диференційованим додатком сили правки по ширині листа є усунення нерівномірної по ширині хвилястості прокату, що досягається шляхом вигину робочих роликів силами правки на величину, яка визначається положенням опорних роликів. Визначення цих

положень і є задачею автоматизованого проектування технологічних налаштувань машини при правці [174].

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

1 – знаходження налаштування робочих роликів, які забезпечують виправлення поздовжньої кривизни прокату (див. підрозд. 4.1);

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

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

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

5 – визначення на основі регресійних залежностей (див. підрозд. 4.2) показників площинності прокату;

6 – порівняння показників площинності прокату з необхідними.

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

Цей алгоритм був покладений в основу програмних засобів з автоматизованого розрахунку технологічних налаштувань правильної машини, розглянутих у підрозділі 4.1. Зокрема, на рисунку 4.15 (див. с. 140) представлено інтерфейс підпрограми для розрахунку показника форми та амплітуди хвилястості листа.

Як приклад реалізації розроблених програмних засобів на рисунках 4.16–4.18 (див. с. 140–142) представлені розрахункові розподіли показників форми листа по роликах правильної машини залежно від положення та вигину робочих роликів.

На рисунку 4.16 (див. с. 140) представлені розподіли при налаштуваннях та вигинах роликів на рівні максимально можливих,

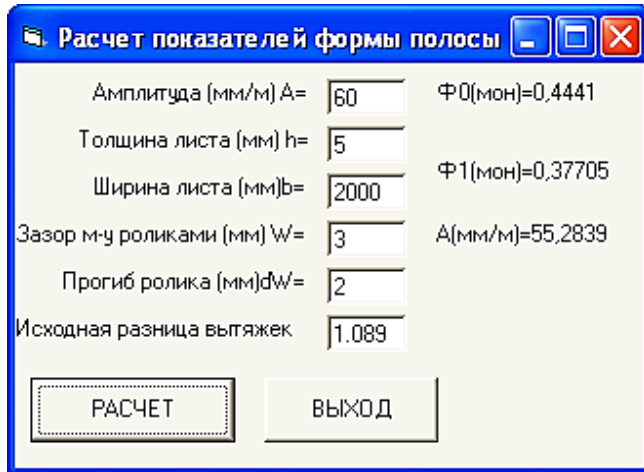


Рисунок 4.15 – Інтерфейс програми для розрахунку показника форми та амплітуди хвилястості листа

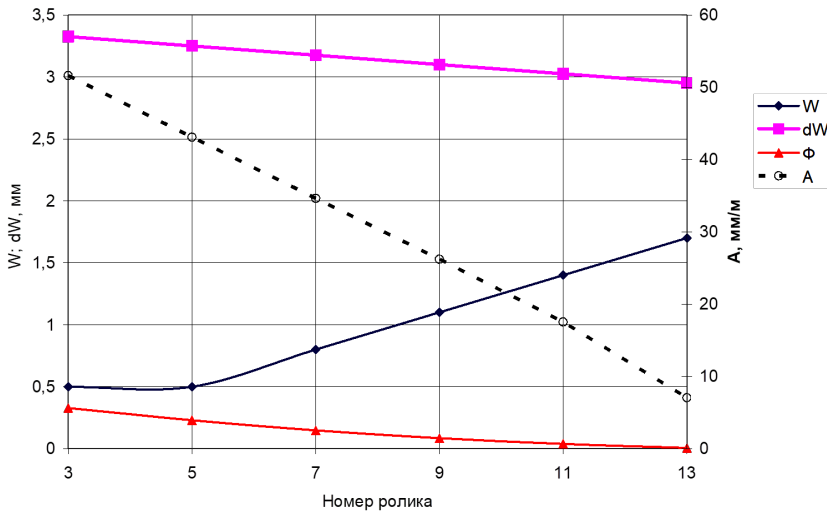


Рисунок 4.16 – Розподіл показника форми листа Φ , амплітуди хвилястості A залежно від положення W та вигину ΔW робочих роликів при максимально можливих налаштуваннях ($h=5$ мм, $b=2000$ мм)

при цьому рівень підсумкової площинності та амплітуди хвилястості задовольнив вимогам за якістю листів.

На рисунку 4.17 представлені розподіли при вигинах роликів на одному рівні, що визначаються умовою міцності роликів (3 мм), при цьому рівень підсумкової площинності задовольнив вимогам за якістю листів, а рівень амплітуд хвилястості був завищений.

На рисунку 4.18 (див. с. 142) представлені розподіли при вигинах роликів на одному рівні, що визначаються умовою забезпечення контакту роликів відповідно мінімальній силі правки ($\Delta W=1,5$ мм), при цьому підсумкова площинність задовольнила вимогам за якістю листів ($\Phi < 1$ мон), а рівень амплітуд хвилястості був неприпустимо завищений.

Аналіз залежностей показників площинності від положення та величини вигину робочих роликів дозволяє зробити висновок щодо їх нелінійного характеру й робить необхідним вирішення задач оптимізаційного плану по знаходженню як положення роликів у вертикальній площині, що буде визначати силові

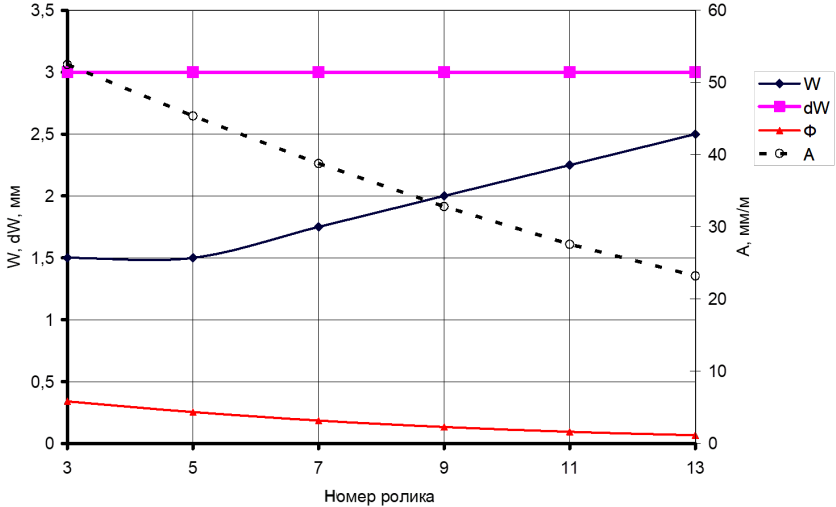


Рисунок 4.17 – Розподіл показника форми листа Φ , амплітуди хвилястості A залежно від положення W при $\Delta W=3$ мм ($h=5$ мм, $b=2000$ мм)

характеристики процесу, так і їх вигину, що визначить величину хвилястості листів по ширині.

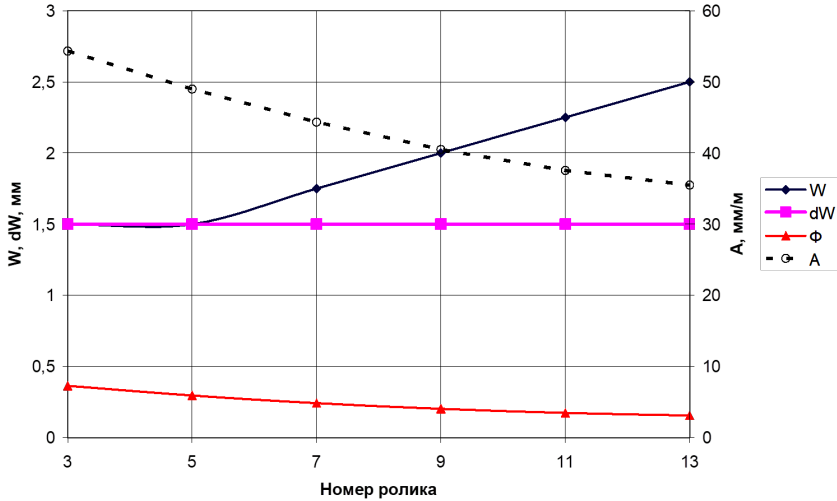


Рисунок 4.18 – Розподіл показника форми листа Φ , амплітуди хвилястості A залежно від положення W при $\Delta W=1,5$ мм ($h=5$ мм, $b=2000$ мм)

4.4 Автоматизоване проєктування технологічних режимів та удосконалення конструктивних параметрів обладнання на прикладі багатороликової листопрямильної машини товстолистового стану 2850

Представлені в цій роботі результати були використані при проєктуванні механічного обладнання та автоматизованої системи керування листопрямильної машини правки гарячекатаних листів конструкції Новокраматорського машинобудівного заводу для товстолистового стану 2850. Конструкція цієї листопрямильної машини (ЛПМ), у порівнянні з аналогом – розглянутою раніше (див. підрозд. 1.2) ЛПМ стану 2300/1700 (рис. 1.13, а, б), представлена на рисунку 4.19 (див. с. 143).

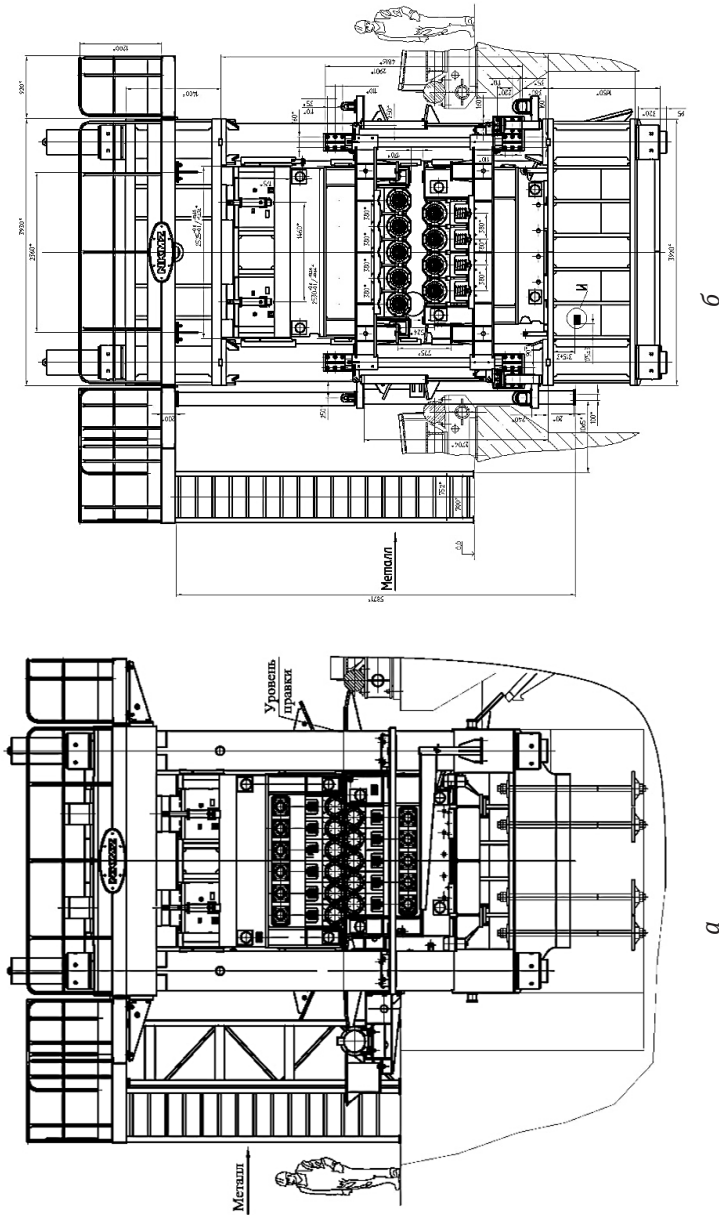


Рисунок 4.19 – Конструктивні схеми

багатопробильних листопробильних машин стану 2300/1700 (а) і товстолистового стану 2850 (б)

Для забезпечення високої якості гарячекатаних листів, що піддаються правці вигином, розроблений алгоритм автоматизованого проектування технологічного налаштування роликів листопривильної машини був реалізований у якості програмного продукту на мові програмування Visual Basic v.6.0 та інтегрований у систему автоматизованого управління листопривильної машини.

