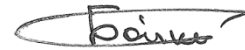


МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
«ДНІПРОВСЬКА ПОЛІТЕХНІКА»

БОЙКО ОЛЕГ ОЛЕКСАНДРОВИЧ



УДК 658.52.011.56:621.771.065

**АВТОМАТИЗАЦІЯ ПРОЦЕСУ КЕРУВАННЯ ВИХОДОМ МІРНОЇ
ПРОДУКЦІЇ НА ОСНОВІ РЕГУЛЮВАННЯ ДОВЖИНИ ПРОКАТУ**

Спеціальність 05.13.07 – «Автоматизація процесів керування»

АВТОРЕФЕРАТ
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Дніпро – 2021

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана на кафедрі кіберфізичних та інформаційно-вимірювальних систем Національного технічного університету «Дніпровська політехніка» (м. Дніпро) Міністерства освіти і науки України.

Науковий керівник:

доктор технічних наук, професор, лауреат державної премії Української РСР в галузі науки і техніки

Куваєв Володимир Миколайович,

Національний технічний університет «Дніпровська політехніка» (м. Дніпро) Міністерства освіти і науки України, професор кафедри програмного забезпечення та комп'ютерних систем.

Офіційні опоненти:

доктор технічних наук, професор

Пазюк Михайло Юрійович, Запорізький національний університет Міністерства освіти і науки України України (м. Запоріжжя), професор кафедри автоматизованого управління технологічними процесами;

кандидат технічних наук, доцент

Багрій Віктор Васильович, Дніпровський державний технічний університет Міністерства освіти і науки України (м. Кам'янське), завідувач кафедри електроніки.

Захист відбудеться «21» грудня 2021 р. о 11 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 08.080.07 при Національному технічному університеті «Дніпровська політехніка» Міністерства освіти і науки України за адресою: 49005, м. Дніпро, пр. Д. Яворницького, 19. тел. +38-056-746-22-00.

З дисертацією можна ознайомитися у бібліотеці Національного технічного університету «Дніпровська політехніка» за адресою: 49005, м. Дніпро, пр. Д. Яворницького, 19. тел. +38-056-746-22-00.

Автореферат розісланий «19» листопада 2021 р.

Вчений секретар спеціалізованої вченої ради Д 08.080.07,
кандидат технічних наук, доцент



І.М. Удовик

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Дрібносортний прокат – один з найбільш масових продуктів металургійної промисловості України, на який присутній постійний попит на світовому ринку, тому він є однією з найбільш затребуваних експортних позицій. На сьогодні даний тип прокату випускають на високопродуктивних безперервних дрібносортних прокатних станах відповідно до вимог стандартів країни замовника. Закордонні виробники забезпечують необхідні якісні показники прокату за рахунок вдосконалення прокатного обладнання та регулярної реконструкції прокатних станів. Основний обсяг мірного прокату виробленого в Україні, припадає на стани введені в експлуатацію у середині минулого століття, які мають відповідний рівень прокатного обладнання. Підтримка високої конкурентоспроможності українського прокату вимагає якнайповнішого використання можливостей існуючого обладнання і технологій тому, що оновлення прокатного обладнання пов'язано зі значними капітальними витратами і зупинкою виробництва для проведення реконструкцій прокатних станів.

Основні витрати при виробництві на безперервних дрібносортних прокатних станах припадають на матеріали вихідної заготовки та складають понад 90 % від собівартості прокату. При виробництві мірного прокату утворюється технологічна обрізь, яка направляється на переплавку, що призводить до втрати товарної продукції, тому питання підвищення виходу мірної продукції є актуальними.

Дослідження, що проводилися в інституті чорної металургії НДІАчормет і Національному технічному університеті «Дніпровська політехніка» показали, що кількість технологічної обрізі може бути скорочена за рахунок використання оптимального розкрійного плану, при цьому вихід мірної продукції збільшується на 4 %. Незважаючи на це залишається обрізь, яка утворюється через неkratність довжини прокату одержуваного з однієї заготовки довжині мірного стрижня.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. В основу дисертаційної роботи покладені матеріали, які узагальнюють дослідження автора у рамках реалізації науково-дослідної роботи спільно з ТОВ НВП «РЕАТЕП» «Виконання автоматичного розкрою заготовки перетином 150X150 на базі автоматичної системи управління швидкісним режимом прокатки (СУРП) в умовах прокатного стану МПС 250/150-6 Прокатного цеха №3» (Контракт №4600028858/4945 від 09.12.2011р. між ПАТ «АрселорМіттал Кривий ріг» і ТОВ «НВП«РЕАТЕП»»). Передача наукових результатів здійснювалася при виконанні Державним вищим навчальним закладом

«Національний технічний університет» роботи «Надання науково – технічних консультацій по управлінню розкромом заготовок на стані ДСДС 250/150-6» ПАТ «АрселорМіттал Кривий ріг» для ТОВ «НВП«РЕАТЕП»» (Договір №070808 від 01.01.2012).

Дисертаційна робота виконана відповідно до досліджень за держбюджетними НДР: «Розробка ресурсо- і енергозберігаючих технологій та устаткування підприємств гірничо-металургійного і паливно-енергетичного комплексу України» (№ держреєстрації 0109U002809), «Підвищення енергоефективності електромеханічного комплексу виробництва сортового прокату» (№ держреєстрації 0113U000410), «Енергозберігаюче управління електромеханічними технологічними комплексами і системами гірничо-металургійної промисловості» (№ держреєстрації 0115U002296), у яких автор брав участь як виконавець.

Мета і задачі дослідження.

Метою дисертаційної роботи є збільшення виходу мірної продукції стану за рахунок регулювання довжини прокату на виході дрібносортового прокатного стану.

Для досягнення поставленої мети виникла необхідність вирішення наступних завдань:

– виконати аналіз технологічного процесу виробництва дрібносортового мірного прокату і особливостей керування роботою прокатного стану для виявлення пріоритетних завдань автоматизації процесу керування виходом мірної продукції;

– дослідити закономірності формування геометричних розмірів перетину прокату з метою визначення методів регулювання довжини прокату;

– дослідити процес керування довжиною прокату через зміну режиму обтиску за наявності системи керування натискними гвинтами, визначити стратегії керування та розробити аналітичні засади побудови системи керування;

– дослідити процес керування довжиною прокату через зміну його натягу за наявності автоматичної системи стабілізації прогину прокату в останньому міжклітьовому проміжку перед випускною кліттю, визначити стратегії керування та розробити аналітичні засади побудови системи керування;

– дослідити процес керування довжиною прокату з метою обґрунтування методу її прогнозування при оперативному регулюванні;

– дослідити динаміку зміни геометричних розмірів перетину прокату у процесі регулювання його довжини.

Об'єкт дослідження – процес виробництва дрібносортового прокату у стрижнях.

Предмет дослідження – автоматизація процесу керування виходом мірної продукції.

