

УДК 681.532.1

**М. Д. Зінченко**, к.т.н., с.н.с., ORCID 0000-0003-4381-9692**О. Ю. Потап**, к.т.н., доцент, ORCID 0000-0001-8643-0228*Український державний університет науки і технологій*

## ДОСЛІДЖЕННЯ ЛАБОРАТОРНОГО ПРОКАТНОГО СТАНА 150 ЯК ОБ'ЄКТА АВТОМАТИЗАЦІЇ

**Анотація.** Метою роботи є дослідження лабораторного прокатного стану 150 як об'єкта автоматизації для встановлення зв'язків між параметрами прокатки і розмірами прокату, а також реалізації системи автоматизованого регулювання товщини прокату (САР). Робота призначена для подальшого застосування в навчальному процесі для формування у студентів компетентностей щодо дослідження об'єктів автоматизації та синтезу САР. Навчання студентів за допомогою комп'ютерної техніки і пакетів моделювання технологічних процесів безумовно здійснило прогрес в навчанні, дозволило швидко досліджувати різні режими процесів і отримувати необхідні рішення проблем. Але відсутність досліджень реальних процесів з реальними датчиками і виконавчими механізмами і в умовах перешкод складає почуття легкості в дослідженнях і прийнятті рішень.

Проведені експериментальні дослідження дозволили встановити залежності між товщиною готового прокату і силою прокатки, зміненням товщини підкату і зміненням міжвалкового зазору. Були визначені жорсткості кліті і прокату. Жорсткість кліті дорівнює 26801 Н/мм і значно вище жорсткості прокату. Показано, що лінія пластичної деформації прокату має суттєво нелінійний характер, жорсткості прокату змінюються в діапазоні 618 – 7093 Н/мм. Показано, що змінення міжвалкового зазору не забезпечує повної компенсації впливу змінення товщини підкату. Дослідження також показали, що для визначення необхідних параметрів достатньо мати обмежену кількість свинцевих зразків, що дозволяє застосовувати експериментальні дослідження в навчальному процесі. Проведені експериментальні дослідження визначили, що їх можливо провести в умовах виконання студентами лабораторних робіт, вони дозволяють отримати студентами необхідний досвід в дослідженні прокатного стану як об'єкту автоматизації і роботи системи регулювання товщини прокату.

**Ключові слова:** лабораторний прокатний стан 150, товщина прокату, сила прокатки, жорсткість кліті, жорсткість прокату, міжвалковий зазор.

**Посилання для цитування:** Зінченко М. Д., Потап О. Ю. Дослідження лабораторного прокатного стану 150 як об'єкта автоматизації. *Фундаментальні та прикладні проблеми чорної металургії*. 2022. Вип. 36. С. 314-324. DOI: 10.52150/2522-9117-2022-36-314-324.

**Вступ.** Лабораторний прокатний стан 150 кафедри автоматизації виробничих процесів УДУНТ та здійснюваний на ньому процес прокатки свинцю має виступати як об'єкт автоматизації у навчальному процесі

підготовки фахівців з автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій. При цьому товщина прокату розглядається як вихідна величина, зміни товщини підкату – як збурення, а зміни міжвалкового зазору – як керуючий вплив. Проведена модернізація прокатного стану та оснащення його автоматизованими системами вимірювання енергосилових параметрів (САВ) та управління переміщенням натискних гвинтів (САУП) [1] створило можливість експериментального визначення зв'язків між вхідними та вихідними параметрами для подальшого синтезу системи автоматизованого регулювання товщини прокату (САРТ) та створення натурної моделі САРТ. Наявність такої натурної моделі забезпечить проведення якісного лабораторного практикуму з навчальної дисципліни "Автоматизація технологічних процесів та виробництва".

**Мета роботи** – дослідження лабораторного прокатного стану 150 як об'єкта автоматизації для встановлення зв'язків між параметрами прокатки і розмірами прокату і реалізації системи автоматизованого регулювання товщини прокату для подальшого застосування в навчальному процесі для формування у студентів компетенцій щодо дослідження об'єктів автоматизації та синтезу САР.

**Результати роботи.** Навчання студентів за допомогою комп'ютерної техніки і пакетів моделювання технологічних процесів безумовно здійснило прогрес в навчанні, дозволило швидко досліджувати різні режими процесів і отримувати необхідні рішення проблем. Але відсутність досліджень реальних процесів з реальними датчиками і виконавчими механізмами і в умовах перешкод складає почуття легкості в дослідженнях і прийнятті рішень. Тому доцільно в навчальному процесі мати можливості проведення досліджень і проектування систем на реальних об'єктах.