Відповідно до свого основного технологічного призначення, товстолистовий стан 2850 випускає товсті листи товщиною від 6 до 120 мм із вуглецевих, низьколегованих та легованих марок сталей. Аналіз енергосилових параметрів процесу правки гарячекатаних листів необхідного сортаменту, виконаний на основі результатів чисельної реалізації отриманих математичних моделей (див. підрозд. 2.2 та 2.3) показав, що найбільша сила правки становить 25 МН, а максимальна сумарна потужність правки не перевищує 700 кВт. Виходячи з цих вихідних передумов і було здійснено проектування механічного, гідравлічного та електричного обладнання листопривильної машини цього стану.

Машина має 9 робочих правильних роликів діаметром 360 мм, розташованих із кроком 380 мм. Залежно від товщини листів, що піддаються правці, може бути реалізовано 2 схеми налаштувань, а саме, 9-роликівна схема – для правки листів товщиною до 25 мм і 5-роликівна – для правки листів товщиною понад 25 мм. Завдяки наявності механізму горизонтального зсуву нижньої касети в напрямку проходження металу, а також наявності механізмів індивідуального налаштування вертикальних положень правильних роликів, створена можливість мобільного переналагодження машини з 9-роликівної схеми правки на 5-роликівну, що дозволяє збільшити радіус вигину листів і тим самим розширити діапазон товщини металопрокату, що виправляється на машині, а також створити ефективні технологічні параметри вигину, що, у свою чергу, підвищує якість одержуваної готової металопродукції.

На основі розробленої чисельної одновимірної математичної моделі (див. підрозд. 2.2) був проведений аналіз можливих режимів правки листів із матеріалів із різними характеристиками міцності.

Отримані силові параметри процесу правки за допомогою аналізу твердотільних моделей у САЕ-системі SolidWorks Simulation дозволили визначити найбільш навантажені елементи конструкції при різних поєднаннях вихідних параметрів. У подальшому за допомогою програмного пакета Abaqus CAE (див. підрозд. 2.3) результати проектування були уточнені з урахуванням вибору основних конструктивних параметрів обладнання, матеріалів деталей заготовок, коефіцієнтів запасів міцності та інших заявлених вимог.

Багатороликівна листопривильна машина розглянутої конструкції (рис. 4.19, б) розташована в лінії товстолистового стану 2850 за установкою охолодження розкатів. Загальні види цієї машини представлені на рисунку 4.20 (див. с. 146), а її технічна характеристика представлена в таблиці 4.4.

Таблиця 4.4 – Технічна характеристика багатороликівної листопривильної машини товстолистового стану 2850

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

Конструкція листопривальної машини включає в себе: вузол станин, комплект касет, груповий привід зі шпindelним пристроєм, пристрій зміни касет, системи майданчиків обслуговування, системи гідравліки, змащення та електрообладнання.

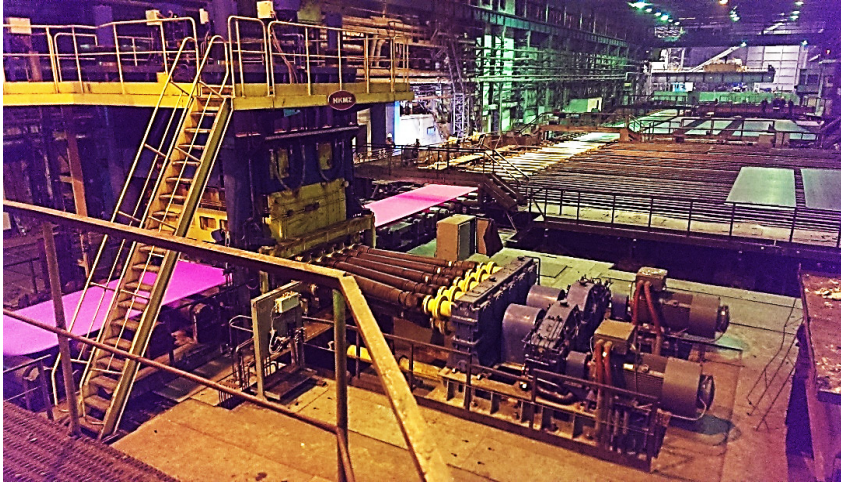


Рисунок 4.20 – Загальні види багатороликової листопривальної машини товстолистового стану 2850

Цілісність і жорсткість конструкції забезпечують 4 вузли колон, що містять ковані шпильки. При цьому кожна зі шпильок була затягнута із силою 10 МН. Вибір величини сили затяжки здійснювався на підставі результатів розрахунку вузла станин методом скінчених елементів у середовищі SolidWorks Simulation під дією максимальних сил правки, обчислених із використанням чисельної одновимірної математичної моделі процесу правки гарячекатаних листів (див. підрозд. 2.2).

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

Верхня рухома траверса, спільно з касетою верхньою, має привід вертикального переміщення від чотирьох позиційно керованих гідроциліндрів. Схема позиціонування гідроциліндрів натискного пристрою та роликів верхньої касети показана на рисунку 4.21. Проектування гідравлічних циліндрів натискного пристрою та всієї системи гідрокерування здійснювалося також на основі даних розрахунків процесу правки з використанням розроблених математичних моделей (див. розд. 2) [158; 169; 170; 175–178].

При цьому до уваги бралися не тільки надійність і довговічність обладнання, але і його здатність до забезпечення необхідної швидкодії.

Це було продиктовано необхідністю забезпечення необхідної продуктивності стану, яка становить більш 2 млн т гарячекатаного листового металопрокату на рік.

Розрахункова схема листопривильної машини, при попередньому затягуванні шпильок силою $P_{\text{зат}}=10$ МН і навантаженні робочою силою $P_{\text{роб}}=P_{\text{max}}/4=25/4=6,25$ МН, а також результати рішення поставленої задачі у вигляді полів напружень і деформацій вузла станин, отримані з використанням методу скінчених

елементів у його програмній реалізації на основі прикладного пакета SolidWorks Simulation [179–183], представлені на рисунках 4.22–4.25 (див. с. 149–152).

При цьому, зважаючи на симетрію, розглядалася тільки четверта частина конструкції.

З використанням розглянутих розрахункових результатів, отриманих у рамках цього дослідження, був зроблений вибір основних конструктивних параметрів вузла станин (рис. 4.22) ЛПМ стану 2850, що забезпечує, у порівнянні з конструкцією-аналогом, більш високий ступінь рівномірності розподілів показників напруженого стану при збереженні жорсткості вузла станин і одночасному зниженні його металоємності на 30 %.

Аналогічний комплекс розрахунків був виконаний і для верхньої поперечини багатороликової ЛПМ цієї конструкції. У цьому випадку при збереженні жорсткості, зниження металоємності склало до 40 % у порівнянні з конструкцією-аналогом. До цього призвела заміна конструкції з кованої

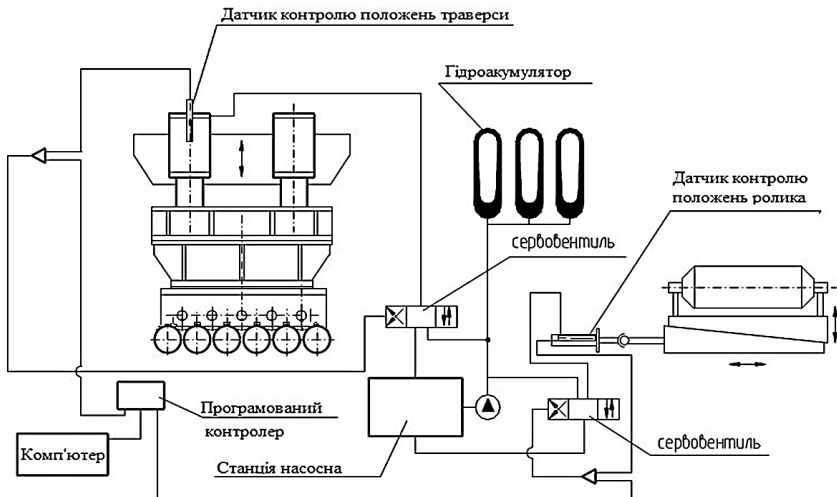


Рисунок 4.21 – Схема гідравлічних пристроїв для позиціонування траверси з верхньою касетою з робочими роликами ЛПМ товстолистового стану 2850

на зварену з товстих листів. Конструкція була опрацьована на предмет виключення концентраторів напружень, раціонального розташувань елементів жорсткості, а також застосування

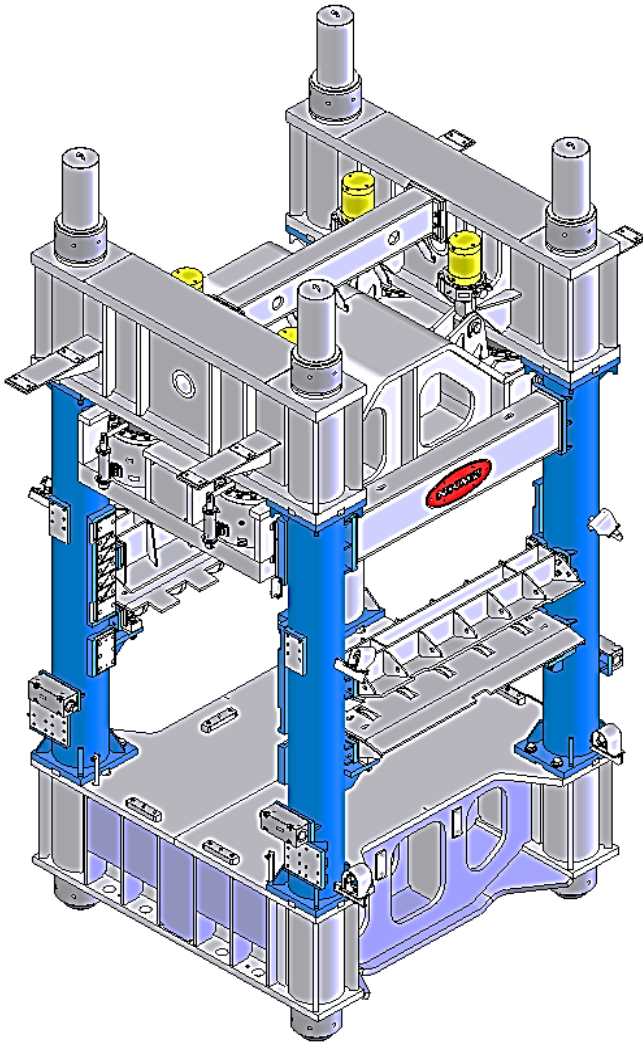


Рисунок 4.22 – Вузол станин ЛПМ стану 2850

матеріалів із відповідними механічними властивостями, зокрема, межею плинності та міцності.

Економія в грошовому вираженні при зміні зазначених конструктивних елементів склала 5460 тис. грн за рівнем цін на кінець 2013 р.