Методи дослідження. У дисертаційній роботі використано методи математичної статистики при аналізі можливих розмірів заготовки, методи теорії безперервної прокатки для моделювання процесу прокатки у чистовій групі клітей, розробки аналітичних засад керування довжиною прокату і прогнозування довжини прокату, методи теорії автоматичного керування для моделювання системи керування натискними гвинтами, системи керування швидкістю обертання валків та синтезу задатчика інтенсивності.

Наукові положення, що виносяться на захист:

– регулювання довжини прокату на його середній ділянці, довжина якої розраховується як різниця загальної довжини і суми довжин передньої ділянки пропорційної добутку некомпенсованої сталої часу контуру швидкості обертання валків на лінійну швидкість прокату на виході випускної кліті і задньої ділянки, яка визначається як більше значення довжин останніх трьох міжклітьових проміжків помножене на коефіцієнти витяжок клітей розташованих за кожним з них, забезпечує підвищення точності керування довжиною прокату і збільшення виходу мірної продукції.

– узгодженість швидкостей двох останніх клітей шляхом підтримки стабільного прогину прокату між ними під час прокатки передньої і задньої ділянки прокату та неузгодженість на середній ділянці, яка визначається як добуток узгодженої швидкості обертання валків випускної і передвипускної клітей, підсумоване з уставкою неузгодженості і зміною швидкості обертання валків передвипускної кліті, забезпечує керування довжиною в полі допусків його поперечних розмірів і збільшення виходу мірної продукції.

Наукова новизна отриманих результатів.

1. Вперше встановлені закономірності формування середньої ділянки прокату, за рахунок зміни геометричних розмірів якої, можливо прогнозоване керування його довжиною.

2. Вперше запропоновано керування довжиною прокату через зміну його натягу за наявності автоматичної системи стабілізації прогину прокату перед випускною кліттю шляхом примусового переходу до керованого неузгодженого швидкісного режиму прокатки.

3. Удосконалено задатчик інтенсивності на базі пропорційно-інтегрального регулятора і методики його налаштування, що на відміну від існуючих, забезпечує близьку до максимально можливої інтенсивність зміни

швидкості обертання валків і запобігає перерегулюванню у системі керування довжиною прокату.

4. Удосконалено метод прогнозування довжини прокату на підставі часу проходження розкатом перетину першого міжклітьового проміжку чорнової групи клітей через введення у наступний прогноз корекції за результатами регулювання довжин прокату отриманих при прокатці попередніх заготовок.

Обґрунтованість та достовірність наукових положень та результатів.

Наукові положення і висновки дисертації обґрунтовані результатами перевірки відповідності моделі чистової групи клітей до таблиць калібрування, які використовуються на підприємстві ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг», розбіжність не перевищує 2 % за наявності системи керування натискними гвинтами та 8 % за наявності автоматичної системи стабілізації прогину прокату.

Практичне значення одержаних результатів. Розроблені способи керування довжиною дрібносортного мірного прокату через зміну режиму обтиску або зміну його натягу та структури системи керування довжиною прокату з відповідним програмним забезпеченням, які дозволяють функціонувати системі керування як окремо, так і у складі системи керування швидкісним режимом прокатки або системи керування розкромом прокату, що дозволить підвищити вихід мірної продукції

Основні наукові положення і результати дисертаційної роботи впроваджені на стані ДСДС 250/150-6 ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг» в складі роботи «Виконання автоматичного розкром заготовки перетином 150X150 на базі автоматичної системи управління швидкісним режимом прокатки (СУРП) в умовах прокатного стану МПС 250/150-6 Прокатного цеха №3» (Контракт №4600028858/4945 від 09.12.2011р. між ПАТ «АрселорМіттал Кривий ріг» і ТОВ «НВП«РЕАТЕП»»). Передача наукових результатів здійснювалася при виконанні Державним вищим навчальним закладом «Національний технічний університет» роботи «Надання науково – технічних консультацій по управлінню розкромом заготовок на стані ДСДС 250/150-6» ПАТ «АрселорМіттал Кривий ріг» для ТОВ «НВП«РЕАТЕП»» відповідно до договору №070808 від 01.01.2012. Результати досліджень впроваджені на кафедрі «Автоматизації та комп'ютерних систем» Національного технічного університету «Дніпровська політехніка» у рамках дисциплін «Проектування систем автоматизації», «Проектування автоматичних систем керування технологічними комплексами» при підготовці бакалаврів та магістрів за спеціальністю 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології».

Апробація результатів дисертації. Основні положення та результати дисертаційних досліджень доповідалися та обговорювалися на: XI міжнародній конференції «Проблеми розвитку впровадження інформаційних технологій у наукову та інноваційну сфери освіти» (м. Дніпропетровськ, 2014), XII міжнародній конференції «Проблеми використання інформаційних технологій в освіті, науці та промисловості» (м. Дніпропетровськ, 2016), Дванадцятій міжнародній науково-практичній конференції «Математичне та імітаційне моделювання систем. МОДС 2017» (м. Чернігів, 2017), XVII науково-технічній конференції «Потураївськи читання» (м. Дніпро, 2019), Міжнародній науково-практичній конференції енергозбереження та енергоефективність – 2020. Молодь: Наука та Інновації (м. Дніпро, 2020).

Публікації. За результатами наукових досліджень опубліковано 19 робіт, з них 10 у фахових виданнях з яких 2 статі у журналах, включених до наукометричної бази Scopus, 3 патенти, 5 тез доповідей на конференціях, 1 стаття у науковому виданні.

Особистий внесок автора. Всі наукові положення та результати дисертаційної роботи отримані автором самостійно. Автором адаптована математична модель двохклітьового стану та запропонована на її базі модель чистової групи клітей для дослідження процесу керування довжиною прокату, обґрунтовано стратегії керування довжиною прокату при зміні режиму обтиску прокату та при зміні натягу прокату, розроблена автоматична система стабілізації неузгодженого швидкісного режиму прокатки та задатчик інтенсивності зміни швидкості обертання валків на базі пропорційно-інтегрального регулятора, запропонована структура системи керування довжиною прокату та розроблено програмне забезпечення системи керування.

Структура і обсяг дисертаційної роботи. Дисертація складається зі вступу, чотирьох розділів і висновків, викладених на 161 сторінці машинописного тексту, ілюстрованого 84 рисунками. Робота містить 50 таблиць, список використаної літератури 81 найменування на 9 сторінках і 2 додатки.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтована актуальність роботи, сформульована мета і задачі досліджень, наведено зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Викладені новизна та практична цінність, наведено відомості про рівень апробації одержаних результатів досліджень та кількість публікацій за тематикою дисертаційної роботи. Зазначений особистий внесок здобувача.

У першому розділі розглянуті основні технологічні операції процесу виробництва дрібносортного мірного прокату у стрижнях та системи керування, що застосовуються на станах.

