

Міністерство освіти і науки України
Донбаська державна машинобудівна академія

ГАВРИЛЬЧЕНКО ЄВГЕН ЮРІЙОВИЧ

УДК 621.982.45: 621.771.09

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

Спеціальність 05.03.05 – процеси та машини обробки тиском

АВТОРЕФЕРАТ

дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Краматорськ – 2018

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Донбаській державній машинобудівній академії (ДДМА, м. Краматорськ) Міністерства освіти і науки України.

Науковий керівник: доктор технічних наук, доцент

Грибков Едуард Петрович,

Донбаська державна машинобудівна академія Міністерства освіти і науки України (м. Краматорськ), в.о. завідувача кафедри «Автоматизовані металургійні машини та обладнання»

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор

Тришевський Олег Ігорович,

Харківський національний технічний університет сільського господарства ім. П. Василенка Міністерства освіти і науки України (м. Харків), завідувач кафедри технології матеріалів

кандидат технічних наук

Присяжний Андрій Григорович,

Державний вищий навчальний заклад «Приазовський державний технічний університет» Міністерства освіти і науки України (м. Маріуполь), доцент кафедри обробки металів тиском

Захист відбудеться «15» листопада 2018 року о 13⁰⁰ години на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 12.105.01 Донбаської державної машинобудівної академії (84313, м. Краматорськ, вул. Академічна, 72, 1-й навчальний корпус, ауд. 1319).

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

Автореферат розісланий «___» жовтня 2018 р.

Вчений секретар спеціалізованої
вченої ради Д 12.105.01
кандидат технічних наук, доцент

Ю. К. Доброносів

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

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

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

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

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

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

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

Мета і завдання дослідження. Метою роботи є підвищення якості продукції та розширення сортаменту багатороликових листопробних машин за рахунок

удосконалення технологій і обладнання процесів правки листів та розвитку методів їх розрахунку.

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

- провести аналіз існуючих способів правки листів, тенденцій удосконалення технологій та обладнання для виправлення листового металопрокату;
- уточнити та розширити математичні моделі напружено-деформованого стану при правці гарячекатаних листів;
- розробити математичні моделі з прогнозування площинності листового металопрокату при гарячій та холодній правці листів з дефектами хвилястості на листоправильних машинах з диференційованим додатком сили правки по ширині листів;
- дати експериментальну оцінку ступеня вірогідності розроблених математичних моделей процесів правки і уточнити вихідні передумови, необхідні для їхньої чисельної реалізації;
- проаналізувати характер впливу вихідних параметрів і розробити практичні рекомендації, спрямовані на удосконалення технологій і обладнання для правки гарячекатаних листів;
- сформулювати критерії, розробити практичні рекомендації та програмні засоби з автоматизованого проектування технологічних режимів налаштування устаткування для правки гарячекатаних листів.

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

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

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

Експериментальні дослідження в промислових умовах були виконані на листопривільних машинах товстолистових станів провідних металургійних комбінатів. Обробку результатів експериментальних досліджень, отриманих з використанням методів тензометрії, виміру геометричних параметрів і експертних оцінок виконували на основі елементів теорії імовірності та математичної статистики.

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

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

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

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

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

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

- практичні рекомендації з удосконалення технологічних режимів роботи, складу, основних конструктивних параметрів і налаштувань механічного устаткування листопробивальних машин з можливістю диференційованого додатку сил по ширині листа, що забезпечують розширення сортаменту, підвищення якості та економію матеріальних ресурсів при виробництві гарячекатаних листів, чотири з яких визнано винаходами.

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

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

Особистий внесок здобувача. Автор самостійно поставив мету і задачу, виконав дослідження з уточнення вихідних даних, розробив математичне та програмне забезпечення з автоматизованого розрахунку та проектування процесів правки гаря-

чекатаних листів, виконав аналіз результатів чисельної реалізації та сформулював практичні рекомендації. Автор взяв участь у розробці технічного проекту та створенні нових експериментальних установок: листопривальної машини $9 \times 100 \times 250$, оснащеної механізмом вигину правильного ролика, взяв участь у проведенні експериментальних досліджень різних технологічних схем процесів правки в лабораторних і промислових умовах. Узагальнив результати теоретичних і експериментальних досліджень, взяв участь в їх впровадженні у співавторстві. Внесок здобувача в роботах, опублікованих разом зі співавторами, представлений в анотаціях до списку опублікованих праць за темою дисертації.

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

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

Структура і обсяг роботи. Дисертація складається зі вступу, п'яти розділів, списку використаних джерел та додатків. Загальний обсяг роботи 287 сторінок, в тому числі 132 сторінки основного тексту, 107 рисунків, з яких 67 на 57 окремих сторінках і 20 таблиць, з яких 11 на 12 окремих сторінках, список використаних джерел з 176 найменувань і 10 додатків на 47 сторінках.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтовано актуальність теми та показано зв'язок дисертаційної роботи з науковими програмами, планами і темами. Сформульовано мету роботи і завдання, що можуть бути вирішені, дана характеристика об'єкту, предмету і методів дослідження, відзначено особистий внесок здобувача, показані наукова новизна і практична корисність отриманих результатів, а також їх апробація і промислове використання.

В **першому розділі** зроблено огляд технологій, обладнання, методів розрахунку і перспективи розвитку багатороликових листопривальних машин.

Дефекти, пов'язані з порушенням форми та площинності готового металопрокату, можна умовно розділити на три основні групи, а саме на викривлення поперечного перетину, викривлення по довжині і його скрученість.

Найбільше поширення для правки листів і штаб одержали багатороликові машини, правка в яких здійснюється багаторазовим знакозмінним вигином смуги між розташованими в шаховому порядку робочими роликами. Найбільше ефективно на цих машинах усувається хвилястість і поздовжня кривизна гарячекатаних листів і штаб.

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

Вченими та спеціалістами наукових шкіл під керівництвом Дунаєвського В. І., Корольова А. А., Кузьміна А. Д., Лапшева Л. Л., Луговського В. М., Мошніна Є. М., Недорезова І. В., Слоніма О. З., Смірнова В. В., Соніна А. Л., Химіча Г. Л., Целікова О. І., Чекарьова О. П. та інших розроблені і широко використовуються інженерні методи розрахунку технологій та обладнання для реалізації процесів правлення. Однак дані методи через низьку інформативність і велику кількість припущень не можуть бути використані для моделювання процесу правки зі згином робочого ролика.

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

У даний час найбільше поширення одержали математичні моделі, засновані на використанні методу скінчених елементів. Розроблений ряд пакетів програм, що реалізують зазначений метод як для дослідження процесів пластичної деформації, так і для розрахунків напружено-деформованого стану деталей і вузлів машин. До перших відносяться програми, серед яких найбільше поширення одержали DEFORM, QFORM, ABAQUS. Найпоширенішим для розрахунків устаткування є програмний продукт SolidWorks. У той же час низка питань, таких як правка нерівномірно розподілених по ширині дефектів площинності, для яких використання МСЕ представляється найбільш раціональним, залишаються невирішеними.

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

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

У **другому розділі** обґрунтовано вибір напрямків, методів теоретичних і експериментальних досліджень в області правки гарячекатаних листів.

В якості основного напрямку теоретичних і експериментальних досліджень процесів правки гарячекатаних листів слід розглядати розширення сортаменту листоправильних машин, підвищення якості готової продукції за рахунок усунення дефектів не тільки хвилястості, але і коробуватості, а також зниження собівартості продукції за рахунок підвищення виходу придатного і зниження капітальних витрат. Це можливо на основі удосконалення існуючих і створення нових високоефективних технологій і обладнання.

З огляду на недоліки існуючих методів розрахунків процесу правки листів необхідною є розробка математичних моделей для прогнозування показників якості листів при диференційованому додатку сили по довжині робочих роликів, в тому числі й на основі дослідження моделей листів з реальними дефектами і поздовжньої, і поперечної хвилястості, що можливе на основі тривимірних моделей з використанням методу скінченних елементів. Також актуальною є розробка швидкодіючих математичних моделей з використанням методів регресійного моделювання, необхідних для автоматизованих систем управління листопривальною машиною, а також для вирішення завдань оптимізаційного плану з визначення раціональних технологічних режимів і конструктивних параметрів обладнання для правки листового металопрокату.

Для оцінки достовірності отриманих теоретичних рішень проведено експериментальні дослідження в промислових і лабораторних умовах з найбільш повним охопленням досліджуваних параметрів і технологічних схем з відповідною статистичною обробкою, у тому числі на спеціально спроектованому обладнанні.