Верхня і нижня касети ЛПМ являють собою зварні металоконструкції. Усередині кожної з касет встановлено 6 клинових

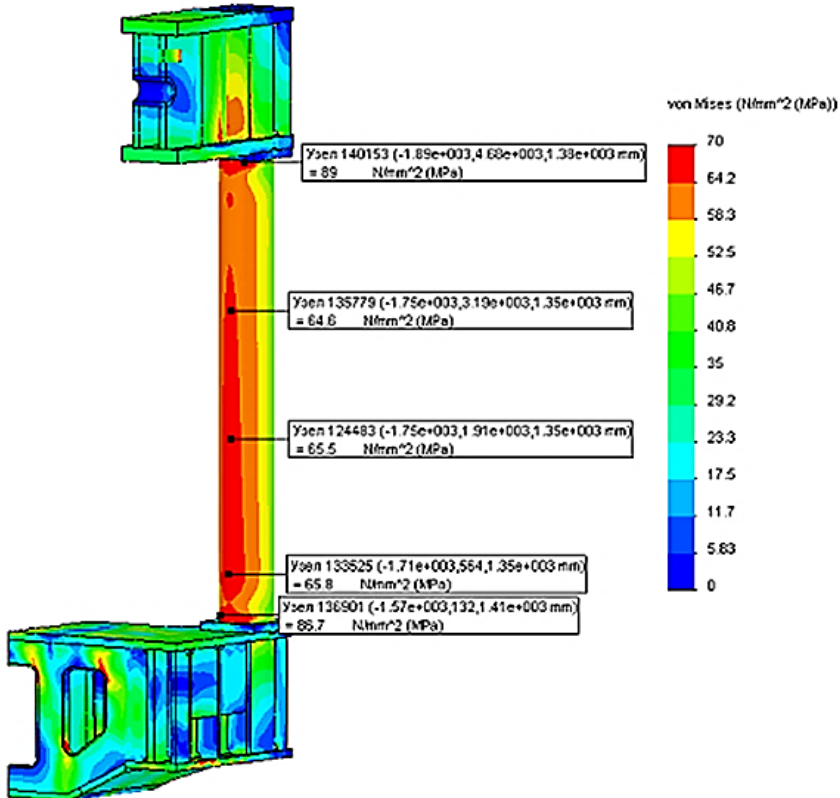


Рисунок 4.23 – Розподіл напружень у конструкції станини ЛПМ стану 2850 при попередньому затягуванні шпильок силою

$$P_{\text{зат}} = 10 \text{ МН і навантаженні робочою силою}$$

$$P_{\text{роб}} = P_{\text{max}} / 4 = 25 / 4 = 6,25 \text{ МН (у силу симетрії розглянута четверта частина конструкції)}$$

механізмів налаштування робочих роликів (рис. 4.26, див. с. 153), що представляють собою клинові пари, верхні клини яких здійснюють поздовжнє переміщення від штоків гідроциліндрів налаштування, корпуси яких закріплені на рамі касети. Положення штоків гідроциліндрів контролюються датчиками лінійного переміщення, конструкційно зблокованими з гідроциліндрами.

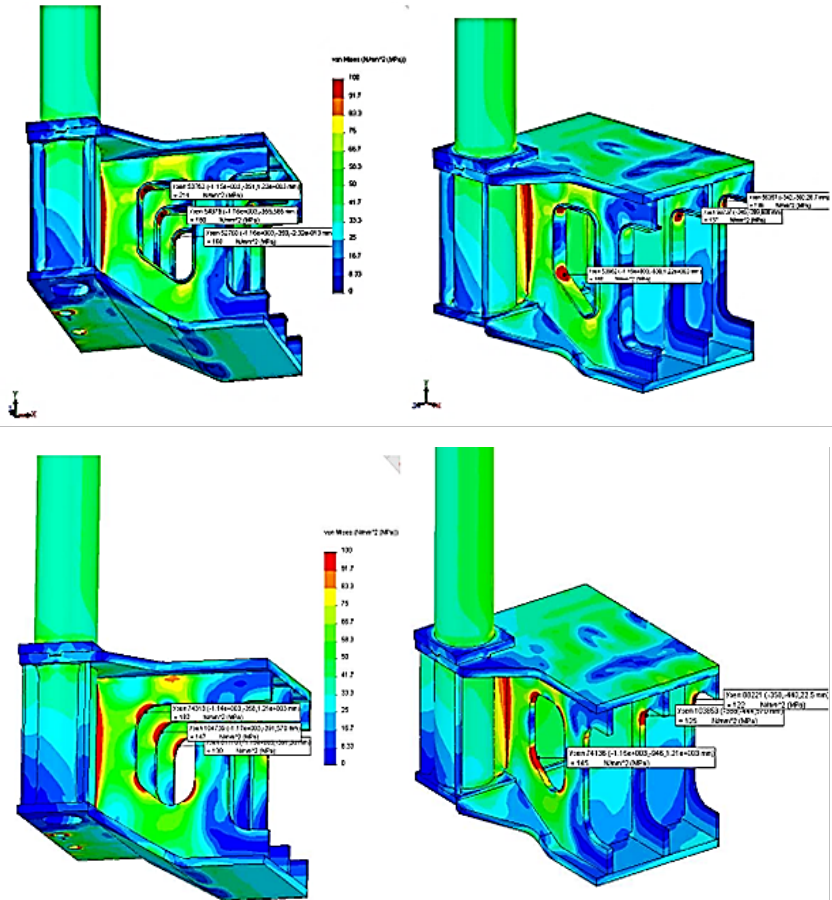


Рисунок 4.24 – Розрахункові розподіли основних показників напружено-деформованого стану конструкції ЛПМ

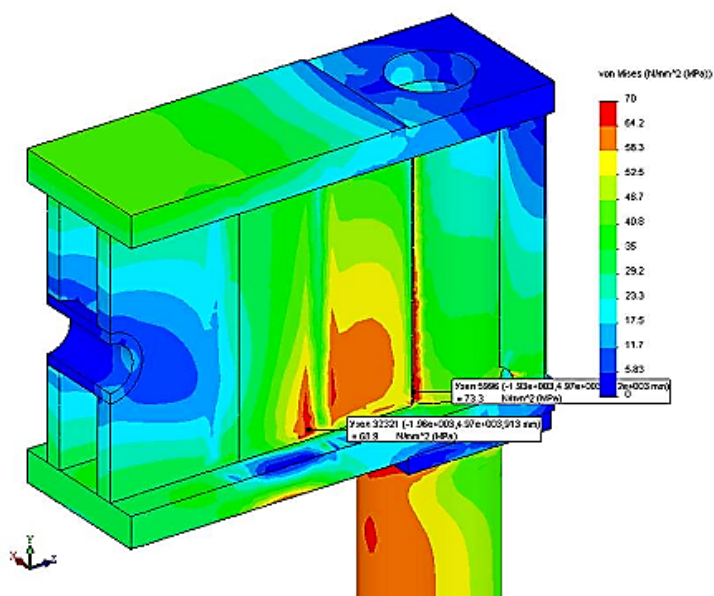
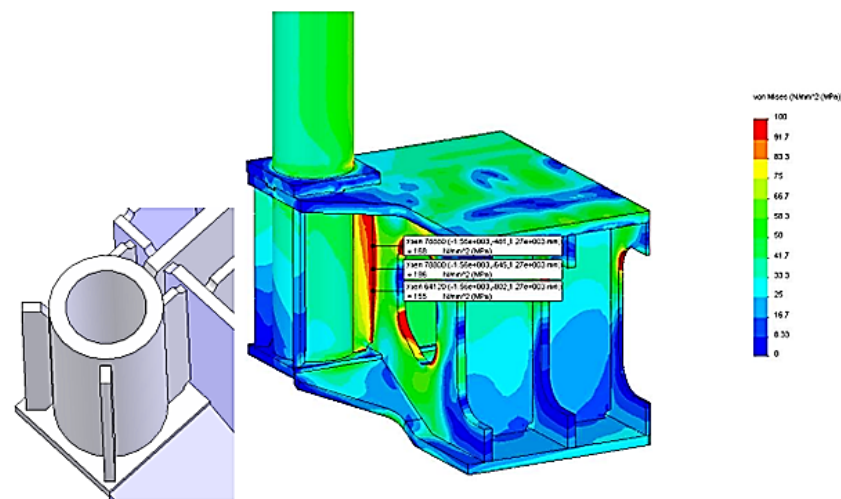


Рисунок 4.25 – Розрахункові розподіли рівнів еквівалентних напружень у конструкції ЛПМ

Нижні клини пар здійснюють вертикальне переміщення під дією верхніх клинів і пружин врівноваження.

На клинових механізмах розміщені опорні та робочі ролики. Опорні ролики діаметром 370 мм і шириною 140 мм розташовані в шаховому порядку в 2 ряди на відстані між рядами 120 мм.

Таке розташування опорних роликів дозволяє забезпечити необхідну жорсткість робочого ролика як у напрямку дії сили правки, так і в напрямку руху оброблюваних листів. Робочі ролики діаметром 360 мм спираються на 14 розташованих у шаховому порядку опорних роликів, при цьому крутний момент до робочого ролику передається від муфти шпindelного пристрою за допомогою евольвентного шліцьового з'єднання на хвостовику ролику. У подушках робочих роликів встановлені дворядні конічні роликотідишпники. Привід обертання правильних роликів здійснюється від двох трифазних

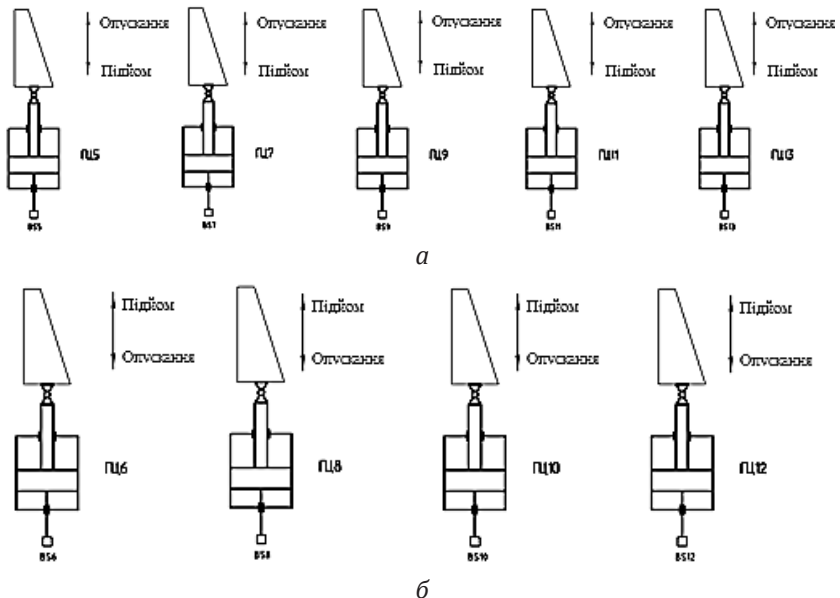


Рисунок 4.26 – Принципові схеми клинових механізмів налаштування робочих роликів верхньої (а) і нижньої (б) касети ЛПМ

електродвигунів асинхронного типу потужністю по 350 кВт кожен через циліндричні редуктори та шестеренну кліть.

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

Для отримання більш точної картини розподілення напружень і переміщень верхньої траверси був виконаний їх розрахунок. Розрахункова модель, схема накладення обмежень і навантажень, а також результати розрахунку поставленої задачі – поле напружень і поле деформацій верхньої траверси – представлені на рисунках 4.27 та 4.28 (див. с. 155).

Розрахункова модель вузла робочого й опорних роликів, схема розбиття моделі на сітку скінченних елементів і накладення обмежень, а також результати розрахунку поставленої задачі – поле напружень, показані на рисунках 4.29, 4.30 (див. с. 156).

Перший і останній, дев'ятий, робочі ролики, як показали результати виконаних розрахунків, є найменш навантаженими, внаслідок чого було прийняте рішення використати не 14, а 8 опорних роликів. Цей захід призвів також до зниження

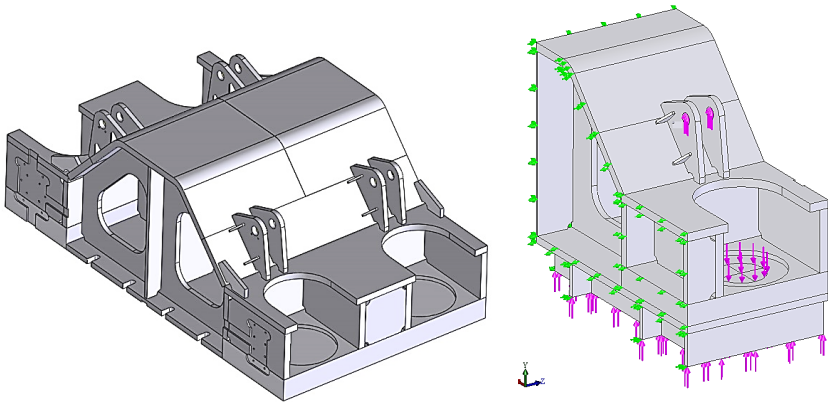


Рисунок 4.27 – Конструкція та схема накладення обмежень і навантажень верхньої траверси багатороликової ЛПМ стану 2850

фінансових витрат на експлуатацію ЛПМ внаслідок зменшення кількості імпортованих покупних підшипників високої вартості.