За результатами аналізу технологічного процесу встановлено, що головною проблемою при виробництві мірної продукції є те, що довжина прокату залежить від геометричних розмірів заготовки, які підпорядковуються нормальному закону розподілу. Підвищення виходу мірної продукції може бути досягнуто за рахунок забезпечення керування довжиною прокату, яка виходить з заготовки таким чином щоб з нього після розкрою були одержані прутки кратні довжині мірного стрижня з урахуванням наявності технологічної обрізі.

У результаті подальшого аналізу технологічного процесу встановлено, що керування довжиною прокату забезпечується шляхом зміни його поперечних геометричних розмірів у межах поля допуску, обумовленого відповідними стандартами за рахунок зміни режиму обтиску та швидкісного режиму прокатки в останніх клітках чистової групи.

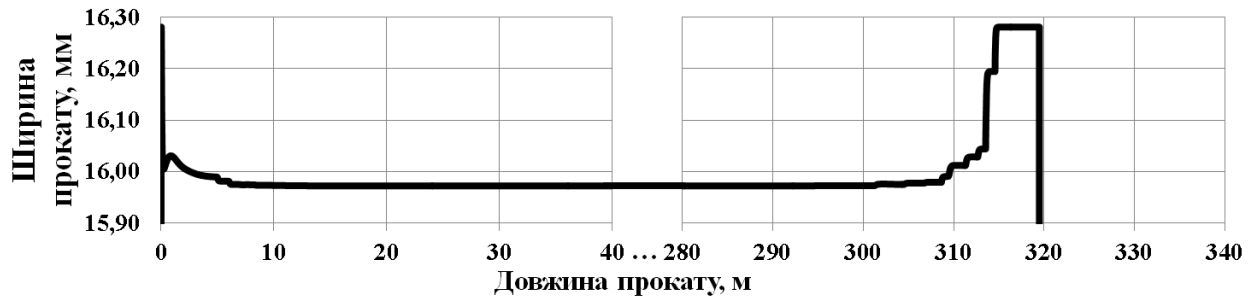
У результаті аналізу існуючих систем керування точністю поперечних геометричних розмірів прокату встановлено, що вони вирішують завдання підтримки його геометричних розмірів шляхом зміни режиму обтиску або зменшення розкиду його геометричних розмірів за рахунок керування швидкісним режимом прокатки. Питання використання даних систем для регулювання довжини прокату раніше не розглядалося. В результаті обґрунтування рішень вищевказаних питань у першому розділі сформульовані мета і завдання дослідження.

У другому розділі запропоновано адаптовану структуру математичної моделі двохклітьового стану, до складу якої увійшли моделі: розкату, кліті, системи керування натискними гвинтами, системи керування швидкістю обертання валків та міжклітьового проміжку. На підставі математичної моделі двохклітьового стану розроблена її програмна модель. Перевірка моделі на відповідність до таблиці калібрування показала розбіжність у 2 %.

На підставі моделі двохклітьового стану розроблено математичну та програмну модель чистової групи клітей. Перевірка моделі на відповідність до таблиці калібрування показала розбіжність у 8 %.

За допомогою моделі чистової групи клітей проведено дослідження процесу формування профілю прокату (рис. 1).

Режим прокатки з натягом



Режим прокатки з прогином

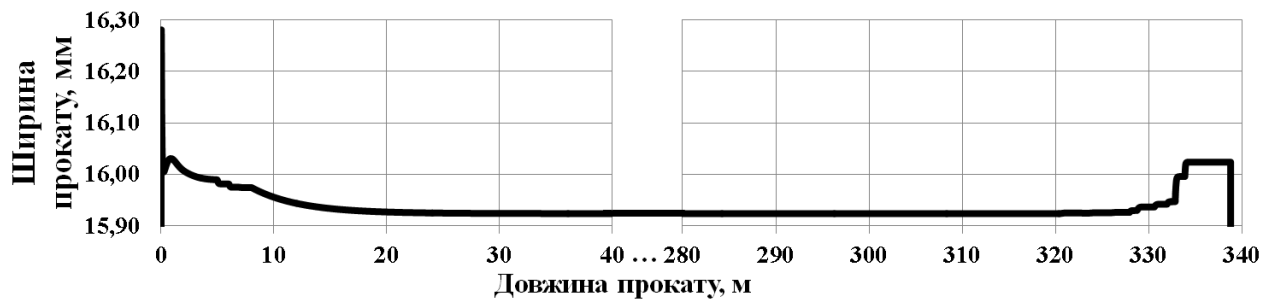


Рисунок 1 – Профілеграми ширини прокату

Проаналізувавши отримані профілеграми встановлено, що різноширинність на передньому кінці прокату формується за рахунок перехідних процесів, які проходять у системі керування швидкістю обертання валків. Основний вплив на її формування здійснюють останні два міжклітьових проміжки чистової групи клітей. Довжина різноширинності є пропорційною добутку некомпенсованої сталої часу контуру швидкості обертання валків та лінійної швидкості прокату на виході випускної кліті:

$$l_{\text{РПК}} = k \cdot \tau \cdot v, \quad (1)$$

де $l_{\text{РПК}}$ – довжина різноширинності на передньому кінці прокату (м), k – коефіцієнт налаштування контуру, τ – некомпенсована стала часу контуру швидкості обертання валків (с), v – швидкість прокату на виході випускної кліті чистової групи клітей (м/с).

Різноширинність на задньому кінці прокату формується у момент прокатки заднього кінця розкату без натягу. Основний вплив на формування різноширинності здійснюють останні три кліті чистової групи. Довжина різноширинності визначається як добуток більшого значення довжин останніх трьох міжклітьових проміжків та коефіцієнтів витяжок клітей розташованих за кожним з них:

$$l_{\text{РЗК}} = \sup \left\{ l_{n-3} \cdot \prod_{i=n-2}^n \lambda_i, l_{n-2} \cdot \prod_{i=n-1}^n \lambda_i, l_{n-1} \cdot \lambda_n \right\}, \quad (2)$$

де $l_{РЗК}$ – довжина різноширинності на задньому кінці прокату (м), $l_{n-1}, l_{n-2}, l_{n-3}$ – довжини міжклітьових проміжків (м), n – номер випускної кліті чистової групи, i – номер кліті, λ_i – коефіцієнт витяжки кліті.

На підставі аналізу різноширинностей та отриманих аналітичних рішень встановлено, що прогнозоване керування довжиною прокату можливо тільки на його середній ділянці:

$$l_{CD} = l - l_{РПК} - l_{РЗК}, \quad (3)$$

де l_{CD} – довжина середньої ділянки прокату (м), l – довжина прокату (м).

У розділі визначено, що при прокатці дрібносортового мірного прокату профілерозміром до №25 (рис. 2) існує можливість регулювання його довжини за рахунок зміни довжини середньої ділянки у межах однієї міри, що забезпечує отримання довжини прокату кратної мірі з заготовки розміром 80 x 80 мм та довжиною 11,0-12,0 м.