В **третьому розділі** розроблено математичні моделі енергосилових і геометричних параметрів процесу правки гарячекатаних листів.

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

Для спрощення моделі та зниження трудомісткості обчислень був прийнятий ряд припущень внаслідок малих кутів нахилу листа, а саме з геометричної лінійності задачі, що дозволяє описувати кривизну спрощеною формулою, а також з правомірності кусочно-лінійної апроксимації епюри згинальних моментів при вертикальному напрямку реакцій роликів.

В якості деформаційних показників процесу правки використовували кривизну вигину середнього шару листа, яка вважається позитивною, якщо за напрямком вона збігається з кривизною контактної поверхні самого ролика. Відповідно до кривизни визначали знак згинального моменту.

Методика розрахунків була розроблена для прямої постановки задачі, метою якої є рішення системи рівнянь моделі відносно невідомих кутів заходу та сходу листа відносно контактної поверхні робочого ролика та моментів згину при заданих перекриттях роликів і визначення геометричних характеристик нейтральної лінії листа при правці. У ході рішення, крім моментів на роликах, обчислюються також невідомі значення кривизни в рекурентній формі.

У викладеній в розділі методиці розрахунків використовується ітераційна схема рішення.

На початку розрахунків перевіряється геометрична умова допустимості заданих перекриттів.

Закладений в методиці вплив перегинів листа на кожному з робочих роликів листопривальної машини дозволяє оцінити ступінь ефективності застосовуваного технологі-

чного процесу, а також розробити рекомендації з його вдосконалення. При цьому математична модель дозволяє використовувати в якості вихідних даних будь-яке технологічне налаштування робочих роликів від паралельного до індивідуального.

Як приклад на рис. 1 представлені розрахункові розподіли різниці у витяжках по середині листа та по його хвилястих краяхах. Дані залежності були використані в якості вихідних даних при реалізації тривимірної моделі процесу правки.

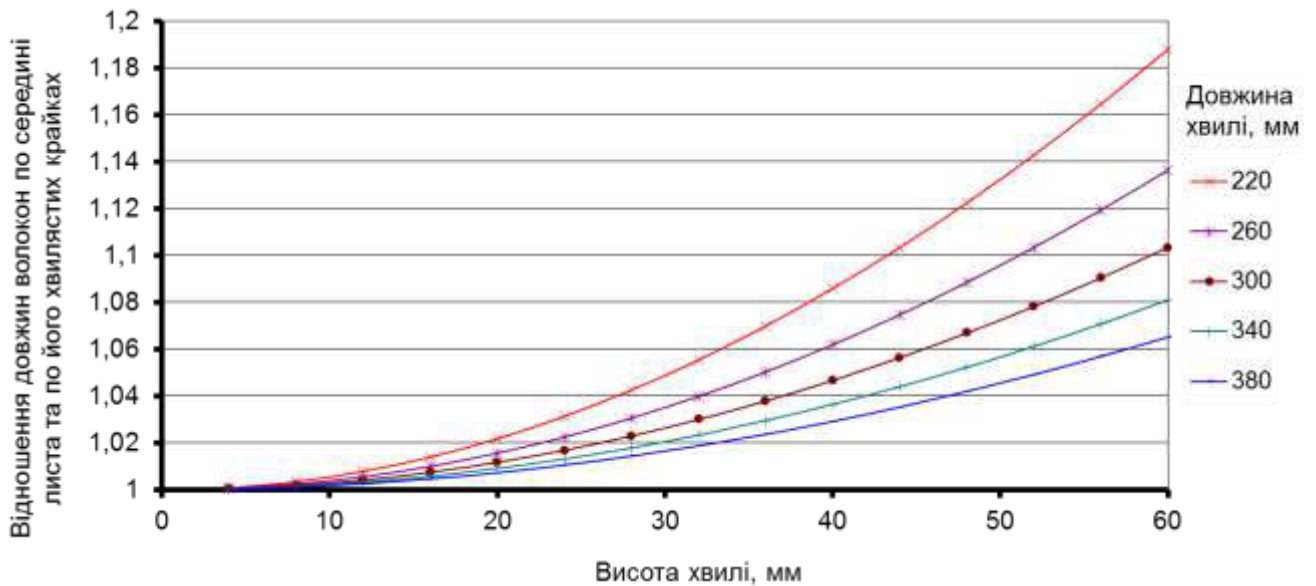


Рисунок 1 – Залежність різниці у витяжках по середині листа та по його хвилястих краяхах від висоти та довжини хвилі
($n = 13$; $h = 4$ мм; $d = 210$ мм; $t = 230$ мм; $b = 2000$ мм; сталь 08кп)

Як приклад чисельної реалізації розроблених програмних засобів на рисунках 2...3 представлені розподіли сил правки та відносної кривизни листа по роликах правильної машини при правці листів товщиною 4 мм стосовно до умов реалізації процесу на листо-правильній машині 13×210×2800 лінії обробки листів.

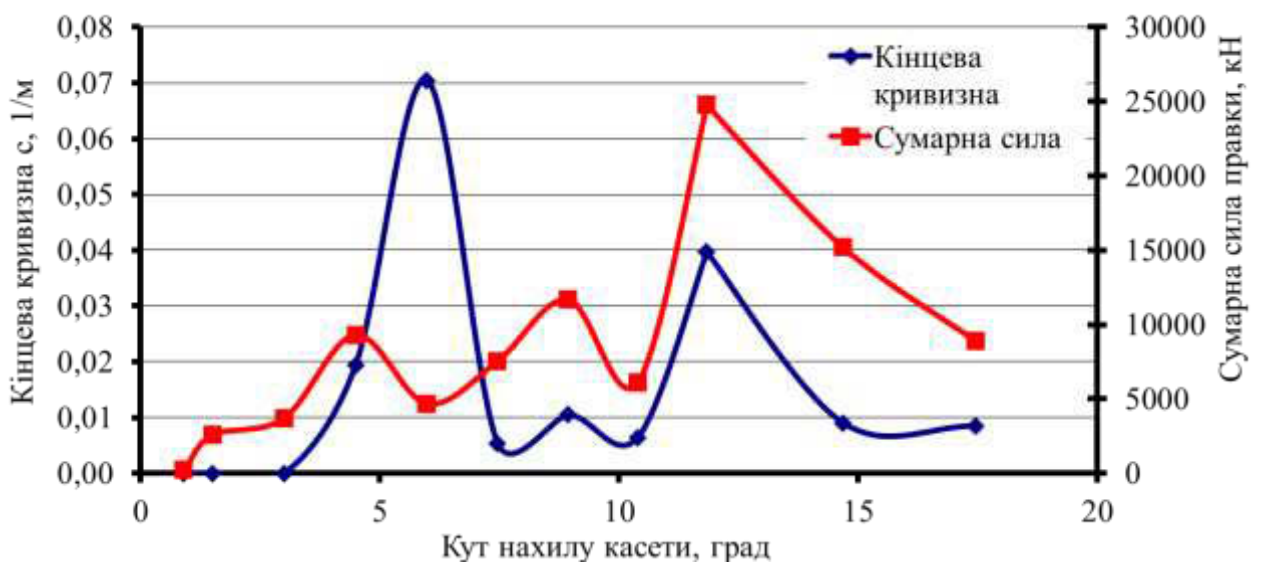


Рисунок 2 – Розрахункові розподіли кінцевої відносної кривизни та сумарної сили правки від кута нахилу касети ($n = 13$; $h = 4$ мм; $d = 210$ мм; $t = 230$ мм; $b = 2000$ мм; сталь 08кп)