На основі аналізу результатів розробленої системи автоматизованого проектування технологічних налаштувань листопривильної машини (див. підрозд. 4.1) була розроблена загальна концепція системи управління ЛПМ стану 2850, яка виглядає так: за допомогою різних систем прокатного стану збираються вихідні дані про метал, що оброблюється: фактична товщина прокату із чистової кліти надходить від системи управління прокатного стану; фактична температура металу вимірюється за допомогою безконтактного пірометра, який встановлений безпосередньо на виході установки охолодження розкатів; інформація про сортамент металу і його механічні властивості залежно від фактичної температури, ступеня та швидкості деформації при прокатці в чистовій робочій кліті визначається системою «верхнього рівня», що відповідає за моделювання процесу прокатки в кліті стану; по протоколу зв'язку отримані дані передаються в систему керування багатороликовою листопривильною машиною, яка по алгоритмах, розглянутих у рамках підрозділів 2.2, 2.3 і 4.1, виконує проектувальний розрахунок

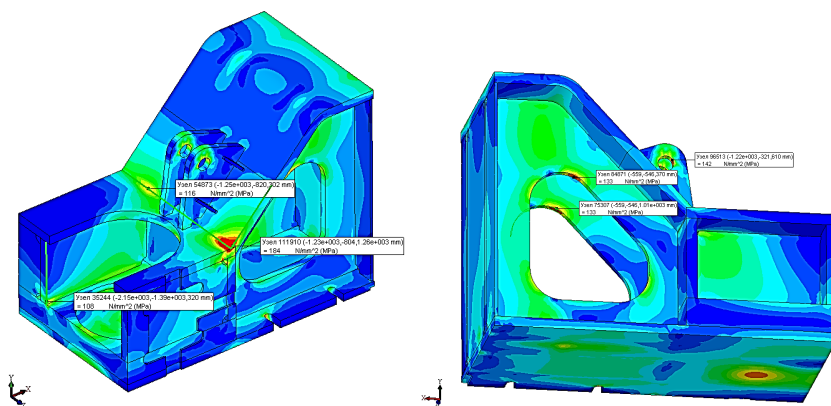


Рисунок 4.28 – Розрахункові розподілення напруженого (а) і пружно-деформованого (б) станів верхньої траверси багатороликової ЛПМ стану 2850

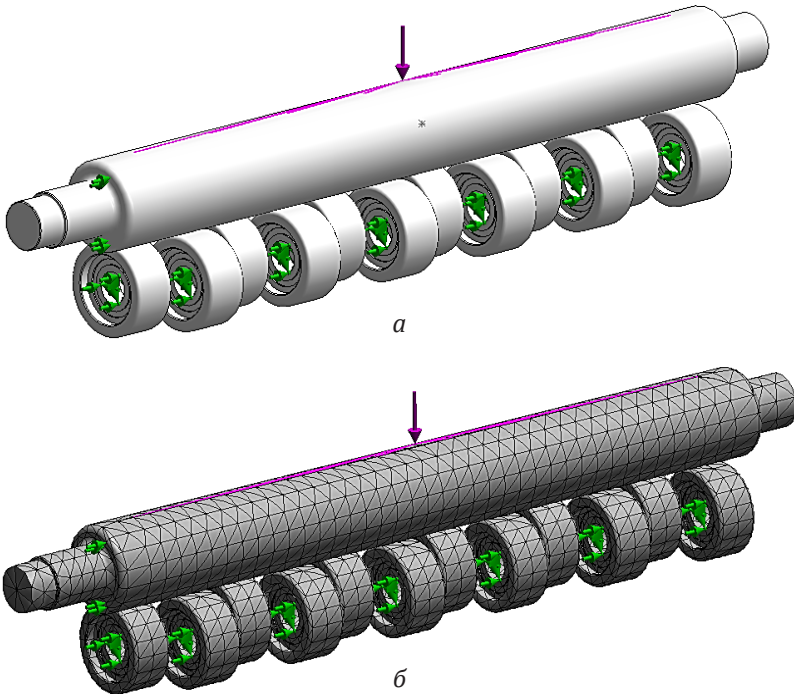


Рисунок 4.29 – Розрахункова модель (а) і схема розбиття на сітку скінченних елементів (б) вузла робочих і опорних роликів ЛПМ стану 2850

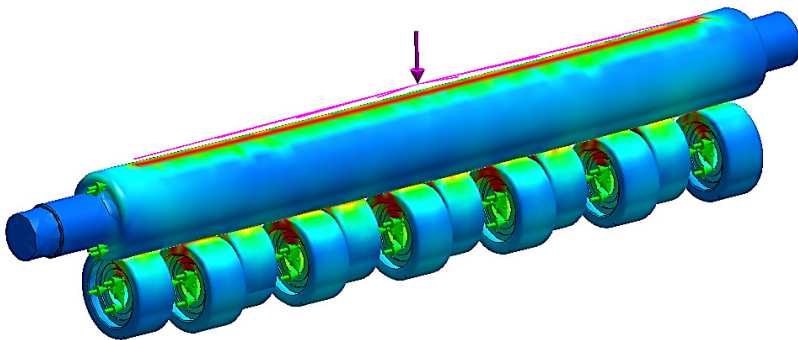


Рисунок 4.30 – Розрахункові розподіли ізополей напружень у вузлі робочих і опорних роликів ЛПМ стану 2850

перекриттів робочих роликів; отримані розрахункові технологічні налаштування відпрацьовуються процесорно керованими гідравлічними приводами переміщення траверси й роликів, після закінчення налаштування дається дозвіл на подачу листа.

У вихідному положенні верхня касета піднята в крайнє верхнє положення, робочі ролики опущені на 10 мм від крайнього нижнього положення. Налаштування ЛПМ складається з двох операцій: налаштування машини на товщину листа; налаштування роликів верхньої касети.

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

Налаштування може здійснюватися в трьох режимах: автоматичному, напівавтоматичному та в ручному. В автоматичному режимі отримання даних про лист, що піддається правці (товщина, марка сталі та температура листа на підході до ЛПМ) надходить від системи верхнього рівня (АСУ ТП агрегату). У напівавтоматичному режимі ці ж дані вводяться оператором із пульта керування. За цими даними програмна модель системи керування проводить розрахунок прогинів металу та здійснюється налаштування робочих роликів відповідно до результатів автоматизованого проектування.

У ручному режимі оператор із пульта керування задає координати положення кожного ролика індивідуально. Після цього виконується установка роликів відповідно до введених координат. Крім цього, для випробування після монтажу й ремонту, передбачається можливість переміщення кожного механізму ЛПМ при його ручному включенні з одночасним відображенням поточної координати на екрані.

Після налаштування ЛПМ переходить у режим правки металу. Режим правки включає правку листів на швидкості від 0,2 до 2,5 м/с.

Під час правки відбувається підтримка заданого зазору між касетами за сигналами датчиків за допомогою натискного пристрою і швидкості переміщення штоків гідроциліндрів близько 0,5 мм/с. Крім того, оператор має можливість вручну ввести зміни за швидкістю обох приводних груп валків і за зазором касет.

Представлений у рамках цього підрозділу аналіз технічних рішень, поряд із результатами математичного моделювання процесу правки відносно товстих листів (див. підрозд. 2.2 і 2.3), були використані в якості вихідних даних на проектування, а також при розробці практичних рекомендацій з удосконалення технологічних режимів роботи та конструктивних параметрів

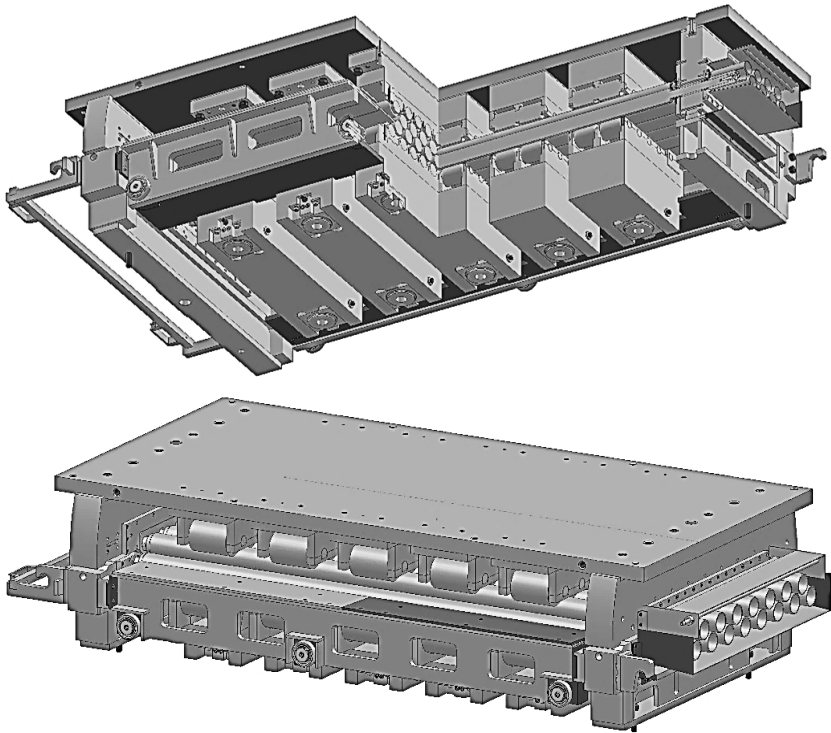


Рисунок 4.31 – Комплект касет багатороликової ЛПМ агрегату поперечного різання конструкції НКМЗ

обладнання багатороликової листопривильної машини товстолистового стану 2850 конструкції Новокраматорського машинобудівного заводу. У рамках роботи було розроблено конструкцію комплекту касет для багатороликової ЛПМ агрегату поперечного різання конструкції НКМЗ. На рисунку 4.31 (див. с. 158) представлено тривимірну модель нового комплекту касет.

У новій конструкції з'явилася можливість здійснювати вигин робочих роликів нижньої касети завдяки розташуванню блоків з опорними роликами на парах клинів, один із яких є приводним і переміщується вздовж напрямку переміщення металу, а інший, безпосередньо контактуючий із блоком опорних роликів, вздовж вертикальної площини.

Завдяки розрахованому вертикальному переміщенню кожного з 5 блоків опорних роликів вони встановлюються, утворюючи необхідну, залежно від заданої початкової кривизни, опорну поверхню для робочих роликів.

Таке рішення дозволило знизити кількість відбракованої продукції за показником площинності та підвищити надійність роботи агрегату загалом завдяки зниженню рівня коробуватості металу, що раніше також впливало й на прохідність полоси через машини агрегату. Вибір основних конструктивних параметрів нового комплекту касет здійснювався з використанням виконаних результатів досліджень [158; 169; 170; 175–178; 184–187].

ВИСНОВКИ

1. Підвищення якості та зниження собівартості листового металопрокату робить актуальним удосконалення діючих і створення нових вискоєфективних технологій і обладнання для правки листів на основі розвитку методів автоматизованого розрахунку та проєктування, підвищення ступеня наукової обґрунтованості технічних рішень, що приймаються, а також на основі розробки, дослідження і впровадження конкретних практичних рекомендацій. Розвиток теоретичних методів розрахунку правки на багатороликових листопрямильних машинах заснований на уточненні моделей шляхом більш точного опису фізичних явищ, умов і геометрії процесу. Розвиток технологій процесу правки листів заснований на розширенні видів дефектів листів, що виправляються, зокрема, усунення крім поздовжньої кривизни ще й поперечної, що можливо в сучасних конструкціях листопрямильних машин за допомогою контрольованого вигину робочих роликів. Зараз цей напрям вивчено недостатньо, що й обумовило актуальність проведення дослідження процесу правки гарячекатаних листів.