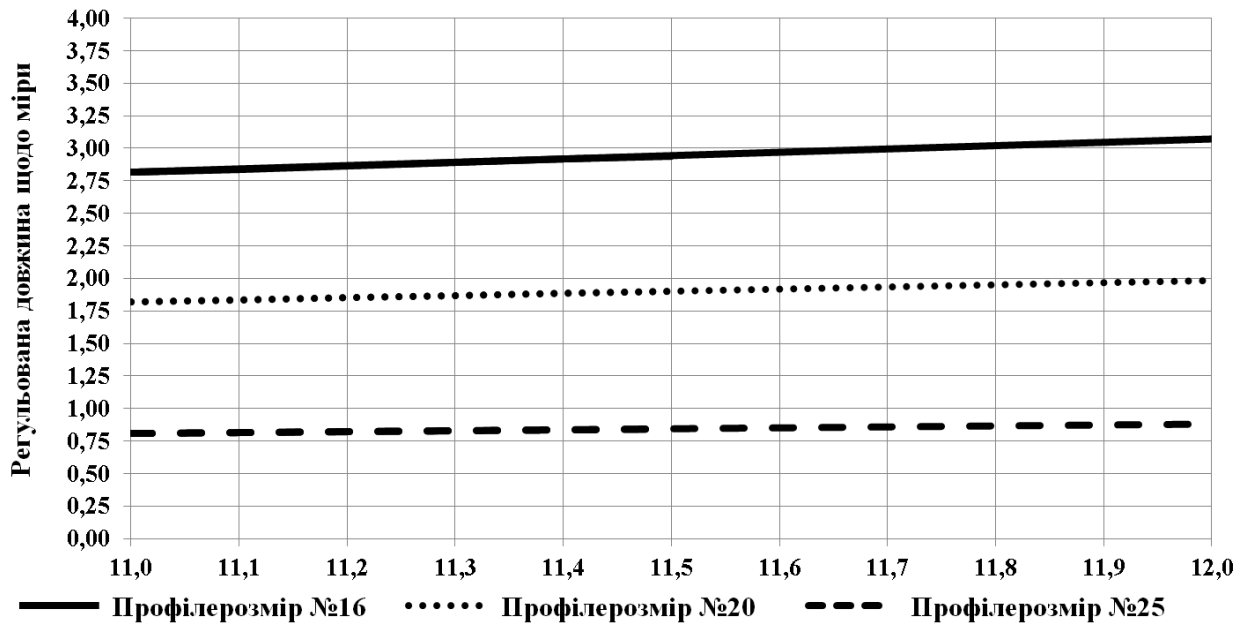


Рисунок 2 – Регульована довжина прокату для профілерозмірів №16, 20, 25

Третій розділ присвячений розробці системи керування довжиною прокату.

У розділі розглянуті стратегії керування довжиною прокату. Аналіз профілеграм показав, що за наявності системи керування натискними гвинтами бажано збільшення поперечних геометричних розмірів профілю прокату. На підставі цього встановлено, що пріоритетною є стратегія зменшення довжини середньої ділянки прокату (рис. 3). Дана стратегія може бути використана, коли довжина немірної частини прокату менша діапазону регулювання при прокатці з позитивним полем допуску. Довжина середньої ділянки прокату, яка

формується системою керування, визначається як різниця довжини середньої ділянки і довжини немірної частини.

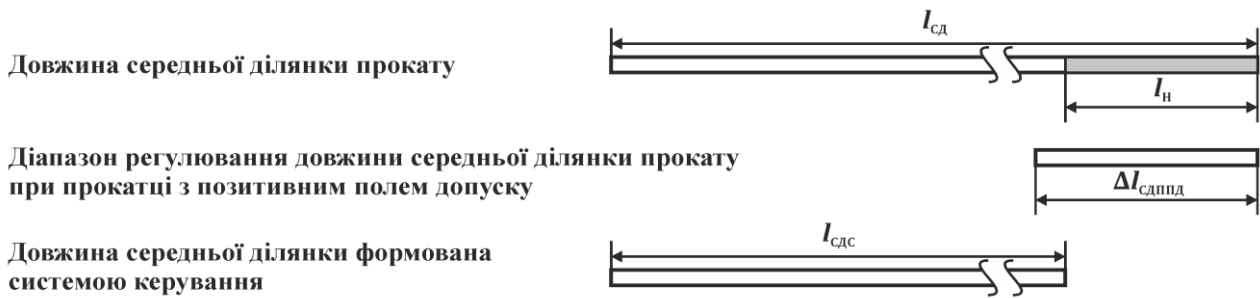


Рисунок 3 – Стратегія зменшення довжини середньої ділянки прокату де $l_{н}$ – довжина немірної частини прокату (м); $\Delta l_{сдппд}$ – діапазон регулювання довжини середньої ділянки прокату при прокатці з позитивним полем допуску (м); $l_{сдппд}$ – довжина середньої ділянки прокату при прокатці з позитивним полем допуску (м); $l_{сдс}$ – довжина середньої ділянки прокату формована системою керування (м).

При невиконанні вимог пріоритетної стратегії, коли довжина діапазону регулювання при прокатці з негативним полем допуску більша різниці довжин мірного стрижня і немірного залишку запропоновано використання стратегії збільшення довжини середньої ділянки. Довжина середньої ділянки прокату, яка формується системою керування, визначається як сума довжини середньої ділянки з різницею довжин мірного стрижня і немірного залишку (рис. 4). У разі невиконання вимог обох стратегій прокатка ведеться відповідно до базового налаштування.



Рисунок 4 – Стратегія збільшення довжини середньої ділянки прокату де $l_{мс}$ – довжина мірного стрижня (м); $\Delta l_{сднпд}$ – діапазон регулювання довжини середньої ділянки прокату при прокатці з негативним полем допуску (м); $l_{сднпд}$ – довжина середньої ділянки прокату при прокатці з негативним полем допуску (м).

У результаті аналізу стратегій та обладнання дрібносортих прокатних станів встановлено, що при керуванні довжиною прокату на станах, оснащених системою керування натискними гвинтами, найбільший ефект досягається за рахунок зміни геометричних розмірів профілю прокату на його середній ділянці у позитивному полі допуску, що забезпечує мінімізацію розкиду геометричних розмірів профілю за довжиною прокату (рис. 5).