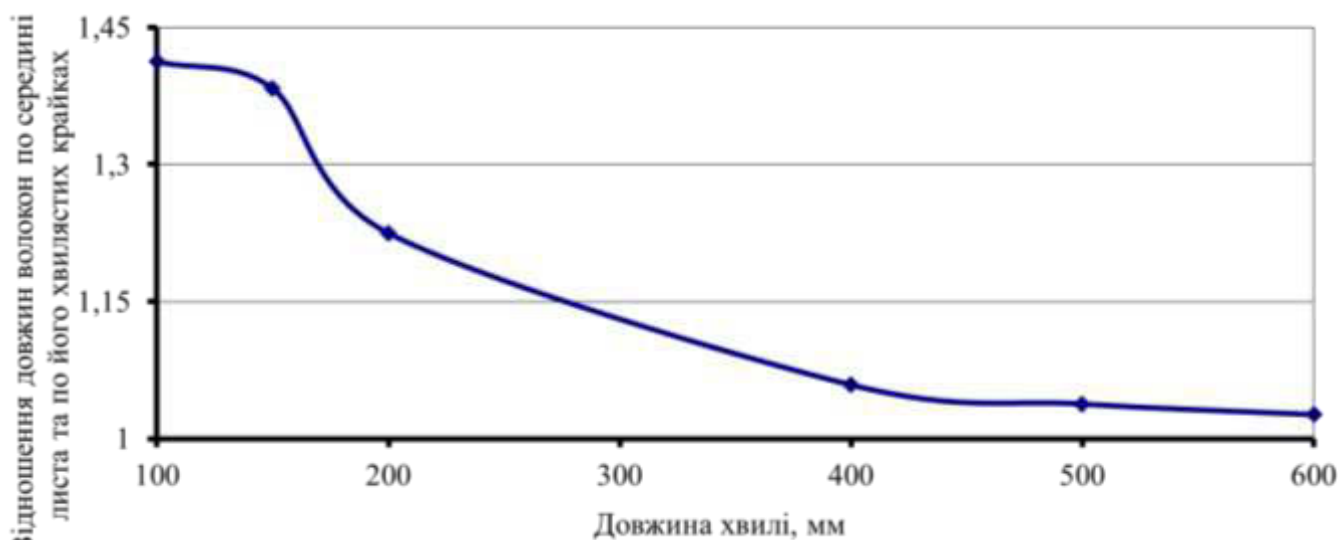


Рисунок 3 – Залежність відношення довжин волокон по середині листа та по його хвилястих крайках від довжини хвилі
($n = 13$; $h = 4$ мм; $d = 210$ мм; $t = 230$ мм; $b = 2000$ мм; сталь 08кп)

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

- зі збільшенням товщини листів та зменшенням межі плинності матеріалу при одних і тих же конструктивних параметрах ЛПМ кінцева кривизна листів збільшується, що необхідно враховувати при проектуванні нового обладнання під заданий сортамент і визначенні його технологічних можливостей;

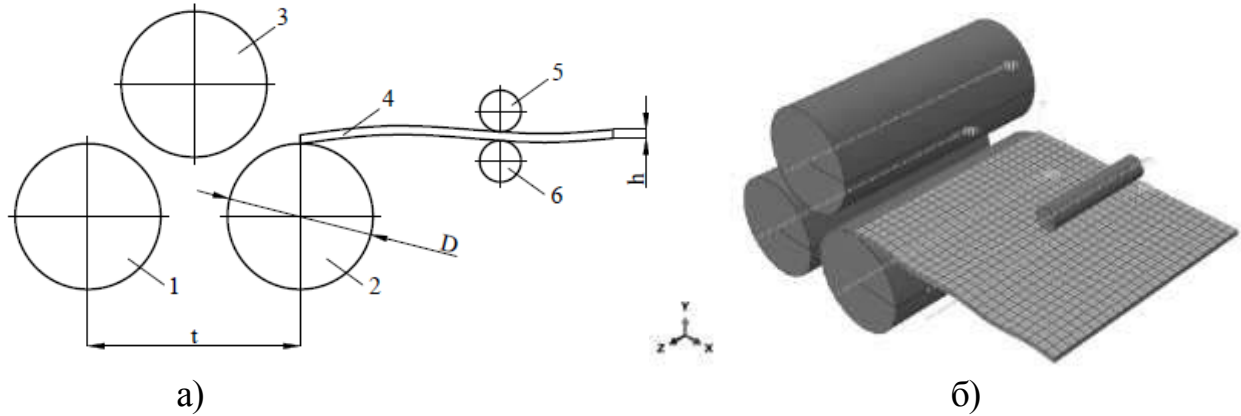
- зі збільшенням крайової хвилястості листів при одних і тих же налаштуваннях ЛПМ різниця в подовженні волокон по середині листа і його крайках збільшується, що підвищує ефективність процесу, проте кінцева кривизна листів також зростає, але з меншою інтенсивністю (див. рис. 1);

- зі збільшенням перекриття роликів (умовно кута нахилу касети, оскільки використовувалося індивідуальне налаштування роликів) кінцева кривизна листів змінюється нерівномірно з яскраво вираженими мінімумами функцій, що свідчить про необхідність вирішення задач оптимізаційного плану з визначення перекриття роликів залежно від параметрів вихідного листа (див. рис. 2);

- зі збільшенням довжини хвилі крайової хвилястості листів різниця в подовженні волокон посередині і крайках листа зменшується, що свідчить про необхідність врахування крім амплітуди хвилі і цього параметра при визначенні налаштувань роликів (див. рис. 3).

Розроблена чисельна аналітична модель має низку переваг, а саме: відносна простота, достатня точність і низькі витрати машинного часу, що дозволяє її використовувати не тільки при вирішенні задач оптимізаційного плану (зокрема при проектуванні конструктивних параметрів ЛПМ і налаштувань робочих роликів), а й в автоматизованій системі керування ЛПМ. Однак при вирішенні задач в тривимірній площині для визначення величини згину робочих роликів при усуненні дефектів хвилястості листів ця модель непридатна внаслідок прийнятих припущень про взаємозв'язок між подовженнями волокон по ширині прокату і може бути використана лише для критеріальної оцінки.

Тому було виконано дослідження напружено-деформованого стану металу при виправленні поздовжньої та поперечної кривизни листів з використанням методу скінчених елементів у системі Abaqus CAE. Розроблена стосовно до аналізу процесу правки листів на правильних машинах розрахункова схема являла собою лист 4, три робочих 1-3 і два 5, 6 напрямних ролика (рисунок 4).



а)

б)

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

Рисунок 4 – Розрахункова (а) і скінчено-елементна в глобальній системі координат (б) модель процесу правки листів на листопрямильних машинах

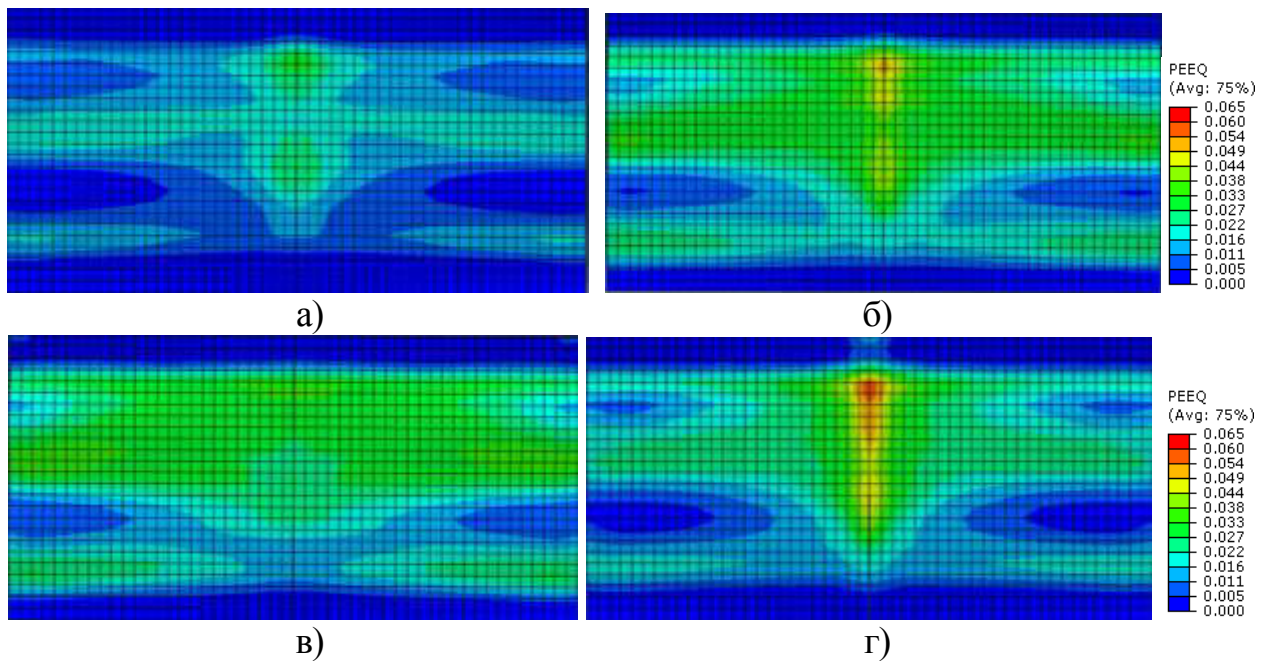
При дослідженні використовувалася площина симетрії, що дозволило скоротити час розрахунків. Для моделювання роликів були використані тривимірні жорсткі елементи. Для моделювання вигину осі робочих роликів їх бочка була виконана опуклою. Для дослідження процесу правки крайової хвилястості використовували модель листа, отриману в пакеті Solidworks (рисунок 5).