2. На основі теоретичного аналізу процесів правки на багатороликових правильних машинах із диференційованим додатком сил правки по ширині листа встановлено шляхом аналітичного, скінченно-елементного та регресійного моделювання, що вигин робочого ролика впливає на виправлення поперечної кривизни листа, зокрема, для забезпечення нормованого стандартами якості по хвилястості листів, достатньо в більшості випадків вигину одного ролика, причому для листів товщиною 8–12 мм при ширині 1000–2000 мм – величина необхідного для правки крайової хвилястості вигину роликів не перевищує 2 мм.

3. У результаті експериментальних досліджень підтверджено можливість правки крайової хвилястості профільованими роликами, а також можливість отримання нормованої кривизни при одному профільованому ролику. Експериментальні дослідження показали достатню збіжність із теоретичними результатами за залишковою кривизною, відносна похибка теоретичних і експериментальних результатів складає 16 %, водночас для

енергосилових параметрів похибка перевищує 20 % з більш високими чисельними значеннями теоретичних результатів.

4. На основі отриманих чисельних математичних моделей розроблені алгоритми і вирішені програмно задачі з автоматизованого проектування технологічних параметрів листопривильної машини, апробовані та впроваджені на діючому обладнанні й дозволяють у масштабі реального часу працювати в системі АСУ ТП ЛПМ.

5. На основі автоматизованого проектування технологічних режимів і конструктивних параметрів обладнання для реалізації процесів правки гарячекатаних листів розроблені практичні рекомендації, спрямовані на підвищення ефективності технологій шляхом зниження енергоємності процесу, зменшення металоємності обладнання та розширення сортаменту оброблюваних листів на листопривильних машинах.

6. Стосовно до умов реалізації різних технологічних схем процесу правки гарячекатаних листів уточнені вихідні дані на проектування та виконані проекти листопривильної машини гарячої і холодної правки товстолистового стану 2850 конструкції НКМЗ і комплекту касет із можливістю вигину робочих роликів для листопривильної машини агрегату поперечного різання конструкції НКМЗ. Результати роботи у вигляді методик розрахунку, програмних засобів, а також відповідних рекомендацій з удосконалення технологічних режимів і конструктивних параметрів механічного обладнання машин для правки гарячекатаних листів використані на ряді металургійних підприємств і в навчальному процесі.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Слоним А. З., Сонин А. Л. Правка листового и сортового проката. Москва : Металлургия, 1981. 232 с.
2. Чмелев А. А., Мазур В. Л. Оценка формы прокатных листов и полос / Ин-т чер. металлургии. Днепропетровск, 1984. 14 с. Рус. Деп. в Черметинформации 19.02.85, № 2785.
3. Николаев В. А. Технология прокатки листов и полос : учебное пособие. Киев : УМК ВО, 1990. 168 с.
4. Pearson, W. K. J. (1964–1965). Shape Measurement and Control. *Journal of the Institute of Metals*. Vol. 93. P. 173–178.
5. Wetzels, S. (1977). Welligkeit von Bandern und Blechen aus Metall, speziell aus Aluminium. *Blech RohreProfile*. № 9. P. 313–319 ; № 10. P. 391–395.
6. Железнов Ю. Д. Прокатка ровных полос и листов. Москва : Металлургия, 1971. 198 с.
7. Совершенствование производства холоднокатаной листовой стали / Ю. Д. Железнов [и др.]. Москва : Металлургия, 1982. 232 с.
8. Взаимосвязь непопукости холоднокатаных полос с серповидностью узких лент после продольной резки / В. П. Полухин [и др.]. *Изв. вузов. Черная металлургия*. 1984. № 11. С. 62–64.
9. Мысыков Б. В., Миронова О. В. Контроль плоскостности полосы в процессе холодной прокатки цветных металлов. *Цветные металлы*. 1986. № 1. С. 66–69.
10. Кривенцов А. М. Исследование серповидности при прокатке. *Конструирование и исследование современных прокатных станков* : сб. науч. трудов. Москва : ВНИИметмаш, 1985.
11. Головлев В. Д., Моисеев В. Г. Выпучивание листового металла при правке растяжением. *Кузнечно-штамповочное пр-во*. 1970. № 5. С. 13–16.
12. ГОСТ 21014-88. Термины и определения дефектов поверхности. Взамен ГОСТ 20847-75, ГОСТ 21014-75 ; введ. 1990-01-01. Москва : Изд-во стандартов, 1995.
13. Мазур В. Л., Добронравов А. Н., Чернов П. П. Предупреждение дефектов листового проката. Киев : Техніка, 1986. 142 с.
14. Косарев В. А., Солодов С. В. Модели оценки качества продукции при отделке толстых листов. *Изв. вузов. Черная металлургия*. 2006. № 7. С. 65–66.

15. Мюкке Г., Кархаузен К. Ф., Пюц П.-Д. Дефекты формы горячее- и холоднокатаных полос и способы оценки. *Производство проката*. 2002. № 7. С. 30–36.
16. Особенности зарубежных и отечественных классификаторов дефектов поверхности листового проката / А. И. Добронравов, Е. В. Карпов, А. В. Кушнарев, К. А. Лисичкина. *Труды I конгресса прокатчиков*. Москва : Черметинформация, 1996. С. 205–208.
17. Неплоскостность полос и расчет усилия правки / А. А. Чабоненко, Д. Н. Огарков, В. И. Кузьменко, В. И. Андрющенко. *Производство проката*. 1999. № 1. С. 32–36.
18. Ніколаєв В. О., Мазур В. Л. Технологія виробництва сортового та листового прокату : підручник. Частина II. Запоріжжя : ЗДІА, 2000. 220 с.
19. Железнов Ю. Д., Коцарь С. А., Абиев А. Г. Статистические исследования точности тонколистовой прокатки. Москва : Металлургия, 1974. 240 с.
20. Неравномерность деформации и геометрические параметры волнистости кромки полосы при прокатке / М. И. Куприн [и др.]. *Изв. вузов. Черная металлургия*. 1991. № 8. С. 29–31.
21. Куприн М. И., Судакова Л. П., Девятченко Л. Д. Неравномерность деформации и геометрические параметры коробоватости полосы при прокатке. *Изв. вузов. Черная металлургия*. 1991. № 2. С. 40–43.
22. Механизм образования местной коробоватости на жести / А. В. Кушнарев, Р. В. Файззулина, Р. И. Черкасский, О. Н. Молева. *Производство проката*. 2002. № 1. С. 20–22.
23. ГОСТ 19903-74. Прокат листовой горячекатаный. Сортамент. Москва : Изд-во стандартов, 1987. 14 с.
24. Specification EN 10029:91. Стандарт EN 10029:91. Горячекатаные стальные листы толщиной 3 мм и более. Предельные отклонения размеров, формы и веса. Europe, 1991. 109 p.
25. Specification ASTM A6/A6M-91b. Standard Specification for general requirements for rolled steel plates, shapes, sheets peeling, and bars for structural use. Стандарт ASTM A6/A6M-91b. Общие требования к прокатанным толстым листам, профилям, сортовому прокату и упаковке листов для конструкционного использования. USA, 1991. 51 p.

26. Недорезов И. В., Орлов Б. Я., Винокурский А. Х. Роликовые правильные машины АО «Уралмаш» и пути их совершенствования. *Труды первого Конгресса прокатчиков*. Магнитогорск, 23–27 октября 1995 г. Москва, 1996. С. 38–42.
27. Шинкин В. Н. Упрощенный метод расчета изгибающих моментов стального листа и реакций рабочих роликов у много-роликовой правильной машине. *Известия Высших Учебных Заведений. Черная металлургия*. 2017. Т. 60. № 10. С. 777–784. DOI: <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2017-10-777-784>
28. Машины и агрегаты металлургических заводов. В 3 т. Т. 3 : Машины и агрегаты для производства и отделки проката : учебник для вузов / А. И. Целиков [и др.]. Москва : Металлургия, 1988. 674 с.
29. Машиностроительная энциклопедия. В 40 т. Т. IV-5 : Машины и агрегаты металлургического производства / Н. В. Пасечник [и др.] ; под общ. ред. В. М. Сеницкого, Н. В. Пасечника. Москва : Машиностроение, 2000. 912 с.
30. Королев А. А. Механическое оборудование прокатных и трубных цехов. Москва : Металлургия, 1987. 480 с.
31. Белобров Ю. Н., Смирнов В. Г., Титаренко А. И. Современные листопрямильные машины. *Металлург*. 2002. № 9. С. 50–52.
32. Пономарев Н. И. Создание и исследование роликовых правильно-натяжных машин для полосового проката : автореф. дис. ... канд. техн. наук. Москва, 1977. 24 с.
33. Кусакин Г. Л. Агрегат непрерывной правки полос. Москва : ЦНИИТЭИтяжмаш, 1980. 1-80-15.
34. Дунаевский В. И., Нотченко В. Д. Машины для правки тонкого листового и полосового проката. Москва : ЦНИИТЭИтяжмаш, 1986. 36 с.
35. Титаренко А. И. Совершенствование технологических режимов и конструктивных параметров оборудования агрегатов для протяжной термо-деформационной обработки тонких холоднокатаных лент из цветных металлов и сплавов : автореф. дис. ... канд. техн. наук. Краматорск, 1993. 16 с.
36. Головлев В. Д. Исследование правки растяжением листового металла. *Конструирование, расчет и исследование прокатных станов* : сб. науч. тр. Москва : ВНИИметмаш, 1987. 126 с.

37. Щур И. А. Правка тонких листов из алюминиевых сплавов. Москва : ВИЛС, 1970. 98 с.
38. Щур И. А., Разумова Т. А. Правка тонких полос из алюминиевых сплавов. Москва : ВИЛС, 1970. 59 с.
39. Третьяков А. В., Третьяков Е. М., Мигачева Г. Н. Дрессировка и качество тонкого листа. Москва : Металлургия, 1977. 232 с.
40. Опыт промышленного использования прокатки-волочения для правки полос / В. И. Выдрин [и др.]. *Сталь*. 1982. № 5. С. 54–55.
41. Самойлов В. А. Конструктивные схемы прокатно-правильных станов. *Машины и технология для нанесения покрытий и обработки поверхности проката* : сб. науч. тр. Москва : ВНИИметмаш, 1988. С. 26.
42. Дунаевский В. И., Россошенко Л. М. Линия непрерывной правки полос растяжением с изгибом. Москва : ЦНИИТЭИтяжмаш, 1982. 1-82-12.
43. Дунаевский В. И., Самойлов В. А., Кравченко В. В. Совершенствование конструкций машин для правки растяжением с изгибом : тез. докл. XIII областной научн.-техн. конф. мол. спец. при Свердловском ПО «УРАЛМАШ». Свердловск, 1988. С. 15.
44. Исследование эффективности правки нагартованных холоднокатаных полос электротехнической стали методом растяжения с изгибом / Е. Г. Зиновьев [и др.]. *Труды I конгресса прокатчиков*. Москва : Черметинформация, 1996. С. 209–215.
45. Берингер Ю., Сильваси В. Правка растяжением с изгибом электротехнической листовой стали. *Черные металлы*. 1996. № 5. С. 20–26.
46. Листопробивальная машина горячей и холодной правки толстых листов из материалов с высоким пределом текучести / В. Г. Смирнов, Ю. Н. Белобров, А. И. Титаренко, И. А. Евгиненко. *Совершенствование процессов и оборудования обработки металлов давлением в металлургии и машиностроении* : сб. науч. тр. Краматорск : ДГМА, 2000. С. 429–433.
47. Современные линии отделки толстолистовых станов для производства трубного штрипса / Ю. Н. Белобров, В. А. Плотников, Ю. Г. Бондарь, А. И. Титаренко. *Черная металлургия*. 2004. № 1. С. 16–20.