Дослідження на лабораторних прокатних станах були спрямовані на вивчення процесів в зоні деформації, кінематичних параметрів процесу прокатки і т.і., але досліджень лабораторного прокатного стану як об'єкта автоматизації не проводилось. Існуючий лабораторний прокатний стан 150 кафедри автоматизації виробничих процесів можна застосувати як об'єкт автоматизації, в якому вихідною величиною є товщина прокату [1]. Коливання товщини підкату можна визначити як збурення, а змінення міжвалкового зазору як управляючу дію. Оснащення прокатного стану автоматизованими системами вимірювання енергосилових параметрів процесу прокатки і управління переміщенням натискних гвинтів [2] створило можливість проведення експериментальних досліджень процесу прокатки для визначення зв'язків між вхідними та вихідними параметрами і регулювання товщини прокату. В роботі [2] були також проведені попередні дослідження, які підтвердили можливості проведення цих експериментальних досліджень і виявили недоліки, які були усунені при проведенні наступних досліджень.

Проведення експериментальних досліджень процесу прокатки дозволить сформувати умови для створення фізичної моделі автоматизованої системи регулювання товщини прокату і визначити можливість впровадження експериментальних досліджень в навчальний процес з дисципліни «Автоматизація технологічних процесів і виробництв. Дослідження прокатного стану як об'єкта автоматизації полягає в визначенні коефіцієнтів передачі, які характеризують вплив товщини підкату і міжвалкового зазору на товщину прокату, жорсткості кліті і смуги. Ці коефіцієнти визначаються при проведенні експериментальних досліджень і статистичній обробці результатів вимірюваних значень розмірів прокату і параметрів прокатки. При проведенні експериментальних досліджень вимірювались розміри підкату і готового прокату, сила прокатки, величина міжвалкового зазору. Вимірювання сили прокатки виконувалось за допомогою месдоз, які були встановлені під натискні гвинти [2]. Підсилений сигнал с месдоз надходив на багатофункціональну плату збору даних PCI 1711. Для вимірювання і відображення сигналу с месдоз був застосований розроблений програмний пакет AIsign [2].

Переміщення натискних гвинтів здійснювали за допомогою автоматизованої системи управління переміщенням натискних гвинтів на базі програмованого логічного контролера та частотного перетворювача MS-300 з використанням панелі оператора DOP-103BQ та датчика кута повороту натискних гвинтів ПДФ-3 [2]. Розміри товщини підкату і готового прокату виконувались ручним мікрометром 0-25 мм. Ширина і довжина - штангенциркулем і рулеткою. За відсутності засобів вимірювання вихідного зазору між валками з потрібною точністю 0,01 мм використовували спеціальну методику, яка полягала у багаторазовому пропусканні свинцевого зразка крізь валки з незмінним зазором. При цьому зазор визначали як товщину зразка після пропуску з близькою до нуля силою прокатки, що свідчило про відсутність пружної деформації кліті.

Для усунення впливу на результати вимірювання неконтрольованих коливань міжвалкового зазору (ексцентриситету прокатних валків), через які товщина смуги зазнає коливань, що сягають 0,2 мм, вимірювання здійснювали при одному й тому ж кутовому положенні валків, для чого верхній валок кернували і вимірювання товщини смуги здійснювали у точці відбитку керна. Експериментальні дослідження впливу на вихідну товщину прокату міжвалкового зазору і товщини підкату здійснювали спочатку для виявлення впливу міжвалкового зазору, а потім товщини підкату. Це обумовлено тим, що кількість свинцевих зразків обмежена, тому дослідження змінювання міжвалкового зазору дозволило після прокатки отримати свинцеві підкати різної товщини, які потім застосували для визначення впливу товщини підкату. Для дослідження впливу міжвалкового зазору застосували три свинцевих зразка однакової товщини. При прокатці вимірювалось і відображалось на екрані монітору

сила прокатки, після прокатки вимірюванні значення зберігались в файлі, потім вимірювалась товщина прокату і міжвалковий зазор. Після вимірювання міжвалкового зазору його змінювали на задану величину за допомогою системи управління натискними гвинтами і потім здійснювалась прокатка другого і третього зразків. На рис. 1 наведена осцилограма при прокатці свинцевого зразка.