Рисунок 5 – Модель листа з крайовою хвилястістю

Розрахунки були зроблені для різних перекриттів і різного вигину бочки роликів. На рисунку 6 представлені поля розподілу еквівалентних деформацій по поверхні листа при різних перекриттях (а-б) і вигинах робочих роликів (в-г).

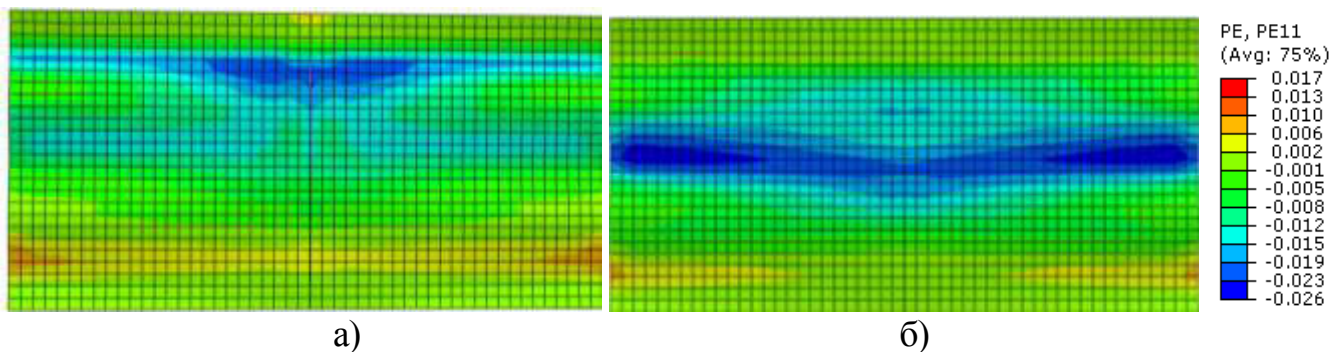
З аналізу представлених розподілів видно, що зі збільшенням величини перекриття роликів W (рис. 6, а, б) еквівалентна деформація в середній частині листа (пласка ділянка) зростає, а характер розподілу визначається положенням хвилястості бічних крайок. Зокрема, при збільшенні перекриття з 3 до 10 мм максимальне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



а – $W=3$ мм, $dW=2$ мм; б – $W=10$ мм, $dW=2$ мм;
в – $W=10$ мм, $dW=0$ мм; г – $W=10$ мм, $dW=5$ мм

Рисунок 6 – Поля розподілу еквівалентних деформацій (PEEQ) по поверхні листів при різних перекриттях (а, б) і вигинах (в, г) робочих роликів

На рисунку 7 представлені розрахункові розподіли поздовжньої деформації по нижній поверхні листів при різних вигинах робочих роликів. З аналізу даних розподілів можна зробити висновок, що при правці листів з крайовою хвилястістю спостерігаються чергування деформації стиску та розтягання по довжині листа. При цьому при збільшенні вигину ролика підвищується різниця деформації середніх і крайніх ділянок листів.



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

Рисунок 7 – Поля розподілу поздовжньої деформації (PE11) на контактній поверхні листів залежно від величини вигину робочих роликів

На рис. 8 представлені розрахункові розподіли крайової хвилястості листів залежно від величини вигину роликів dW . У зв'язку з більшими витратами машинного часу на розрахунки був розглянутий лист довжиною, рівною подвійному кроку правильної машини, що привело до деякого викривлення даного результату по першій і третин хвилі через неповну обробку переднього та заднього кінця листа.

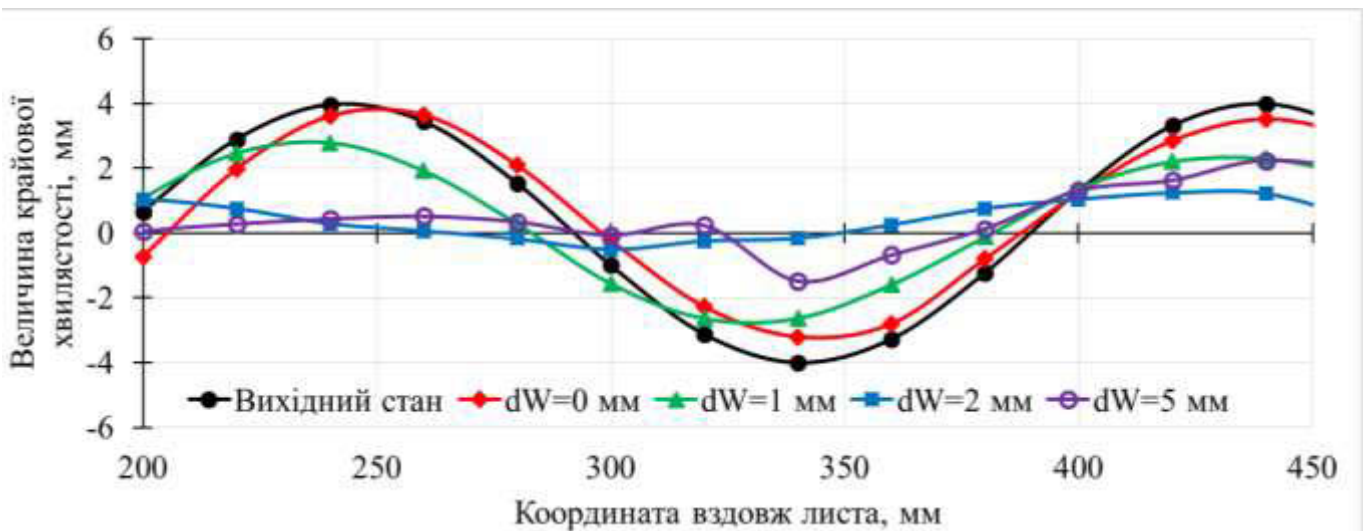


Рисунок 8 – Розподіл крайовій хвилястості листів до та після правки при різних вигинах робочих роликів

З аналізу представлено на рис. 8 розподілу, видно, що зі збільшенням вигину ролика крайова хвилястість зменшується. Зокрема, при відсутності вигину висота хвилі зменшувалась з 4,0 мм до 3,65 мм, при вигині 1 мм – до 2,8 мм, при вигині 2 мм – до 1,04 мм, при вигині 5 мм – до 0,52 мм. Даний факт підтверджує вплив величини вигину ролика на правку хвилястості листів і можливість використання даного підходу для підвищення якості правки, а також використовувати отримані залежності для визначення раціональної величини згину робочих роликів для виправлення хвилястості. Ця модель була взята за основу при побудові регресійної моделі для визначення кінцевої кривизни листів з дефектами хвилястості.

В **четвертому розділі** представлені результати експериментальних досліджень процесів правки гарячекатаних листів на листопробірних машинах з диференційованим додатком сили правки по ширині прокату.

З метою оцінки ступеня вірогідності отриманих математичних моделей, а також уточнення вихідних передумов для їхньої чисельної реалізації, експериментальні дослідження процесу холодної правки на листопробірних машинах з диференційованим додатком сили правки по ширині смуги в лабораторних умовах були проведені з використанням спеціально спроектованої експериментальної установки для правки з 9-ма правильними роликками діаметром 100 мм, розміщеними в робочій клітці правильної машини з кроком 105 мм.

На даній експериментальній установці були проведені дослідження з примусовим вигином ролику із застосуванням профільованого робочого ролика. В першому випадку для забезпечення різного подовження волокон по ширині було виготовлено спеціальне пристосування для диференційованого додатку сили до ролика листопробірної машини (рис. 9).

При проведенні експериментальних досліджень в якості зразків використовували сталеві листи перерізом 2,5×152 мм, а також листи зі свинцю перерізом 10×200 мм. Для визначення подовження волокон листа, на його поверхні були нанесені мітки, відповідні довжинам волокон. Різниця довжин волокон сталевих листів при виправленні до та після



а)

б)

Рисунок 9 – Загальний вигляд листопрямуючої машини (а) і спеціального пристосування для диференційованого додатку сили до ролика листопрямуючої машини (б)

додатка диференційованої сили правки на базі 900 мм у середньому складала 1 мм для сталевих листів і 4 мм на базі 500 мм для свинцевих листів, що безпосередньо впливає на зменшення хвилястості листів і підтверджує ефективність застосування даної технології.