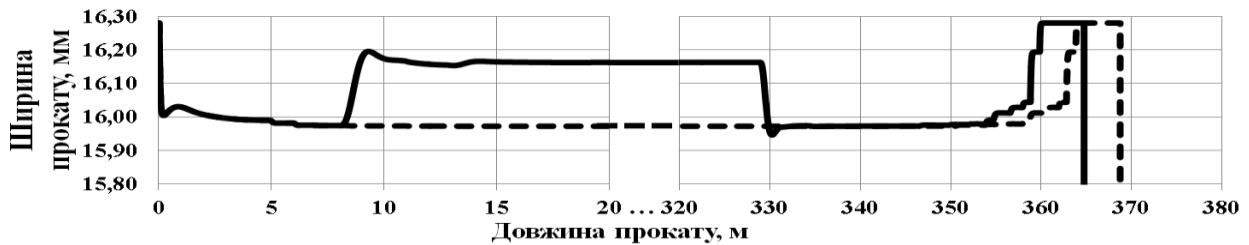


Рисунок 5 – Профілеграма отримана при моделюванні відпрацювання системою керування стратегії зменшення довжини середньої ділянки прокату

Керування довжиною прокату на станах, оснащених автоматичною системою стабілізації прогину прокату, можливо за рахунок зміни натягу в останньому міжкільтовому проміжку чистової групи клітей шляхом відключення системи стабілізації під час проходження середньої ділянки прокату і завдання неузгодженості швидкісного режиму прокатки (рис. 6).

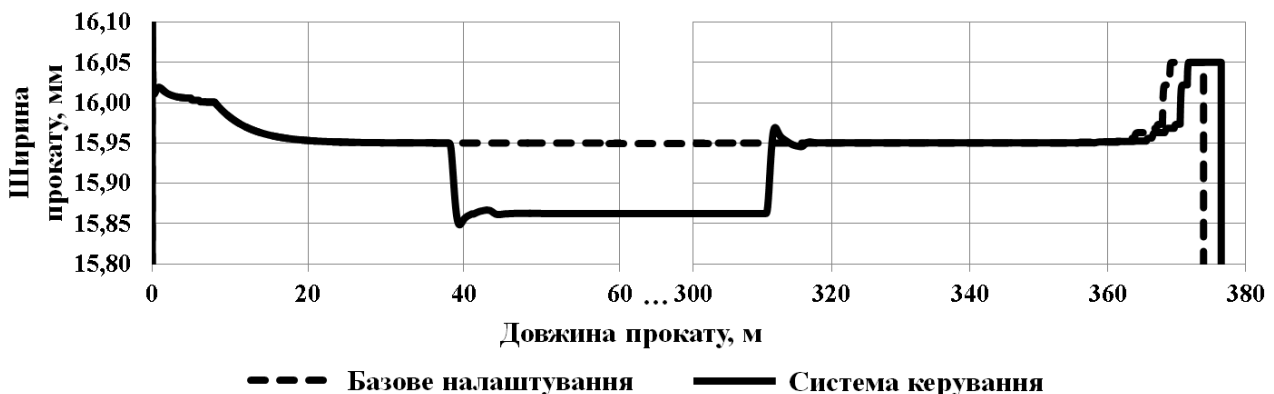


Рисунок 6 – Профілеграма отримана при моделюванні відпрацювання системою керування стратегії збільшення довжини середньої ділянки прокату

На станах, оснащених системою керування натискними гвинтами та автоматичною системою стабілізації прогину, керування довжиною прокату за рахунок зміни геометричних розмірів його профілю забезпечує збільшення діапазону регулювання довжини прокату при збереженні поперечних розмірів у межах поля допусків у порівнянні з регулюванням кожним способом окремо.

Аналіз процесу керування довжиною прокату на границях поля допуску показав наявність перерегулювання на передньому кінці середньої ділянки прокату, що призводить до порушення стандарту та викликано перехідними

процесами, які виникають у системі керування швидкістю обертання валків (рис. 7).



Рисунок 7 – Профілеграма переднього кінця прокату отримана при використанні задатчика інтенсивності на базі ПІ-регулятора

Зміна уставки швидкості обертання валків за допомогою задатчика інтенсивності на базі пропорційно-інтегрального регулятора забезпечує усунення перерегулювання у системі керування довжиною прокату і час перехідного процесу наближений до максимального за швидкодією, розрахованому на основі принципу максимуму Понтрягіна. Час інтегрування регулятора задатчика інтенсивності визначається у момент формування уставки на неузгодженість швидкісного режиму прокатки як добуток зміни швидкості обертання валків випускної кліті, некомпенсованої сталої часу контуру швидкості та зворотно пропорційно узгодженій швидкості обертання валків випускної кліті:

$$T_I = \frac{\Delta n_1}{n_{y31}} \cdot \tau \cdot K_E, \quad (4)$$

де T_I – час інтегрування (м), Δn_1 – зміна швидкості обертання валків випускної кліті (рад/с), n_{y31} – узгоджена швидкість обертання валків випускної кліті (рад/с), K_E – емпіричний коефіцієнт.

За результатами аналізу процесу керування довжиною прокату встановлено, що керування довжиною прокату за рахунок зміни режиму обтиску на його середній ділянці при прокатці круглого прокату профілерозміром з №16 по №23 для 50 % довжин заготовок забезпечує формування довжини прокату кратної мірній довжині. Керування довжиною прокату за рахунок зміни натягу прокату на його середній ділянці при прокатці круглого прокату профілерозміром з №16 по №21 для 30 % довжин заготовок забезпечує формування довжини прокату кратної мірній довжині.

У четвертому розділі запропоновано структуру системи керування довжиною прокату, при якій система розміщується на рівні автоматичного та операторського керування (рис. 8). На рівні автоматичного керування програмне забезпечення системи функціонує на базі програмованого логічного контролера, а операторського на базі автоматизованого робочого місця оператора у SCADA системі. Крім того, запропоновано комплекс технічних засобів необхідних для реалізації системи керування довжиною прокату, висунуті основні вимоги до датчиків, пристрою керування та його модулів. Час реакції датчика не повинен перевищувати 5 мс, час реакції модулів контролера не повинен перевищувати 1 мс, час основного циклу контролера не повинен перевищувати 1 мс.