48. Развитие методов расчета технологий и оборудования процессов правки широкого сортамента толстых листов / Ю. Н. Белобров, В. Г. Смирнов, А. И. Титаренко, А. В. Шестоपालов. *Удосконалення процесів та обладнання обробки тиском у металургії і машинобудуванні* : тематич. зб. наук. пр. Краматорськ-Слов'янськ : ДДМА, 2003. С. 67–72.
49. Новые разработки в технологии и оборудовании для горячей правки толстых листов / Ю. Н. Белобров [и др.]. *Удосконалення процесів та обладнання обробки тиском у металургії і машинобудуванні* : зб. наук. пр. Краматорськ : ДДМА, 2006. С. 228–231.
50. Белкин Е. Л., Козлов В. Г., Карабанов Г. Г. Методика расчета технологических параметров правки изделий на ролико-правильных машинах. *Вестник машиностроения*. 1992. № 5. С. 66–67.
51. Bourgon, J. Y., Guillard, O., Guillard, B., Eberwein, K., Boillot, M. (1994). Modeling of the leveling process and application to heavy plate mills and strip finishing mills. *METEC Congr. '94: 2nd Eur. Cont. Cast. Conf. and 6th Int. Roll. Conf.*, Düsseldorf, June 20–22 1994: Proc. Vol. 2. Düsseldorf, 1994. P. 112–119.
52. Hot and cold plate leveler. Information of Danieli & C. S. p. A., 2006. 62 p.
53. Правильная машина для холодной правки листов. *Перспективна фірма "SMS"*. 1999.
54. Шинкин В. Н. Расчет технологических параметров правки стального листа на одиннадцатиролковой листопрямляющей машине линии поперечной резки фирмы Fagor Arrasate. *Производство проката*. 2014. № 8. С. 26–34.
55. Zhifang, Lui, Yongqin, Vang, Xingchun, Yan (2012). A new model for the plate leveling process based on curvature integration method. *International Journal of Mechanical Sciences*. V. 54. P. 213–224.
56. Остринский А. С. Определение расчетных параметров листовых роликовых правильных машин. *Труды ВНИИМЕТМАШ* : сб. наук. пр. № 18. С. 7–32.
57. Винокурский А. Х. Исследование силовых и геометрических параметров при отгибании полосой роликов окалиноломателей и натяжных устройств : дисс. ... канд. техн. наук : 05.02.02 : защищена 02.06.75 : утв. 29.06.76. Свердловск, 1975. 226 с.

58. Луговской В. М. Теория расчета листопривильных машин и автоматизация их проектирования. *Труды ВНИИМЕТМАШ*. Москва : Металлургия, 1970. № 26. С. 8–30.
59. Самойлов В. А., Егоров А. Б. Расчет напряженно-деформированного состояния полосы при правке растяжением с изгибом. *Совершенствование процессов и машин обработки проката* : тр. ВНИИМЕТМАШ. Москва : ВНИИМЕТМАШ, 1988. С. 94–99.
60. Самойлов В. А., Егоров А. Б. Определение деформации полосы при растяжении с изгибом. *Машины и технологии для нанесения покрытий и обработки поверхности проката* : тр. ВНИИМЕТМАШ. Москва : ВНИИМЕТМАШ, 1988. С. 123–126.
61. Самойлов В. А., Егоров А. Б. О взаимосвязи силовых факторов и кривизны в процессе деформирования проката растяжением с изгибом. *Изв. вузов. Черная металлургия*. 1989. № 7. С. 148–149.
62. Самойлов В. А., Егоров А. Б. Алгоритм расчета параметров процесса правки растяжением с изгибом/ *Совершенствование металлургических машин*. Москва : ВНИИМЕТМАШ, 1989. С. 102–104.
63. Титлянов А. Е., Литвак Б. С. Алгоритм расчёта параметров процесса правки на роликовых машинах. *Сб. науч. тр. МИСиС*. 1977. № 100. С. 106–108.
64. Grüber, M. and Hirt, G. (2017). A strategy for the controlled setting of flatness and residual stress distribution in sheet metals via roller levelling. *Procedia engineering*. V. 207. P. 1332–1337. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.10.892>
65. Коновалов Ю. В., Остапенко А. Д., Пономарев В. Н. Расчет параметров листовой прокатки : справочник. Москва : Металлургия, 1986. 430 с.
66. Бровман М. Я. Применение теории пластичности в прокатке. Москва : Металлургия, 1991. 265 с.
67. Третьяков А. В., Зюзин В. Н. Механические свойства металлов и сплавов при обработке давлением. Москва : Металлургия, 1973. 224 с.
68. Полухин П. И., Гун Г. Я., Галкин А. М. Сопротивление пластической деформации металлов и сплавов : справочник. Москва : Металлургия, 1983. 352 с.

69. Соколов Л. Д. Сопротивление металлов пластической деформации. Москва : Металлургия, 1973. 284 с.
70. Андреюк Л. В. Определение давлений металла на валки при горячей прокатке сталей и сплавов широкого сортамента. *Теория прокатки ; Теоретические проблемы прокатного производства* : материалы всесоюзн. науч. техн. конф. Москва : Металлургия, 1975. С. 383–385.
71. Андреюк Л. В., Тюленев Г. Г. Аналитические зависимости сопротивления деформации металла от температуры и степени деформации. *Сталь*. 1972. № 9. С. 545–547.
72. Misaka, Y., Yoshimoto, T. (1967). *Technol. Plast. J. Japan Soc.* Vol. 8. 414 p.
73. Федоринов В. А., Сатонин А. В., Грибков Э. П. Математическое моделирование напряжений, деформаций и основных показателей качества при прокатке относительно широких листов и полос : монография. Краматорск : ДГМА, 2010. 156 с.
74. Сатонин А. В. Численное конечно-разностное математическое моделирование напряженно-деформированного состояния металла при реализации различных технологических схем обработки давлением. *Удосконалення процесів та обладнання обробки тиском в металургії і машинобудуванні* : зб. наук. пр. Краматорськ : ДДМА, 2001. С. 559–564.
75. Грушко А. В. Развитие феноменологических основ создания карт металлов и сплавов применительно к процессам их холодной обработки давлением : автореф. ... д-ра техн. наук. Краматорск : ДГМА, 2013. 41 с.
76. Грудев А. П. Внешнее трение при прокатке. Москва : Металлургия, 1973. 285 с.
77. Чертавских А. К., Белосевич В. К. Трение и технологическая смазка при обработке металлов давлением. Москва : Металлургия, 1968. 362 с.
78. Контактное взаимодействие металла и инструмента при прокатке / П. И. Полухин [и др.]. Москва : Металлургия, 1974. 200 с.
79. Контактное трение в процессе обработки металлов давлением / А. Н. Леванов [и др.]. Москва : Металлургия, 1976. 416 с.
80. Василев Я. Д., Дементяненко А. В., Коноводов Д. В. Анализ моделей напряжений трения при прокатке. *Удосконалення процесів*

- та обладнання обробки тиском в металургії та машинобудуванні : зб. наук. пр. Краматорськ : ДДМА, 2001. С. 532–537.
81. Василев Я. Д. Разработка новой модели напряжений трения при прокатке. *Теоретические проблемы прокатного производства : труды IV Международной научно-технической конференции.* Днепропетровск : НМЕТАУ, Металлургическая и горнорудная промышленность. 2000. № 8, 9. С. 28–32.
 82. Hernández, U. U., Mendiguren, J., de Argandoña, E. S., et al. (2016). Friction characterisation in levelling processes. *Advances in Materials and Processing Technologies.* V. 2 (4). P. 503–513. DOI: <https://doi.org/10.1080/2374068X.2016.1247230>
 83. Fan, Q.-H., Zhang, H., Jiang, X.-C. and Tian, B.-Z. (2017). Study on neutral layer offset of high-strength steel plate straightening of excavator's working arm. *Advances in Mechanical Engineering.* V. 9 (7). P. 1–11. <https://doi.org/10.1177%2F1687814017712420>
 84. Ганеев Ю. М. Универсальный метод определения изгибающего и крутящего моментов при правке и гибке заготовок. *Оборудование сортовых и толстолистовых прокатных станов.* Москва : ВНИИМЕТМАШ, 1989. С. 65–69.
 85. Won, C., Lee, W., Lee, H.-Y., Kang, Y.-S. and Yoon, J. (2020). Evaluation of in-plane edge stretchability under severe contact condition for third-generation advanced high-strength steel. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology.* V. 108. P. 1945–1958. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00170-020-05537-x>
 86. Madej, L., Muszka, K., Perzyński, K., et al. (2011). Computer aided development of the levelling technology for flat products. *CIRP Annals.* V. 60 (1). P. 291–294. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2011.03.137>
 87. Lemoine, X. and Aouafi, A. (2008). Bauschinger effect correspondence of experimental tests. *International Journal of Material Forming.* V. 1. P. 241–244. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12289-008-0357-9>
 88. Математическое моделирование напряженно-деформированного состояния металла при горячей правке на многороликовых правильных машинах / А. В. Сатонин, А. В. Шестопалов, Е. Б. Кулаченко, А. А. Кулаченко, А. А. Сатонин. *Восточноевропейский журнал передовых технологий.* 2006. № 5/2 (23). С. 38–43.

89. Кучеряев Б. В., Федосеев А. И. Инженерная оценка некоторых кинематических параметров процесса правки на роliko-правильных машинах. *Изв. ВУЗов. Черная металлургия*. 1991. № 1. С. 46–49.
90. Gevers, P., Bourgon, J. Y., Ferrauto, F., Guillard, O., Caut, P., Fradin, O., Garnier, H., Chapman, B. (1995). Optimisation de la preparation de planeite des bobines et des femilles après train a bandes. *Rev. met. (Fr.)*. V. 92, № 10–11. P. 1235–1242.
91. Finstermann, G., Schwenzfier, W., Fischer, F. D. (1991). Simulation der Biegerichtens von eindimensional gekrummten Bandern in Mehrrollenrichtmaschinen (Teil 1 – Theorie). *Berg – und Huttenmann. Monatsh.* № 7. P. 240–249.
92. Fu, Wen-zu, Fan, Ling-shu (1985). Roll gap calcukated. *Iron and Steel International*. № 1. P. 14–15.
93. Дунаевский В. И. Конструкция, технология и методы расчета машин для правки листового проката. Киев : УМК ВО, 1992. 86 с.
94. Дунаевский В. И., Лапшев Л. Л., Пономарев Н. И. Перераспределение крутящих моментов при правке на роlikовых правильных машинах. *Металлургическая и горнорудная промышленность*. Киев : Институт технической информации, 1964. № 6. С. 38–39.
95. Мисака Есисука, Масун Такэси. Исправление формы стальной полосы на правильной машине с натяжением. *Сосей то како*. 1976. Вип. 17, № 191. С. 988–994.
96. Roberts, Z. M., Sheppard, T. (1971). On the Mechanics of the Tension-Levelling Process. *Jornal of the Institute of Metals*, Oct. V. 99. P. 293–301.
97. Sheppard, T., Roberts, Z. M. (1971). Stress/strain Relationships for Strip-shape Correction Processes. *Journal of the Institute of Metals Quly*. Vol. 99. P. 223–228.
98. Коровицкий Е. Л. Определение мощности привода машин для правки проката прямоугольного сечения. *Изв. вузов. Черная металлургия*. 1984. № 6. С. 129–133.
99. Хайкин Б. Е. Двухпараметрическая модель упрочнения металлов и сплавов при холодной деформации. *Изв. вузов. Черная металлургия*. 1985. № 11. С. 69–74.