Співставлення експериментальних даних процесів правки сталевих зразків з результатами розрахунків свідчать про якісну та кількісну відповідність. Погрішність розрахунків сили правки на третьому ролику не перевищила 15,3% при середньоквадратичному відхиленні 5,9%, а на 5-му ролику – 22,4% при середньоквадратичному відхиленні 9,2%. Погрішність розрахунків різниці довжин волокон для сталевих листів не перевищила 12,9%, а для свинцевих – 11,34%. Порівняння свідчить про достатній ступінь вірогідності розроблених математичних моделей і можливості застосування їх на діючому промисловому устаткуванні.

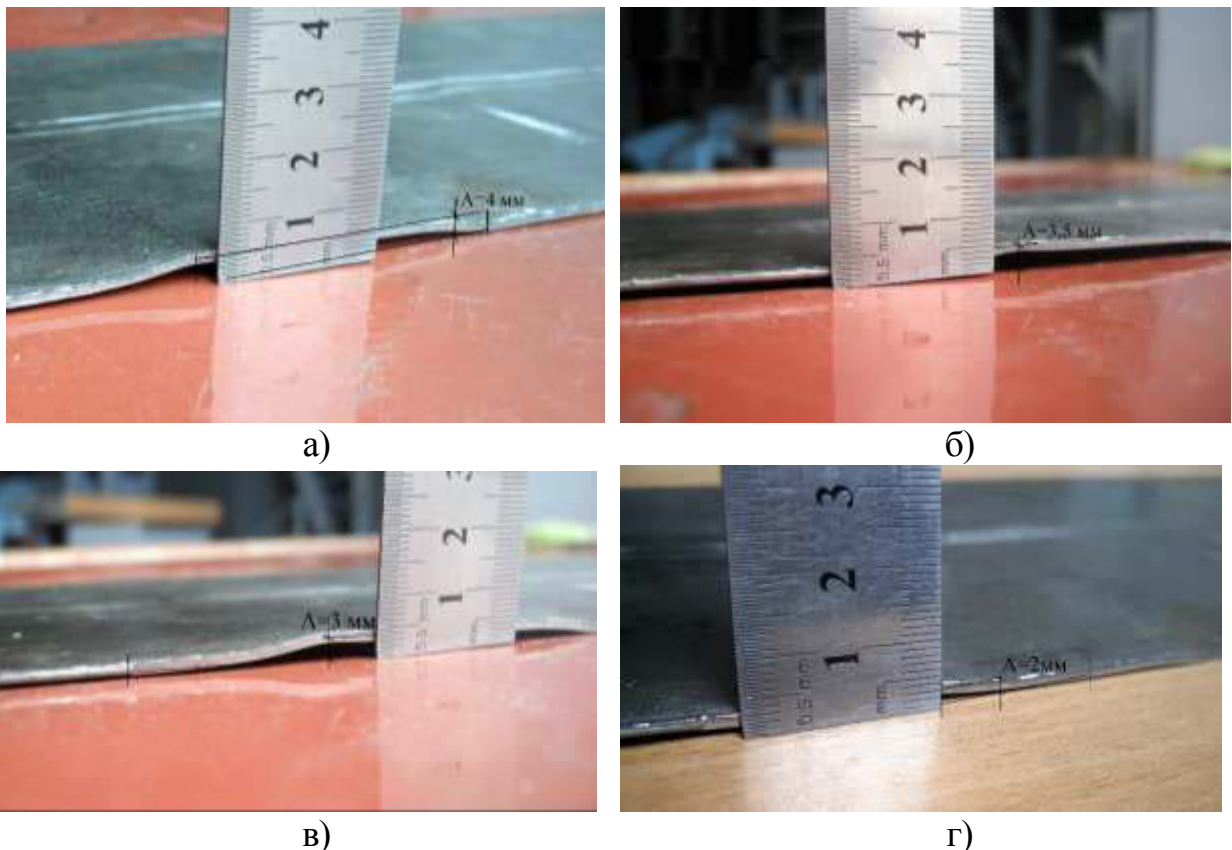
Для виявлення більш повної картини були також проведені дослідження правки листів у роликах з бочкоподібною формою робочої поверхні, що дозволяє в достатній мері імітувати вигин по центру ролика (рис. 10, а). Для експериментальних досліджень в якості зразків використовували сталеві листи розміром 2,5×150×900 мм (рис. 10, б), на крайках яких механічним способом виконували хвилястість. Матеріал листів – сталь 45. Так як подовження волокон у центральній частині сталевих листів при правці з бочкоподібним роликом на базі 900 мм не перевищує 1 мм, для більшої наочності правки дефекту була отримана вихідна хвилястість з амплітудою в діапазоні $A = 2,3 \dots 4$ мм. Усього було виправлено по 10 зразків.

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



Рисунок 10 – Загальний вигляд роликової системи листопрямуючої машини з 3-м роликком бочкоподібною форми (а) та сталевго зразка з хвилястою крайкою

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



а – вихідна хвилястість; б – хвилястість після 1-го проходу;
в – після 2-го проходу; г – після 3-го проходу
Рисунок 11 – Зміна амплітуди хвилястості на крайках листа

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

З метою 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.

В керуючу програму ЛПМ було встановлено програмні засоби на основі описаних у розділі 3 математичних моделей. Якість виправленого металу оцінювалася працівниками ОТК цеху згідно діючих стандартів і умов. Записи енергосилових і кінематичних параметрів процесу фіксувалися протоколами системи ІВА. Після розшифрування та зіставлення даних з інформацією рапортів прокатки у чистовій кліті (даних про геометричний і марочний сортамент прокатаного металу) аналізувалася відповідність результатів розрахунків енергосилових параметрів і їх фактичних значень.

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. Листи укладали цеховим краном на рольганг перед листоправильною 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 рис. 12 показаний принцип вимірів дефектів площинності на прикладі листа товщиною 16 мм зі сталі 3сп. Поверхня листа мала поздовжню хвилю величиною до 32 мм/м, а також коробуватість у хвостовій частині листа порядку 12 мм на ширині 2 м. Зафіксовані дефекти на поверхні листів відзначалися крейдою з вказівкою виду дефекту. У результаті правки площинність оброблених листів була доведена до показників, що задовольняють вимогам ГОСТ і навіть перевищуючих їх (рис. 13). В основному правка виконувалася за один прохід.



а)



б)

Рисунок 12 – Виміри товщини металу, що виправляється, і вихідних дефектів площинності: а – хвилястості, б – коробуватості



а)



б)

Рисунок 13 – Виміри дефектів площинності листа після правки:
а – хвилястості, б – коробуватості

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 без зауважень з боку ОТК цеху підтвердила можливість застосування розробленої одномірної математичної моделі в системах автоматизованого керування устаткуванням для гарячої та холодної правки листів.

В **п'ятому розділі** розглянуто автоматизоване проектування технологічних налаштувань листопрямуючої машини з диференційованим додатком сили правки по ширині листів.

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

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

Вивчаючи досвід експлуатації устаткування, для полегшення завдання металу в правильну машину перший по ходу металу ролик - верхній доцільно встановлювати на товщину металу, а значення прогину металу першими роликами на вході в машину:

$$f_3 = \frac{\sigma_s t^3}{KEh},$$

де σ_s – напруження плинності матеріалу прокату, що правиться, МПа; t – крок роликів правильної машини, мм; E – модуль пружності, МПа; h – товщина прокату, мм; K – коефіцієнт проникнення пластичної деформації.

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

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

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

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

Для отриманих координат знову проводиться повтор третього етапу.

Після того, як залишкова поздовжня кривизна листа ввійде в інтервал припустимої кривизни, перевіряється показник форми листа і якщо буде потреба – проводять вигин ролику №3. Величину вигину збільшують з мінімально можливою до максимально припустимої з умов міцності цього ролику. У випадку задовільного показника форми листа цей етап припиняють, в противному випадку при максимальному вигині поточного ролика починають процедуру вигину наступного по ходу ролика.