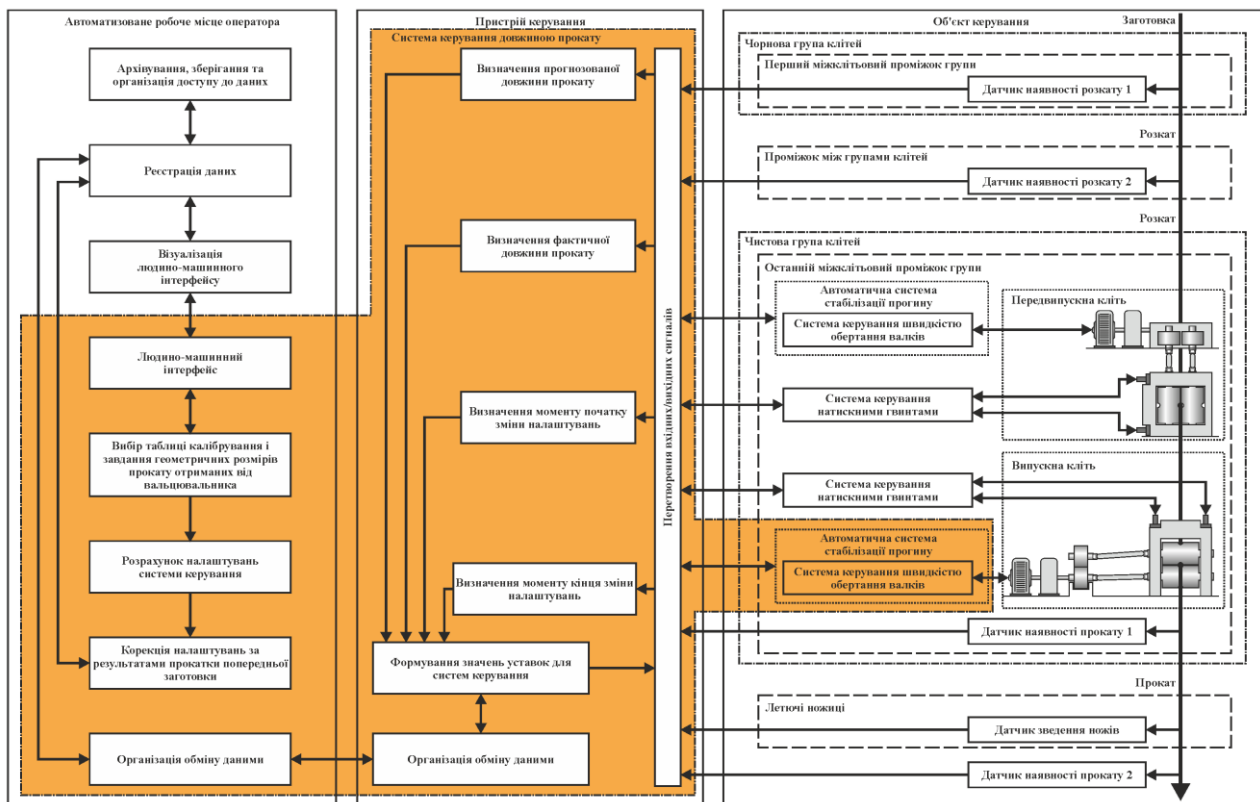


Рисунок 8 – Структура системи керування довжиною прокату

Розроблено програмне забезпечення модулів системи керування і виконана перевірка їх функціонування, яка показала, що помилка керування щодо довжини мірного стрижня становить менше 5 % та задовольняє вимогам стандарту. Отримане програмне забезпечення може використовуватися при реалізації наукових результатів роботи у системах керування довжиною прокату.

Проведено аналіз можливостей інтеграції системи керування довжиною прокату вже існуючі системи керування чистової групи квітей. Система може бути інтегрована у вигляді окремих програмних модулів у програмовані логічні контролери і автоматизовані робочі місця вже функціонуючих систем керування.

ВИСНОВКИ

У дисертації, яка є завершеною науково-дослідною роботою, вирішена актуальна наукова задача автоматизації процесу керування довжиною прокату на виході випускної кліті безперервного дрібносортового стана, що дає можливість збільшити вихід мірної продукції і зменшити втрати металу на обрізь.

Найбільш важливі наукові та практичні результати, висновки і рекомендації полягають у такому:

1. При керуванні довжиною прокату на станах, оснащених системою керування натискними гвинтами, найбільший ефект досягається за рахунок зміни геометричних розмірів профілю прокату на його середній ділянці у позитивному полі допуску, що забезпечує мінімізацію розкиду геометричних розмірів профілю за довжиною прокату.

2. Керування довжиною прокату на станах, оснащених автоматичною системою стабілізації прогину прокату, здійснюється за рахунок зміни натягу в останньому міжклітьовому проміжку чистової групи клітей шляхом відключення системи стабілізації під час проходження середньої ділянки прокату і завдання неузгодженості швидкісного режиму прокатки.

3. На станах, оснащених системою керування натискними гвинтами та автоматичною системою стабілізації прогину, керування довжиною прокату за рахунок зміни геометричних розмірів його профілю забезпечує збільшення діапазону регулювання довжини прокату при збереженні поперечних розмірів у межах поля допусків у порівнянні з регулюванням кожним способом окремо.

4. Зміна уставки швидкості обертання валків за допомогою задатчика інтенсивності на базі пропорційно-інтегрального регулятора забезпечує усунення перерегулювання у системі керування довжиною прокату і час перехідного процесу наблизений до максимального за швидкодією, який розраховується на основі принципу максимуму Понтрягіна.

5. Час інтегрування регулятора задатчика інтенсивності визначається у момент формування уставки на неузгодженість швидкісного режиму прокатки як добуток зміни швидкості обертання валків випускної кліті, некомпенсованої сталої часу контуру швидкості та зворотно пропорційно узгодженій швидкості обертання валків випускної кліті.

6. Керування довжиною прокату мінімізує вихід стрижнів немірної довжини, що скорочує втрати металу на обрізь.

7. Основні наукові положення і результати дисертаційної роботи впроваджені на стані ДСДС 250/150-6 ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг» в складі роботи «Виконання автоматичного розкрою заготівки перетином

150X150 на базі автоматичної системи управління швидкісним режимом прокатки (СУРП) в умовах прокатного стану МПС 250/150-6 Прокатного цеха №3» (Контракт №4600028858/4945 від 09.12.2011р. між ПАТ «АрселорМіттал Кривий ріг» і ТОВ «НВП«РЕАТЕП»»). Передача наукових результатів здійснювалася при виконанні Державним вищим навчальним закладом «Національний технічний університет» роботи «Надання науково – технічних консультацій по управлінню розкромом заготовок на стані ДСДС 250/150-6» ПАТ «АрселорМіттал Кривий ріг» для ТОВ «НВП«РЕАТЕП»» відповідно до договору №070808 від 01.01.2012.

8. Результати досліджень впроваджені на кафедрі «Автоматизації та комп'ютерних систем» Національного технічного університету «Дніпровська політехніка» у рамках дисциплін «Проектування систем автоматизації», «Проектування автоматичних систем керування технологічними комплексами» при підготовці бакалаврів та магістрів за спеціальністю 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології».

СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ПО ТЕМІ ДИСЕРТАЦІЇ

Фахові видання:

1. Оптимальный раскрой длиномерного проката на прокат товарной длины / А.С. Бешта, М.Ю. Кузьменко, О.А. Бойко, А.С. Соколова // Науковий вісник Національного гірничого університету. – 2014. – №2. – С. 76 – 85 (входить до міжнародної наукометричної бази «Scopus»).

2. Active control system of mill products tension at the outlet of roughing train in continuous light-section mill / M. Kuzmenko, M. Rybalchenko, O. Boyko, D. Beshta // Naukovyi visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu, Scientific and technical journal. – 2018. – №5 (167). – P. 122 – 129 (входить до міжнародної наукометричної бази «Scopus»).

3. Определение координат характерных участков пакета прутков мелкосортного проката перед его порезкой на стационарных ножницах / В.Н. Куваев, О.А. Бойко, М.Ю. Кузьменко, Е.Д. Иванова // Теория и практика металлургии. – 2013. – №1–2. – С. 74 – 79.