100. Зильберг Ю. В., Братутин В. Г., Карнаух Т. А. О влиянии знакопеременного изгиба на протяженность площадки текучести. *Изв. вузов. Черная металлургия*. 2002. № 5. С. 69–70.
101. Зильберг Ю. В., Братутин В. Г. Влияние знакопеременного изгиба на прочностные свойства низкоуглеродистой стали. *Удосконалення процесів та обладнання обробки тиском у машинобудуванні та металургії* : зб. наук. пр. Краматорськ : ДДМА, 2002. С. 263–268.
102. Cui, L., Xian, L. H. and Xiang, H. L. (2011). Analysis of Leveling Strategy for a plate Mill. *Advanced Materials Research*. V. 145. P. 424–428. DOI: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.145.424>
103. Liu, Zf., Luo, Yx., Wang, Y., et al. (2021). An analytical study of optimal roller intermeshes for the plate leveling process. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers. Part B: Journal of Engineering Manufacture*. V. 235 (1–2). P. 278–289. DOI: <https://doi.org/10.1177%2F0954405420947959>
104. Bourgon J. Y., Dreistadt D., Guillard O., Irastorza L. (1993). Planage en tolèrie forte. Modelisation et application industrielles. *Rev. Met (Fr.)*. V. 90. № 4. P. 537–544.
105. Управление продольными напряжениями в толстых листах контролируемой прокатки / О. Н. У. Kia, W. Y. Choo, R. Chang, J. H. Kia, S. C. Shin. *Дзайре то нуросэсу=Curr. Adv. Mater, and Proc.* 1990. V. 3, № 5. P. 1370. Яп., Место хранения Черметинформация.
106. Исследование деформации металла в роликопривильной машине / М. С. Подгайский, А. А. Дубиня, Т. М. Наливайченко, А. Б. Максимов. *Вестник машиностроения*. 1986. № 11.
107. Guericke, W., Buchmann, S., Riefenstahl, V. (1983). Voraussetzungen und Moglichkeiten von Mikrorechnen. *Wissenschaftliche Zeitschrift der Technischen Hochschule Otto von Guericke, Magdeburg*. № 1/2. S. 167–173.
108. Richard, P., Smith, Jr. (1994). Mathematical modeling of the cold leveling process for steel plates. *Proceeding of the 36-th Mechanical Working and Steel Processing Conference*. Baltimore, MD, October 17–18, 1994. USA, 1995.
109. Lee, J.-B., Kang, S.-S. (2018). Numerical Modeling of Roller Leveler for Thick Plate Leveling. *International Journal of*

- Precision Engineering and Manufacturing. Vol. 19 (3). P. 425–430. DOI: 10.1007/s12541-018-0051-x
110. Petruška, J., Návrat, T. and Šebek, F. (2012). A New Model for Fast Analysis of Leveling Process. *Advanced Materials Research*. V. 586. P. 389–393. DOI: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.586.389>
 111. Шестопалов А. В., Синельников И. Л., Сатонин А. А. Разработка уточненной математической модели процесса правки относительно толстых листов и полос. *Интеллект молодых – производству 2005* : сборник тезисов IV Международной научно-практической конференции молодых ученых и специалистов. Краматорск : НКМЗ, 2005. С. 25–27.
 112. Титаренко А. И., Грибков Э. П., Гаврильченко О. А. Автоматизированный расчет и проектирование технологических режимов процессов холодной и горячей правки относительно толстых листов на многороликовых правильных машинах. *Обработка материалов давлением* : сб. науч. тр. Краматорск : ДГМА, 2009. № 1 (20). С. 123–128.
 113. Анализ влияния температуры и геометрических характеристик на энергосиловые параметры при реализации процесса горячей правки относительно толстых листов / А. В. Сатонин, А. И. Титаренко, А. В. Шестопалов, О. А. Гаврильченко. *Обработка материалов давлением* : сб. науч. тр. Краматорск : ДГМА, 2008. № 1 (19). С. 115–119.
 114. Теория обработки металлов давлением (Вариационные методы расчета усилий и деформаций) / И. Я. Тарновский [и др.]. Москва : Металлургия, 1963. 672 с.
 115. Колмогоров В. Л. Механика обработки металлов давлением. Москва : Металлургия, 1986. 688 с.
 116. Колмогоров В. Л., Выдрин А. В. Определение напряженно-деформированного состояния полосы вариационным методом. *Изв. вузов. Черная металлургия*. 1988. № 8. С. 46–49.
 117. Компьютерное моделирование процессов обработки металлов давлением / В. Н. Данченко [и др.]. Днепропетровск : Системные технологии, 2005. 448 с.
 118. Зенкевич О., Морган К. Конечные элементы и аппроксимация. Москва : Мир, 1986. 318 с.

119. Liu, G. R., Quek, S. S. (2003). The Finite Element Method: A Practical Course. Department of Mechanical Engineering, National University of Singapore. 348 p.
120. Боровік П. В. Теоретичні дослідження процесів обробки металів тиском на основі методу скінчених елементів : навчальний посібник. Алчевськ : ДонДТУ, 2012. 170 с.
121. Голенков В. А., Морев П. Г., Радченко С. Ю. Методы математического моделирования и новые задачи ОМД. *Удосконалення процесів і обладнання обробки тиском в машинобудуванні та металургії* : тематич. зб. наук. пр. Краматорськ : ДДМА, 2008. С. 15–19.
122. Биба Н. В., Гладков Ю. А., Белокуров О. А. Применение программы моделирования процессов ОМД QFORM для обучения и исследовательской работы в университетах. *Удосконалення процесів і обладнання обробки тиском в машинобудуванні та металургії* : тематич. зб. наук. пр. Краматорськ : ДДМА, 2008. С. 9–14.
123. DEFORM™ 3D Version 10.0 User's Manual. 2009. 288 p. URL: <http://home.zcu.cz/~sbenesov/Deform3Dlabs.pdf>
124. Манилык Т, Ильин К. Практическое применение программного комплекса ABAQUS в инженерных задачах. Версия 6.5. Москва : МФТИ, ТЕСИС, 2006. 99 с.
125. Алямовский А. А. SolidWorks/COSMOSWorks. Инженерный анализ методом конечных элементов. Москва : ДМК Пресс, 2004. 432 с.
126. Brunig, M. (1989). Ein Finite-Element-model zur numerischen Simulation des Rollenrichtens von schweren Profilen. Конечно-элементная модель для численного моделирования роликовой правки тяжелых профилей. Institut fur Konstruktiven Ingenieurbau. Ruhr-Universität. Mitteilung. № 89 (5). Bochum. 142 S.
127. Park, K. and Hwang, S. (2002). Development of a Finite Element Analysis Program for Roller Leveling and Application for Removing Blanking Bow Defects of Thin Steel Sheet. ISIJ International, V. 42 (9). P. 990–999. DOI: <http://dx.doi.org/10.2355/isijinternational.42.990>
128. Конечно-элементное математическое моделирование напряженно-деформированного состояния металла и основных

- показателей качества при горячей правке на многороликовых правильных машинах / А. И. Титаренко, А. В. Шестопапов, А. А. Сатонин, О. А. Гаврильченко. *Розвиток методів розрахунку, удосконалення технологій та обладнання процесів тиском* : матеріали науково-практичної конференції. Краматорськ : ДДМА, 2007. С. 15.
129. Сатонин А. В., Шестопапов А. В., Гаврильченко О. А. Моделирование процесса правки толстых листов на многороликовых правильных машинах с использованием метода конечных элементов. *Прогрессивные технологии пластической деформации металлов» посвященной 100-летию со дня рождения выдающегося ученого-практика В. М. Клименко* : тезисы докладов Международной научно-технической конференции. Донецк : Норд Компьютер, 2008. С. 32.
130. Dratz, B., Nalewajk, V., Bikard, J. and Chastel, Y. (2009). Testing and modelling the behaviour of steel sheets for roll levelling applications. *International Journal of Material Forming*. V. 2. P. 519–522. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12289-009-0560-3>
131. Mathieu, N., Dimitriou, R., Parrico, A., Potier-Ferry, M. and Zahrouni, H. (2011). Flatness defects after bridle rolls: a numerical analysis of levelling. *International Journal of Material Forming*. V. 6 (2). P. 255–266. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12289-011-1083-2>
132. Silvestre E., de Argandoña E. S., Galdos L., Mendiguren J. (2014). Testing and Modeling of Roll Levelling Process. *Key Engineering Materials*. Vols. 611–612. P. 1753–1762.
133. Mathieu N., Dimitriou R., Parrico A., Potier-Ferry M., Zahrouni H. (2013). Flatness defects after bridle rolls: a numerical analysis of leveling. *International Journal of Material Forming*. Vol. 6. Issue 2. P. 255–266.
134. Petruška, J., Návrat, T., Šebek, F. (2012). A New Model for Fast Analysis of Leveling Process. *Advanced Materials Research*. Vol. 586. P. 389–393.
135. Dratz, B., Nalewajk, V., Bikard, J., Chastel, Y. (2009). Testing and modelling the behaviour of steel sheets for roll levelling applications. *International Journal of Material Forming*. Vol. 2. Supplement 1. P. 519–522.

136. Гаврильченко О. А. Трёхмерное конечно-элементное моделирование процесса правки толстых листов на многороликовых правильных машинах. *Наука и практика: проблемы, идеи, инновации* : сборник тезисов IV Международной научно-практической конференцим. Чистополь : Филиал ИНЭКА, 2009. С. 9.
137. Lee, J.-S., Huh, H., Bae, J.-G., Lee, J.-W. and Kim, D.-T. (2007). Design optimization of roller straightening process for steel cord using response surface methodology. *AIP Conference Proceedings*. V. 908 (1). P. 581–586. DOI: <https://doi.org/10.1063/1.27408735-97>
138. Wang, Y., Liu, Z. and Yan, X. (2012). Evaluation of straightening capacity of plate roll straightener. *Journal of Central South University*. V. 19 (9). P. 2477–2481. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11771-012-1299-4>
139. Liu, Zf., Luo, Yx., Yan, Xc., et al. (2015). Boundary determination of leveling capacity for plate roller leveler based on curvature integration method. *Journal of Central South University*. V. 22. P. 4608–4615. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11771-015-3011-y>
140. Meng, X., Dengyue, S., Shimin, X., et al. (2016). Modeling of Intermesh Schedule for Strong Heavy Plate Roller Straightener and Finite Element Method Modification. *MATEC Web of Conferences*. V. 71, 02005. P. 1–6. DOI: <https://doi.org/10.1051/mateconf/20167102005>
141. Shinkin, V. N. (2017). Asymmetric three-roller sheet-bending systems in steel-pipe production. *Steel in Translation*. V. 47. P. 235–240. DOI: <https://doi.org/10.3103/S0967091217040106>
142. Yi, Guodong, Zili, Wang and Zhouyu, Hu (2020). A novel modeling method in metal strip leveling based on a roll-strip unit. *Mathematical Problems in Engineering*. V. 1486864. P. 1–16. DOI: <https://doi.org/10.1155/2020/1486864>
143. Cui, L., Hu, X. and Liu, X. (2011). Research on Mathematical Model of Leveling Process for Plate Mill. *Advanced Materials Research*. V. 148–149. P. 368–371. DOI: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.148-149.368>
144. Silvestre, E., Garcia, D., Galdos, L., et al. (2016). Roll levelling semi-analytical model for process optimization. *Journal of Physics: Conference Series*. V. 734 (3). P. 032–034. DOI: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/734/3/032034>