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

Скінченно-елементні моделі у зв'язку з великими витратами машинного часу при рішенні задач оптимізаційного плану використовувати недоцільно. В роботі ці моделі було замінено регресійними, які були отримані на основі методу планованого експерименту. Серед великої кількості факторів, що впливають на процес правки, в результаті досліджень було знайдено п'ять: ширина листа (B), його товщина (h), і початкова різниця витяжок (λ_0); величина перекриття (W) і різниця перекриттів по ширині бочки робочого ролика (ΔW). Для нелінійної моделі з п'ятьма факторами був застосований план Хартлі.

У результаті обробки результатів скінченно-елементної моделі були отримані коефіцієнти рівняння регресії. Визначення коефіцієнтів регресійного рівняння здійснювали з а допомогою розробленої у середовищі PTC Mathcad математичної моделі.

Аналіз коефіцієнтів рівняння регресії показує, що на зниження кінцевої різниці витяжок (правки крайової хвилястості) переважний вплив виявляє різниця перекриттів. Товщина листа та відносне перекриття на правку листа впливають рівною мірою.

По отриманій регресійній моделі встановлено, що істотний вплив на правку листа оказує різниця прогинів ролика, яким здійснюється безпосередньо правка. Зі збільшенням різниці перекриття, перекриття, товщини листа і його ширини, кінцева різниця витяжок 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. Вихідна різниця витяжок також впливає на правку листа. Зі збільшенням вихідної різниці витяжок зростає й різниця витяжок після правки при тих самих умовах процесу.

На рис. 14 представлені результати розрахунку стосовно процесу правки листа 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 величиною хвилястості, що дорівнює $A = 60$ мм / м. З аналізу даних залежностей можна зробити висновок про зменшення хвилястості листа при збільшенні вигину та перекриття роликів. При цьому розрахунки показують, що при даній хвилястості одноразовим вигином роликів досягти необхідної хвилястості крайок ($A < 8$ мм / м) є неможливим. Найбільш значущим фактором при цьому є зменшення параметра W/h до рівня 0,25, який досягається, як правило, третім роликком та обмежується нормованим коефіцієнтом проникнення пластичної деформації. При цьому, як показують розрахунки необхідний рівень площинності ($\Phi = 0,1 \dots 1,0$) можна досягти вигином робочих роликів на рівні 1,5...2,0 мм.

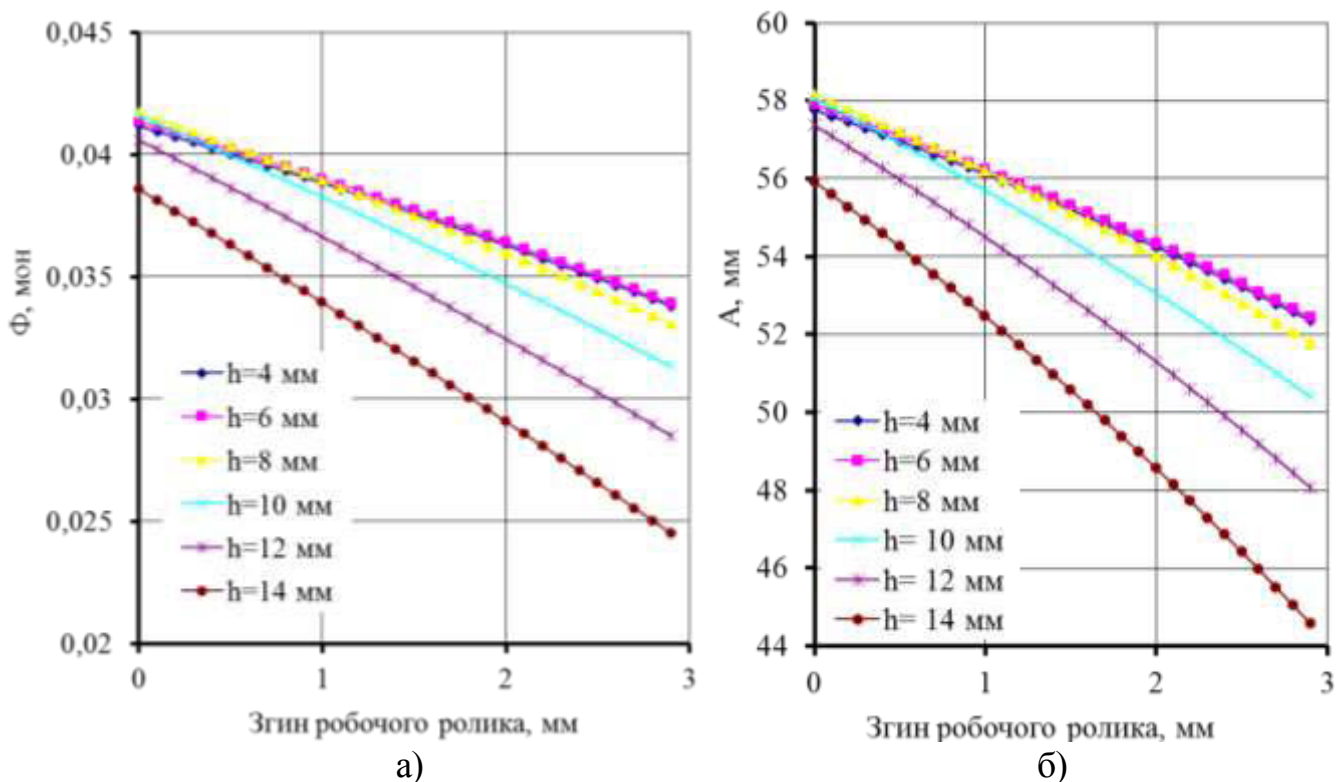


Рисунок 14 – Залежність показника площинності (а) амплітуди крайової хвилястості (б) листа від вигину робочих роликів

Відмінною особливістю листоправильної машини з диференційованим додатком сили правки є усунення хвилястості прокату, яке досягається шляхом вигину робочих роликів на величину, яка визначається положенням опорних роликів, перебування яких і є задачею автоматизованого проектування технологічних налаштувань машини при правці.

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

1. Знаходження налаштування робочих роликів, які забезпечують виправлення позовжньої кривизни прокату.

2. Визначення максимально можливого вигину робочих роликів з умови міцності.

3. Коригування максимального вигину робочих роликів з умови забезпечення їх контакту з опорними під дією сили правки.

4. Почергове, починаючи з 3-го ролика, збільшення вигину ролика dW від нульового значення до максимально можливого.

5. Визначення на основі регресійних залежностей показників площинності прокату.

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

Даний алгоритм був покладений в основу програмних засобів з автоматизованого розрахунку технологічних налаштувань правильної машини.

Як приклад реалізації розроблених програмних засобів на рисунку 15 представлені розрахункові розподіли показників форми листа по роликам правильної машини в залежності від положення та вигину робочих роликів.