4. Технично-економические показатели производства мелкосортного проката в стержнях как целевая функция управления / А.С. Бешта, А.П. Егоров, О.А. Бойко и др. // Теория и практика металлургии. – 2013. – №3–4. – С. 57 – 61.

5. Вибір раціональної структури моделі міжклітьового проміжку дрібносортового безперервного прокатного стану / О.Ю. Потап, О.О. Бойко, М.Ю. Кузьменко, В.В. Дудкіна // Теория и практика металлургии. – 2015. – №1–2. – С. 114 – 119.

6. The choice of the rational structure model of intervals between rolling mills on continuous light-section rolling mill / O. Potap, O. Boyko, M. Kuzmeko, V. Dudkina // Theory and practice steel industry. – 2015. – №1–2. – P. 114 – 116.

7. Бешта А.С. Критерий эффективности оптимальной структуры товарной продукции при производстве мелкосортного мерного проката в стержнях / А.С. Бешта, О.А. Бойко, Т.В. Куваева // Metallургическая и горнорудная промышленность. – 2014. – №3. – С. 125 – 128.

8. Бешта А.С. Система рациональных технико-экономических показателей при производстве мелкосортного мерного проката в стержнях / А.С. Бешта, О.А. Бойко, Т.В. Куваева // Збірник наукових праць НГУ. – 2015. – №48. – С. 183 – 188.

9. Бойко О.А. Комплексное управление выходом мерного проката на основе информационных технологий / О.А. Бойко // Збірник наукових праць НГУ. – 2015. – №49. – С. 157 – 163.

10. Бойко О.О. Вибір раціональної структури моделі двохкільцевого дрібносортового безперервного прокатного стану / О.О. Бойко // Теорія і практика металургії. – 2017. – №1-2. – С.64 – 66.

Інші статті у міжнародних та вітчизняних виданнях:

11. Система автоматизированного управления раскром проката на непрерывном мелкосортном стане / А.С. Бешта, М.Ю. Кузьменко, О.А. Бойко и др. // Metallургическая и горнорудная промышленность. – 2015. – №5. С. 111 – 113.

Патенти:

12. Пат. 107908 Україна, МПК В21В 37/70, В21В 37/72, В21В 1/18, В23D 25/00. Спосіб управління розкром прокату на безперервному дрібносортовому стані / О.Ю. Потап, М.Ю. Кузьменко, О.С. Бешта, В.М. Куваєв, О.О. Бойко ; заявник Національна металургійна академія України. – № а 2014 06350 ; заяв. 10.06.2014 ; опубл. 25.02.2015, Бюл. №4.

13. Пат. 106273, МПК В21В 37/70, В21В 37/72. Спосіб регулювання розмірів сортового прокату / О.С. Бешта, В.М. Куваєв, М.Д. Зінченко, О.Ю. Потап, О.П. Єгоров, О.О. Бойко, А.А. Бурчак ; заявник Державний вищий навчальний заклад «Національний гірничий університет». – № u 2015 09297 ; заяв. 28.09.2015 ; опубл. 25.04.2016, Бюл. №8.

14. Пат. 114014, МПК В21В 37/70, В21В 37/58. Спосіб регулювання розмірів сортового прокату / О.С. Бешта, В.М. Куваєв, М.Д. Зінченко, О.Ю. Потап, О.П. Єгоров, О.О. Бойко, А.А. Бурчак ; заявник Державний вищий навчальний заклад «Національний гірничий університет». – № а 2015 05712 ; заяв. 09.06.2015 ; опубл. 10.04.2017, Бюл. №7.

Матеріали конференцій:

15. Основные принципы построения модели однониточного мелкосортного непрерывного прокатного стана / А.С. Бешта, О.Е. Потап, О.А. Бойко и др. // Проблемы розвитку впровадження інформаційних технологій у наукову та інноваційну сфери освіти. Матеріали XI міжнародної конференції: тез. доп. міжнар. наук.-практ. конф., Дніпро, 25 листопада 2014 р. – Д. НГУ, 2014. – С. 14 – 15.

16. Бойко О.О. Структура моделі двохклітьового стану / О.О. Бойко // XII міжнародна конференція з проблем використання інформаційних технологій в освіті, науці та промисловості: тез. доп. міжнар. наук.-практ. конф., Дніпро, 23–24 листопада 2016 р. – Д. НГУ, 2017. – С. 9 – 11.

17. Куваєв В.М. Моделювання систем технологічної автоматизації прокатної лінії сортового стана / В.М. Куваєв, О.О. Бойко, Д.О. Бешта, Н.О. Новодранова // Дванадцята міжнародна науково-практична конференція “Математичне та імітаційне моделювання систем. МОДС 2017”: тез. доп. міжнар. наук.-практ. конф., Чернігів, 26–29 червня 2017 р. – Ч. ЧНТУ, 2017. – С. 165 – 168.

18. Куваєв В.М. Зниження втрат металу на основі узгодженого керування довжиною і розрізанням сортового прокату / В.М. Куваєв, О.О. Бойко, Н.О. Новодранова // XVII науково-технічна конференція «Потураївські читання»: тез. доп. міжнар. наук.-практ. конф., Дніпро, 25 січня 2019 р. – Д. НТУ «ДП», 2019. – С. 13.

19. Бойко О.О. Керування довжиною прокату за рахунок зменшення довжини його середньої ділянки / О.О. Бойко, В.М. Куваєв. – Міжнародна науково-практична конференція енергозбереження та енергоефективність – 2020. Молодь: Наука та Інновації, 24 грудня 2020 р. – Дніпро: НТУ “ДП”, 2020. – С. 59-60.

Внесок автора в роботи, що опубліковані у співавторстві:

У друкованих працях, опублікованих у співавторстві, особисто дисертанту належить: [1] критерії оптимізації і обмеження для безостаточного розкрою довгомірного прокату на безперервному прокатному стані; [2] аналіз процесу формування різноширинності прокату на виході чорнової групи клітей дрібносортового стану та структура моделі ліанерізованого об’єкта керування; [3] аналіз проблеми впливу довжини прутків і їх положення у пакеті на вихід мірної продукції; [4] напрям підвищення техніко-економічних показників виробництва дрібносортового прокату через регулювання довжини прокату на виході випускної кліті; [5, 15] аналіз взаємозв’язків моделі міжклітьового проміжку з моделлю осередка деформації кліті дрібносортового безперервного

прокатного стану; [6] вибір структури моделі осередка деформації кліті дрібносортного безперервного прокатного стану; [7, 8] оцінка витрат на виробництво мірного прокату; [11] методика прогнозування довжини прокату на виході випускної кліті безперервного дрібносортного стана; [12-14] спосіб регулювання розмірів сортового прокату за рахунок зміни його обтиску; [17] раціональна структура моделі двохклітьового дрібносортного безперервного прокатного стану; [18] спосіб комплексного керування виходом мірного прокату на підставі інформаційних технологій; [19] стратегія керування довжиною дрібносортного прокату

АНОТАЦІЯ

Бойко О.О. Автоматизація процесу керування виходом мірної продукції на основі регулювання довжини прокату. – Кваліфікаційна робота на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеню кандидата технічних наук за спеціальністю 05.13.07 – Автоматизація процесів керування, Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», Дніпро, 2021.