145. Новик Ф. С., Арсов Я. Б. Оптимізація процесів технології металів методами планування експериментів. Москва : Машинобудування ; Софія : Техніка, 1980. 304 с.
146. Применение математической модели технологической настройки листопрямляющей машины № 1 ТЛС 3000 Алчевского металлургического комбината для правки термоупрочненных раскатов из трубных марок сталей / А. В. Сатонин [и др.]. *Удосконалення процесів та обладнання обробки тиском у машинобудуванні та металургії* : зб. наук. пр. Краматорськ : ДДМА, 2008. С. 335–339.
147. Колесников А. Г., Мунтин А. В., Зинягин А. Г. Особенности физического моделирования контролируемой прокатки. *Заготовительные производства в машиностроении*. 2013. №. 1. С. 32–35.
148. Tsai, S.-Y. and Chang, J.-Y. (2018). Design of deep learning on intelligent levelling system for industry 4.0 technology. *MATEC Web of Conferences*. V. 185, 00026. P. 1–8. DOI: <https://doi.org/10.1051/mateconf/201818500026>
149. Шестопалов А. В. Повышение качества и расширение сортамента толстолиствого металлопроката на основе совершенствования технологии и оборудования для его горячей правки : дисс. ... канд. техн. наук : 05.03.05 : защищена 26.06.07 ; утв. 11.10.07. Краматорск, 2007. 211 с.
150. Новые разработки в технологии и оборудовании для горячей правки толстых листов / Ю. Н. Белобров, А. В. Шестопалов, А. В. Сатонин, А. А. Сатонин. *Прогрессивные технологии и оборудование в машиностроении и металлургии* : сб. науч. тр. Липецк : ЛГТУ, 2006. Ч. 2. С. 35–39.
151. Batty, F. A., Lawson, K. T. (1965). Heavy plate levelers. *Journal of The Iron and Steel Institute*. Nov. P. 1115–1128.
152. Masing, G. (1926). Wissenschaftliche Veröffentlichungen aus dem Siemens. *Научные публикации концерна "Siemens"*. Konzern. № 142.
153. Недорезов И. В. Моделирование процессов правки проката на роликовых правильных машинах. Екатеринбург : АКВА-ПРЕСС, 2003. 256 с.
154. Bara-bash, A. V., Gavril'chenko, E. Yu., Gribkov, E. P., Markov, O. E. (2014). Straightening of Sheet with Correction of Waviness. *Steel in*

- Translation*. Vol. 44. No. 12. P. 916–920. URL: <http://link.springer.com/article/10.3103%2FS096709121412002X>
155. Liu, G. R., Quek, S. S. (2003). The Finite Element Method: A Practical Course. *Department of Mechanical Engineering, National University of Singapore*. 348 p.
 156. Бочаров Ю. А., Балаганский В. И. Второй Европейский семинар по моделированию процессов в обработке давлением. *КШП. ОМД*. 2002. № 9. С. 38–41.
 157. Harangozó, Dóra, and Imre, Czinege (2023). Effect of Roller Levelling on Tensile Properties of Aluminum Sheets. *Materials* 16. No. 8. P. 3001. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma16083001>
 158. Федоринов В. А., Гаврильченко Е. Ю., Завгородний А. В. Конечно-элементное моделирование процесса правки волнистости на листопривильных машинах. *Обработка материалов давлением* : сб. науч. тр. Краматорск : ДГМА, 2015. № 2 (41). С. 63–68. ISSN 2076-2151.
 159. Грибков Э. П., Гаврильченко Е. Ю. Исследование влияния дискретности разбиения объема материала на точность расчета при конечно-элементном моделировании процесса правки толстых листов. *Научный вестник Донбасской государственной машиностроительной академии* [Электронный ресурс]. Краматорск : ДГМА, 2017. № 2 (23Е). С. 4–8.
 160. Грибков Э. П., Гаврильченко Е. Ю. Исследование процесса правки волнистости листов на листопривильных машинах. *Вісник Херсонського національного технічного університету*. 2017. № 2 (61). С. 35–44.
 161. Чиченев Н. А., Кудрин А. Б., Полухин П. И. Методы исследования процессов обработки металлов давлением. Москва : Metallurgiya, 1977. 312 с.
 162. Чекмарев А. П., Ольдзиевский С. А. Методы исследования процессов прокатки. Москва : Metallurgiya, 1969. 274 с.
 163. Шевакин Ю. Ф., Рытиков А. М., Касаткин Н. И. Технологические измерения и приборы в прокатном производстве. Москва : Metallurgiya, 1973. 367 с.
 164. Айвазян С. А. Статистическое моделирование зависимостей. Москва : Metallurgiya, 1968. 227 с.

165. Яблочкин А. Л. Общая теория статистики. Москва : Статистика, 1976. 344 с.
166. Крамер Г. Математические методы статистики. Москва : Мир, 1975. 648 с.
167. Бронштейн И. Н., Семендяев К. А. Справочник по математике (для инженеров и учащихся вузов). Москва : Наука, 1981. 720 с.
168. Грибков Э. П., Гаврильченко Е. Ю. Экспериментальные исследования холодной правки на многороликовых листоправильных машинах. X International Conference "Strategy of Quality in Industry and Education" June 6–13 2014, Varna, Bulgaria. *International Scientific Journal Acta Universitatis Pontica Euxinus*. Special Number. P. 53–57. 978-617-518-288-8
169. Грибков Э. П., Гаврильченко Е. Ю. Автоматизированное проектирование технологических настроек листоправильной машины. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*. Серія: Інноваційні технології та обладнання обробки матеріалів у машинобудуванні та металургії. 2017. № 37 (1259). С. 11–16.
170. Программное обеспечение для проектирования технологических параметров настройки многороликовых листоправильных машин / Э. П. Грибков, А. В. Завгородний, Е. Ю. Гаврильченко, А. С. Горбенко. *Научный Вестник ДГМА* : сб. науч. тр. Краматорск : ДГМА, 2015. № 2 (17Е). С. 33–38.
171. Ковшов В. Н. Постановка инженерного эксперимента. Киев-Донецк : Вища шк., 1982. 120 с.
172. Малышев В. П. Математическое планирование металлургического и химического эксперимента. Алма-Ата : Наука, 1977. 37 с.
173. Таблицы планов эксперимента. Для факторных и полиномиальных моделей. Справочное издание / В. З. Бродский, Л. И. Бродский, Т. И. Голикова и др. Москва : Металлургия, 1982. 753 с.
174. Доброносков Ю. К., Гаврильченко Е. Ю., Матвеев И. А. Напряженно-деформированное состояние рабочего ролика листоправильной машины при холодной правке с дифференцированным приложением силы по ширине листа. *Обработка материалов давлением* : сб. научн. тр. Краматорск : ДГМА, 2016. № 1 (42). С. 203–207.
175. Грибков Э. П., Гаврильченко Е. Ю., Мережко Д. В. Математическое моделирование профилирования ободьев колес.

- Актуальные проблемы в машиностроении.* Новосибирск : НГТУ, 2016. № 3. С. 330–335.
176. Гаврильченко Е. Ю., Грибков Э. П., Мережко Д. В. Совершенствование технологических режимов работы листоправильной машины 2800 Ашинского металлургического завода. *41-я международная научно-техническая конференция молодежи.* Запорожсталь, 20 ноября, 2014 г. Тезисы докладов. С. 42–43.
177. Гаврильченко Е. Ю., Грибков Э. П., Мережко Д. В. Математическая модель технологических настроек листоправильной машины для правки продольной и поперечной кривизны листов. *41-я международная научно-техническая конференция молодежи.* Запорожсталь, 20 ноября, 2014 г. Тезисы докладов. С. 43–44.
178. Гаврильченко Е. Ю. Математическая модель технологических настроек листоправильной машины для правки продольной и поперечной кривизны листов. *Ресурсосбережение и энергоэффективность процессов и оборудования обработки давлением в машиностроении и металлургии* : материалы VI Международной научно-технической конференции, 19–21 ноября. Харьков, 2014. С. 28–30.
179. Алямовский А. А. Инженерные расчёты в SolidWorks Simulation. Москва : ДМК-Пресс, 2010. 230 с.
180. Алямовский А. А. SolidWorks Simulation. Инженерный анализ для профессионалов: задачи, методы, рекомендации. *Litres.* 2017. 464 с.
181. Алямовский А. А. SolidWorks Simulation. Инженерный анализ для профессионалов: задачи, методы, рекомендации. Москва : ДМК Пресс, 2015. 562 с.
182. Kurowski, P. (2013). *Engineering Analysis with SolidWorks Simulation 2013.* Kurowski. SDC publications. 487 p.
183. Shih, R. (2014). *Introduction to finite element analysis using solidworks simulation 2014.* SDC publications. 512 p.
184. Пат. № 82635, Україна, МПК В21D 11/08, В21D 11/128 (2006.01). Спосіб центрування затравки в районі вертикальної тягнучої кліті і район вертикальної тягнучої кліті / Є. Ю. Гаврильченко, О. О. Гаврильченко, О. І. Титаренко, І. О. Євгиненко, В. Г. Смирнов ;

- заявник та патентовласник Закрите акціонерне товариство «Новокраматорський машинобудівний завод». № а200706726 ; заявл. 15.06.2007 ; опубл. 25.04.2008, Бюл. № 8.
185. Пат. № 70821, Україна, МПК В21D 1/02 (2006.01). Машина для виправлення сортового прокату / Д. В. Алдохін, І. О. Євгиненко, С. А. Гриценко, О. В. Рева, Є. Ю. Гаврильченко, А. В. Шестоपालов, А. М. Филиппських, В. С. Бобуліч, Р. Є. Сілін, Р. С. Івчик ; заявник та патентовласник Публічне акціонерне товариство «Новокраматорський машинобудівний завод». № u201114727 ; заявл. 12.12.2011 ; опубл. 25.06.2012, Бюл. № 12.
186. Пат. № 98560, Україна, МПК В21D 3/02 (2006.01). Листоправильна машина / С. А. Гриценко, І. О. Євгиненко, Є. Ю. Гаврильченко, А. Ф. Гончаренко, О. В. Послушник ; заявник та патентовласник Публічне акціонерне товариство «Новокраматорський машинобудівний завод». № u201413602 ; заявл. 18.12.2014 ; опубл. 27.04.2015, Бюл. № 8.
187. Пат. № 119629, Україна, МПК В30В 3/00, В21D 5/00 (2006). Прес для правки товстих листів і плит / С. А. Гриценко, О. К. Бердніков, Є. Ю. Гаврильченко, О. В. Послушник, С. Л. Татаренков ; заявник та патентовласник Публічне акціонерне товариство «Новокраматорський машинобудівний завод». № u201704860 ; заявл. 19.05.2017 ; опубл. 25.09.2017, Бюл. № 18.

Навчальне видання

Грибков Едуард Петрович
Гаврильченко Євген Юрійович
Добронос Юрій Костянтинович

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

Монографія

Дизайн обкладинки *В. Савельєва*
Технічний редактор *О. Гринюк*
Верстка *О. Данильченко*

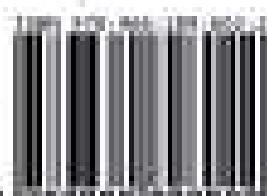


Підписано до друку 28.12.2023 р.
Формат 60x84/16. Папір офсетний.
Цифровий друк. Гарнітура Cambria.
Ум. друк. арк. 10,70. Наклад 300.
Замовлення № 0124-009.

Видавництво та друк: Олді+
65101, м. Одеса, вул. Інглезі, 6/1
тел.: +38 (095) 559-45-45, e-mail: office@oldiplus.ua
Свідоцтво ДК № 7642 від 29.07.2022 р.
Замовлення книг:
тел.: +38 (050) 915-34-54, +38 (068) 517-50-33
e-mail: book@oldiplus.ua



У роботі розглянуті технологічні особливості процесу правки товстих листів на багаторольових правильних машинах та особливості їх обладнання. Розроблено математичні моделі процесу правки товстих листів, проведено теоретичні та експериментальні дослідження впливу технологічних та конструкційних факторів на якість правки та енергоспоживчі параметри процесу. Розглянуто можливості правки нерівномірно розподілених за шириною листів дефектів пластичності за допомогою диференційованого додавання сили правки за рахунок прогинів робочих ролів. Наведено результати автоматизованого проектування технологічних налаштувань листопривильної машини з диференційованим додаванням сили правки за шириною листів. Призначено для науковців, аспірантів та студентів технічних спеціальностей, а також для інженерних працівників промислових підприємств і співробітників науково-дослідних інститутів.



9 789662 836022



 oldiplus.ua
 [oldiplus](https://www.facebook.com/oldiplus)
 [oldiplus](mailto:oldiplus@oldiplus.ua)
 [# oldiplus](https://www.instagram.com/oldiplus)