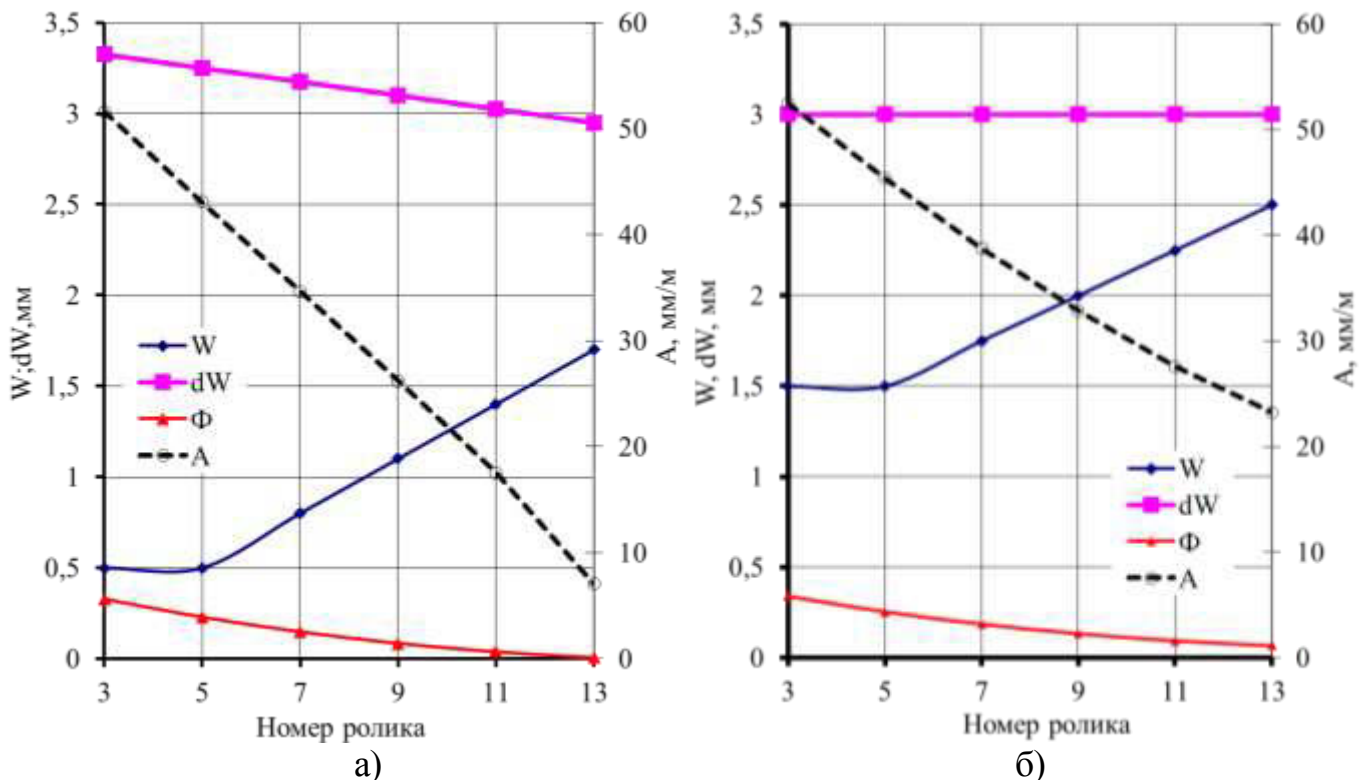


Рисунок 15 – Розподіл показника форми листа Φ , амплітуди хвилястості A в залежності від положення W та вигину dW робочих роликів при змінному (а) та постійному (б) прогині робочих роликів ($h=5$ мм, $b=2000$ мм)

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

Розроблений алгоритм автоматизованого проектування технологічного налаштування роликів був реалізований в якості програмного продукту та інтегрований в систему автоматизованого управління листопрямильної машини правки гарячекатаних листів, що входить в лінію товстолистового прокатного стану 2850 конструкції НКМЗ. На основі розробленої чисельної одновимірної математичної моделі був проведений аналіз можливих режимів правки листів з матеріалів з різними характеристиками міцності, що дозволило визначити найбільш навантажені елементи конструкції при різних поєднаннях вихідних параметрів. Був зроблений вибір основних конструктивних параметрів вузла станин ЛПМ, що забезпечило, у порівнянні з конструкцією-аналогом, більш високу 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. В цьому випадку при збереженні жорсткості, зниження металоємності склало до 40% в порівнянні з конструкцією-аналогом.

В рамках роботи було розроблено конструкцію комплекту касет для багатороликової ЛПМ агрегату поперечного різання конструкції НКМЗ. На рисунку 16 представлено тривимірну модель нового комплекту касет.

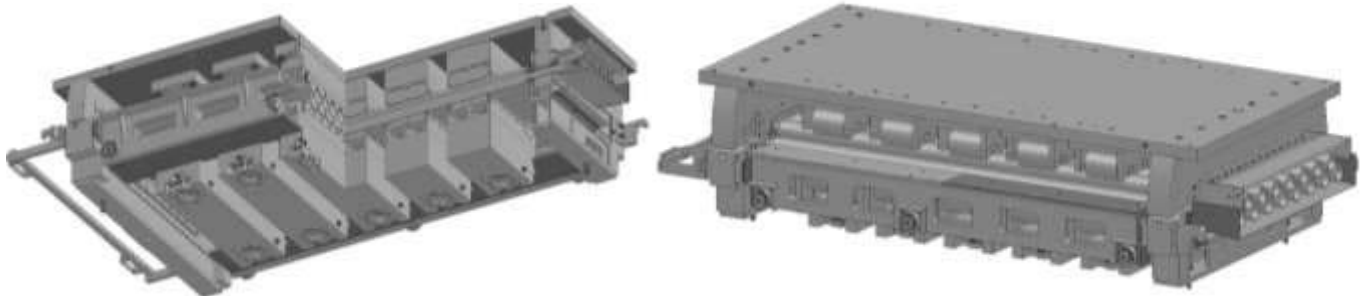


Рисунок 16 – Новий комплект касет багатороликової ЛПМ агрегату поперечного різання конструкції НКМЗ

В новій конструкції з'явилась можливість здійснювати вигин робочих роликів нижньої касети завдяки розташуванню блоків з опорними роликами на парах клинів, один з яких є приводним і переміщується вздовж напрямку переміщення металу, а інший, безпосередньо контактуючий з блоком опорних роликів, вздовж вертикальної площини. Завдяки розрахованому вертикальному переміщенню кожного з п'яти блоків опорних роликів вони встановлюються, утворюючи необхідну, в залежності від заданої початкової кривизни, опорну поверхню для робочих роликів. Таке рішення дозволило знизити кількість відбракованої продукції за показником площинності та підвищити надійність роботи агрегату в цілому завдяки зниженню рівня коробуватості металу, що раніше також впливало і на прохідність полоси через машини агрегату. Вибір основних конструктивних параметрів нового комплекту касет здійснювався з використанням виконаних результатів досліджень.

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 і проектування, підвищення ступеня наукової обґрунтованості прийнятих технічних рішень, а також на основі розробки, дослідження і впровадження конкретних практичних рекомендацій. Розвиток теоретичних методів розрахунку правки на багатороликових листопробних 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 листопробних машин за допомогою контрольованого вигину робочих роликів. В даний час цей напрям вивчено недостатньо, що обумовлює актуальність проведення дослідження процесу правки гарячекатаних листів.

2. Вперше на основі теоретичного аналізу процесів правки на багатороликових пробних машинах з диференційованим додатком сил правки по ширині листа шляхом аналітичного, скінченно-елементного і регресійного моделювання встановлено, що вигин робочого ролика впливає на виправлення поперечної кривизни листа, зокрема, для забезпечення нормованого стандартми 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. В 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 з теоретичними результатами за залишковою кривизною, відносна похибка теоретичних і експериментальних результатів складає 16%, в той же час для енергосилових параметрів похибка перевищує 20% з більш високими чисельними значеннями теоретичних результатів.

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

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

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

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Straightening of Sheet with Correction of Waviness / A. V. Barabash, **E. Yu. Gavril'chenko**, E. P. Gribkov, O. E. Markov // *Steel in Translation*, 2014, Vol. 44, No. 12, pp. 916–920. DOI: 10.3103/S096709121412002X (зарубіжне видання, Scopus).
2. Грибков Э. П. Математическое моделирование профилирования ободьев колес / Э. П. Грибков, Е. Ю. Гаврильченко, Д. В. Мережко // *Актуальные проблемы в машиностроении*. – Новосибирск : НГТУ, 2016. – № 3. – С. 330–335 (зарубіжне видання).
3. Математическая модель технологических настроек ЛПМ ТЛС 2850 Ашинского металлургического завода для горячей и холодной правки листов / В. А. Федоринов, А. В. Барабаш, **Е. Ю. Гаврильченко** Э. П. Грибков // *Обработка материалов давлением : сб. науч. тр.* – Краматорск : ДГМА, 2014. – № 1 (38). – С. 48–53.
4. Грибков Э. П. Исследование процесса правки волнистости листов на листо-правильных машинах / Э. П. Грибков, **Е. Ю. Гаврильченко** // *Вісник Херсонського національного технічного університету*. – 2017. – № 2 (61). – С. 35–44.
5. Грибков Э. П. Автоматизированное проектирование технологических настроек листопрямляющей машины / Э. П. Грибков, **Е. Ю. Гаврильченко** // *Вісник Національного технічного університету "ХП"*. Серія : Інноваційні технології та обладнання обробки матеріалів у машинобудуванні та металургії. – 2017. – № 37 (1259). – С. 11-16.
6. Программное обеспечение для проектирования технологических параметров настройки многороликовых листопрямляющих машин / Э. П. Грибков, А. В. Завгородний, **Е. Ю. Гаврильченко**, А. С. Горбенко // *Научный вестник Донбасской государственной машиностроительной академии [Электронный ресурс]*. – Краматорск : ДГМА, 2015. – № 2 (17Е). – С. 33–38.
7. Федоринов В. А. Конечно-элементное моделирование процесса правки волнистости на листопрямляющих машинах / В. А. Федоринов, **Е. Ю. Гаврильченко**, А. В. Завгородний // *Обработка материалов давлением : сб. науч. тр.* – Краматорск : ДГМА, 2015. – № 2 (41). – С. 63–68.
8. Добронос Ю. К. Напряженно-деформированное состояние рабочего ролика листопрямляющей машины при холодной правке с дифференцированным приложением силы по ширине листа / Ю. К. Добронос, **Е. Ю. Гаврильченко**, И. А. Матвеев // *Обработка материалов давлением : сб. науч. тр.* – Краматорск : ДГМА, 2016. – № 1 (42). – С. 203–206.
9. Грибков Э. П. Исследование влияния дискретности разбиения объема материала на точность расчета при конечно-элементном моделировании процесса правки толстых листов / Э. П. Грибков, **Е. Ю. Гаврильченко** // *Научный вестник Донбасской государственной машиностроительной академии [Электронный ресурс]*. – Краматорск : ДГМА, 2017. – № 2 (23Е). – С. 4–8.
10. Грибков Э. П. Экспериментальные исследования холодной правки на много-роликовых листопрямляющих машинах / Э. П. Грибков, **Е. Ю. Гаврильченко** // *X International Conference "Strategy of Quality in Industry and Education" June 6-13 2014, Varna, Bulgaria // International Scientific Journal Acta Universitatis Pontica Euxinus. Special Number.* – pp. 53-57. – 978-617-518-288-8.
11. Гаврильченко Е. Ю. Математическая модель технологических настроек листопрямляющей машины для правки продольной и поперечной кривизны листов / **Е. Ю. Гаврильченко** // *Материалы VI Международной научно-технической конференции «Ресурсосбережение и энергоэффективность процессов и оборудования об-*