Дисертація присвячена вирішенню актуальної науково-технічної задачі підвищення виходу мірної продукції на дрібносортних безперервних станах за рахунок регулювання довжини прокату.

На підставі аналізу профілеграм прокату встановлено, що прогнозоване керування довжиною прокату можливо тільки на його середній ділянці, яка визначається як різниця довжини прокату та суми довжин різноширинностей його передньої та задньої ділянки.

Розроблена система керування довжиною прокату дозволяє регулювати його довжину на середній ділянці за рахунок зміни режиму його обтиску за наявності системи керування натискними гвинтами та за рахунок зміни режиму натягу за наявності автоматичної системи стабілізації прогину. При керуванні довжиною прокату на границях поля допуску його поперечних розмірів зміна уставки швидкості забезпечуються задатчиком інтенсивності на базі пропорційно-інтегрального регулятора.

Розроблено структуру системи керування довжиною прокату при якій система розміщується на рівні автоматичного та операторського керування і запропоновано комплекс технічних засобів. На підставі структури розроблено програмне забезпечення системи керування перевірка функціонування якого виконана на моделі чистової групи клітей.

Ключові слова: заготовка, прокат, розкат, мірна довжина, різноширинність, система керування довжиною прокату, система керування натискними гвинтами, автоматична система стабілізації прогину.

АННОТАЦІЯ

Бойко О.А. Автоматизация процесса управления выходом мерной продукции на основе регулирования длины проката. – Квалификационная работа на правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.13.07 – Автоматизация процессов управления, Национальный технический университет «Днепровская политехника», Днепр, 2021.

Диссертация посвящена решению актуальной научно-технической задачи повышения выхода мерной продукции на мелкосортных непрерывных станах за счет регулирования длины проката.

По результатам анализа технологического процесса установлено, что главной проблемой при производстве мерной продукции является то, что длина проката зависит от геометрических размеров заготовки, которые подчиняются нормальному закону распределения. Повышение выхода мерной продукции может быть достигнуто за счет формирования длины проката удовлетворяющей требованиям раскройного плана. Это позволит получать прутки кратные длине мерного стержня с учетом наличия технологической обрезки, уменьшить разброс концов прутков в пакете и увеличит выход товарной продукции на $0,5 \div 1,0$ %.

Установлено, что управление длиной проката может быть обеспечено путем изменения его поперечных геометрических размеров в пределах поля допуска, обусловленного соответствующими стандартами, за счет изменения режима обжатия и скоростного режима прокатки в последних трех клетях чистовой группы.

Анализ существующих систем управления точностью поперечных геометрических размеров проката показал, что они решают задачу поддержания геометрических размеров проката путем изменения режима обжатия или управления скоростным режимом прокатки. Вопрос использования данных систем для регулирования длины проката ранее не рассматривался.

Посредством адаптированной модели чистовой группы клетей проведено исследование процесса формирования профиля проката. Проанализировав полученные профилограммы, установлено, что разноширинность на переднем конце проката формируется за счет переходных процессов, происходящих в

системе управления скоростью вращения валков. Основное влияние на ее формирование оказывают последние два межклеточных промежутка чистовой группы клетей. Длина разноширинности пропорциональна произведению некомпенсированной постоянной времени контура скорости вращения валков и линейной скорости проката на выходе выпускной клетки. Разноширинность на заднем конце проката формируется в момент прокатки заднего конца раската без натяжения. Основное влияние на формирование разноширинности оказывают последние три клетки чистовой группы. Длина разноширинности определяется как произведение большего значения длины последних трех межклеточных промежутков и коэффициента вытяжек клетей расположенных за каждым из них.

Установлено, что при управлении длиной проката на станах, оснащенных системой управления нажимными винтами, наибольший эффект достигается за счет изменения геометрических размеров профиля проката на его среднем участке в положительном поле допуска. Управление длиной проката на станах оснащенных автоматической системой стабилизации прогиба проката осуществляется за счет изменения натяжения в последнем межклеточном промежутке чистовой группы клетей путем отключения системы стабилизации во время прохождения среднего участка проката и задания несогласованности скоростного режима прокатки. На станах, оснащенных системой управления нажимными винтами и автоматической системой стабилизации прогиба, управление длиной проката за счет изменения геометрических размеров его профиля обеспечивает увеличение диапазона регулировки длины проката при сохранении поперечных размеров в пределах поля допусков по сравнению с регулированием каждым способом отдельно.

Разработанная система управления позволяет регулировать длину проката на его среднем участке за счет изменения режима обжатия при наличии системы управления нажимными винтами и режима натяжения при наличии автоматической системы стабилизации прогиба. При управлении длиной проката на границах поля допуска изменение уставки скорости вращения валков обеспечивается задатчиком интенсивности на базе пропорционально-интегрального регулятора.

Разработана структура системы управления длиной проката, при которой система размещается на уровне автоматического и операторского управления. В соответствии с данной структурой разработано программное обеспечение системы управления, проверка функционирования которого выполнена на модели чистовой группы клетей.

Результаты работы внедрены на стане МПС 250/150-6 ПАО «АрселорМиттал Кривой Рог» в системе управления порезкой для обеспечения активного регулирования размеров конечной продукции.

Ключевые слова: заготовка, прокат, раскат, мерная длина, разноширинность, управление длиной проката, система управления нажимными винтами, автоматическая система стабилизации прогиба.

ABSTRACT

O.O. Boyko. Automation of the process of controlling the output of measured products on the basis of regulation of the length of the rolled stock. – On the rights of the manuscript.

Thesis for a candidate's degree by specialty 05.13.07 – Automation of Control Processes, National Technical University «Dniprovsk Polytechnic», Dnipro, 2021.

The dissertation is devoted to the solution of the actual scientific and technical problem of increasing the yield of measured products on small-scale continuous states by adjusting the length of the rolled stock.

Based on the analysis of rental profiles, it has been established that the predicted control of the length of the rental is possible only in its middle section, which is defined as the difference between the length of the rental and the sum of the lengths of the widths of its front and rear sections.

The developed control system for the length of the car allows you to adjust its length in the middle section by changing the mode of its compression in the presence of the control system pressure screws and by changing the mode of tension in the presence of an automatic system to stabilize the tension. When controlling the length of the rental at the boundaries of the tolerance field of its transverse dimensions, the change in the speed setpoint is provided by the intensity adjuster based on the proportional-integral controller.

The structure of the rental length control system is proposed, at which the system is located at the level of automatic and operator control, in addition a set of technical means is proposed. On the basis of the structure, a control system software has been developed for the functioning check, which is performed on the model of the finishing stand group.

Key words: bar, roll, rollout, dimensional length, various width, length control system, control system of press screws, automatic tension stabilization system.