работки давлением в машиностроении и металлургии», 19-21 ноября, Харьков, 2014.– С. 28–30.

12. Пат. № 82635, Україна, МПК В21D 11/08, В21D 11/128 (2006.01). Спосіб центрування затравки в районі вертикальної тягнучої кліті і район вертикальної тягнучої кліті / **Гаврильченко Є. Ю.**, Гаврильченко О.О., Титаренко О. І., Євгиненко І. О., Смирнов В. Г. ; заявник та патентовласник Закрите акціонерне товариство "Новокраматорський машинобудівний завод". – № а200706726 ; заявл. 15.06.2007 ; опубл. 25.04.2008, Бюл. № 8.

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

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

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

Особистий внесок здобувача в роботах, опублікованих у співавторстві:

[1] – розробка регресійної моделі, обробка результатів досліджень; [2, 4, 7, 8, 9] – розробка скінченно-елементної моделі, обробка результатів досліджень; [3, 5] – розробка алгоритму рішення; [6] – визначення вихідних даних і вимог до програмного забезпечення; [10] – участь в організації та проведенні експериментальних досліджень, статистична обробка отриманих результатів, аналіз результатів.

АНОТАЦІЯ

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

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.03.05 - процеси та машини обробки тиском. – Донбаська державна машинобудівна академія, Міністерство освіти і науки України, Краматорськ, 2018.

В роботі виконано літературний огляд в області листоправильного виробництва. Зроблено аналіз існуючих технологій і обладнання для правки листів. Сучасним способом правки є правка на багатороликових листоправильних машинах з можливістю вигину робочих роликів. Існуючі методи розрахунку не дозволяють вирішувати задачі в тривимірній площині, що потребують такого типу машини.

В роботі було розроблено комплекс математичних моделей, що включає в себе чисельну двомірну аналітичну модель для визначення енергосилових параметрів і геометричних характеристик листів при виправленні поздовжніх дефектів і регресійну модель, отриману методом планованого експерименту на основі тривимірної

скінченно-елементної моделі, які використовуються для визначення тих же характеристик при усуненні поперечних дефектів.

Адекватність розроблених математичних моделей була підтверджена експериментальними дослідженнями процесу правки на спеціально створеній лабораторній установці правильної машини з можливістю вигину робочих роликів. Чисельна аналітична модель була апробована на діючому промисловому обладнанні, а саме на правильній машині ТЛС 2850 конструкції ПрАТ НКМЗ.

Результати роботи у вигляді практичних рекомендацій, технічних рішень і програмних продуктів, були використані на ПрАТ НКМЗ, а також в Донбаській державній машинобудівній академії, що підтверджено відповідними актами про використання.

Ключові слова: правка, листопрямильна машина, математичне моделювання, напружено-деформований стан, технології, обладнання, сортамент, якість, диференціальний додаток сили по ширині листа.

АННОТАЦІЯ

Гаврильченко Е. Ю. Совершенствование процесса правки горячекатаных листов и конструктивных параметров листопрямильных машин для его реализации. – Квалификационная работа на правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.03.05 – процессы и машины обработки давлением. – Донбасская государственная машиностроительная академия, Министерство образования и науки Украины, Краматорск, 2018.

В работе выполнен литературный обзор в области листопрямильного производства. Сделан анализ существующих технологий и оборудования для правки листов, в результате которого установлено, что наиболее востребованным и современным способом правки является правка со знакопеременным изгибом на многороликовых листопрямильных машинах с возможностью изгиба рабочих роликов. Такого типа машины позволяют устранять большее количество дефектов листов. Однако существующие методы расчета не позволяют решать задачи в трехмерной плоскости, что требуют машины такого типа. Также актуальным для моделей является быстрое действие, необходимое для систем автоматизированного управления машиной и решения задач оптимизационного плана при создании нового оборудования.

С этой целью в работе была разработана математическая модель, включающая в себя численную двухмерную аналитическую модель для определения энергосиловых параметров и геометрических характеристик листов при устранении продольных дефектов и регрессионную модель, полученную методом планируемого эксперимента на основе трехмерной конечно-элементной модели, используемой для определения тех же характеристик при устранении поперечных дефектов.

Адекватность разработанных математических моделей была подтверждена экспериментальными исследованиями процесса правки на специально созданной лабораторной установке правильной машины с возможностью изгиба рабочих роликов.

Численная аналитическая модель была апробирована на действующем промышленном оборудовании, а именно на листопрямильной машине (ЛПМ) ТЛС 2850 конструкции ЧАО НКМЗ. Реализация модели позволила снизить металлоемкость

ЛПМ и расширить сортамент выправляемых листов, модель также была внедрена в автоматическую систему управления ЛПМ.

В рамках работы была разработана конструкция комплекта кассет для ЛПМ. В новой конструкции появилась возможность осуществлять изгиб рабочих роликов нижней кассеты. Такое решение позволило снизить количество отбракованной продукции по показателю плоскостности и повысить надежность работы агрегата в целом благодаря снижению уровня коробоватости металла.

Результаты работы, в виде программных продуктов, практических рекомендаций и технических решений были использованы на ЧАО НКМЗ, а также в Донбасской государственной машиностроительной академии, что подтверждено соответствующими актами об использовании.

Ключевые слова: правка, листопрямляющая машина, математическое моделирование, напряженно-деформированное состояние, технологии, оборудование, сортамент, качество, дифференцированное приложение силы по ширине листа.

ABSTRACT

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

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

The work carried out a literature review in the field of production of levelers. The analysis of existing technologies and equipment for straightening plates. A modern way of leveling is leveling on multi-roll leveler machines with the possibility of bending the work rolls. Existing calculation methods do not allow solving problems in a three-dimensional plane that require this type of machine.

In the work a mathematical model was developed that includes a numerical two-dimensional analytical model for determining the power-strength parameters and geometric characteristics of the sheets in correcting the longitudinal defects and the regression model obtained by the planned experiment based on a three-dimensional finite element model used to determine the same characteristics when elimination of transverse defects.

The adequacy of the developed mathematical models was confirmed by experimental studies of leveling on a specially created laboratory installation of leveler machines with the possibility of bending the working rollers.

The numerical analytical model was tested on the existing industrial equipment, namely leveler plate mill 2850 PJSC NKMZ design.

The results of the work, in the form of software products, practical recommendations and technical solutions, were used at the PJSC NKMZ, as well as in the Donbas State Engineering Academy, which is confirmed by the relevant acts of use.

Keywords: levelling, leveler, mathematical modeling, deflected mode, technologies, facility, range, quality.

Підп. до друку 10.10.2018. Формат 60 x 84/16. Ум. друк. арк. 1,1.
Обл. вид. арк. 0,9. Тираж 120 прим. Зам. № 104.

Видавець і виготівник
Донбаська державна машинобудівна академія
84313, м. Краматорськ, вул. Академічна, 72.
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи
ДК №1633 від 24.12.2003.