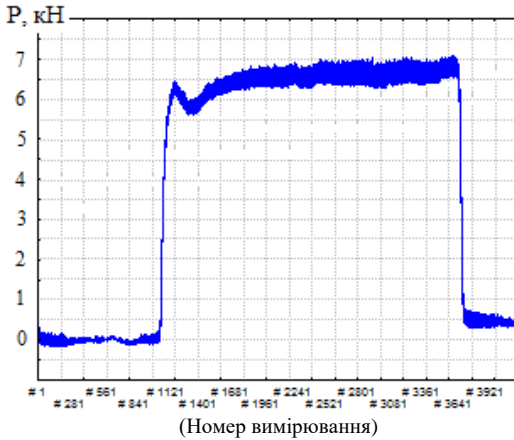


Рисунок 1–  
Осцилограма сили  
прокатки.

Результати вимірювання, які зберігались після прокатки в файлі з розширенням csv, містять дані вимірювання сили прокатки в вигляді напруги сигналу в В. Тому цей файл з розширенням csv відкривався в пакеті Excel, а потім значення вимірювань в В перераховувались відповідно калібруванням месдоз в Н для лівої і правої месдоз окремо, а потім для кожного вимірювання визначалась сумарна сила прокатки. Далі обирались значення, які відповідають сталому процесу прокатки після захвату полоси і до видачі її із кліти, і рахувалось середнє значення зусилля прокатки для цієї полоси. Результати прокатки наведені в табл. 1.

Таблиця 1 – Експериментальні дані щодо впливу міжвалкового зазору на параметри прокатки. Позначення параметрів в таблиці 1: № - номер зразка,  $h_0$  – товщина підкату, мм,  $S_0$  – міжвалковий зазор, мм,  $h_1$  – товщина прокату, мм,  $L_0$  – довжина підкату, мм,  $b_0$  – ширина підкату, мм,  $P$  – сила прокатки, Н,  $\delta_0$  – пружина кліти, мм,  $\Delta h$  – обтиснення, мм,  $M_c$  – жорсткість полоси, Н/мм.

№	$h_0$ , мм	$S_0$ , мм	$h_1$ , мм	$L_0$ , мм	$b_0$ , мм	$P$ , Н	$\delta_0$ , мм	$\Delta h$ , мм	$M_c$ , Н/мм
1	6,75	6,25	6,36	267	47	2766	0,11	0,39	7093
2	6,75	5,3	5,5	284	49	5552	0,2	1,25	3273
3	6,75	4,35	4,55	224	44	6141	0,2	2,2	618

За результатами вимірювань, які наведені в табл. 1 побудовані графіки залежностей розмірів і параметрів прокатки (рис. 2). Рівняння регресії і

коефіцієнти кореляції наведені в табл. 2.

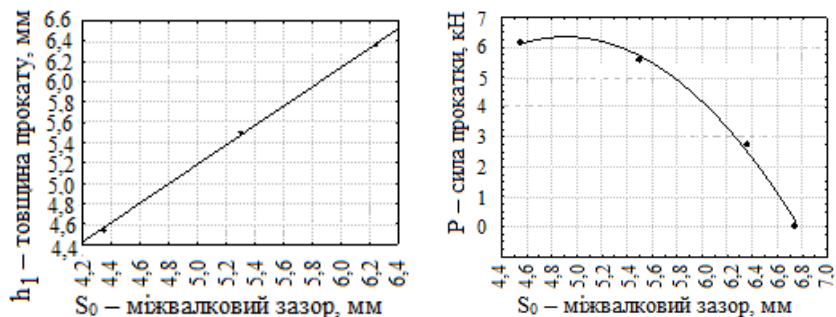


Рисунок 2 – Залежності товщини прокату  $h_1$  і сили прокатки  $P$  від міжвалкового зазору  $S_0$ .

Таблиця 2 – Рівняння регресії.

№ рівняння	Рівняння регресії	Коефіцієнт кореляції
1	$h_1 = 0,411 + 0,95S_0$	0,99
2	$P = -23757 + 12918S_0 - 1391S_0^2$	-
3	$P = -37991 + 18044h_1 - 1836h_1^2$	-

На рис. 3 наведені залежності сили прокатки від товщини прокату і міжвалкового зазору. Залежності сили прокатки від міжвалкового зазору є характеристикою жорсткості кліті. З цього рисунка витікає, що графіки жорсткості кліті є лінійними і їх нахил практично не змінюється при змінненні міжвалкового зазору.

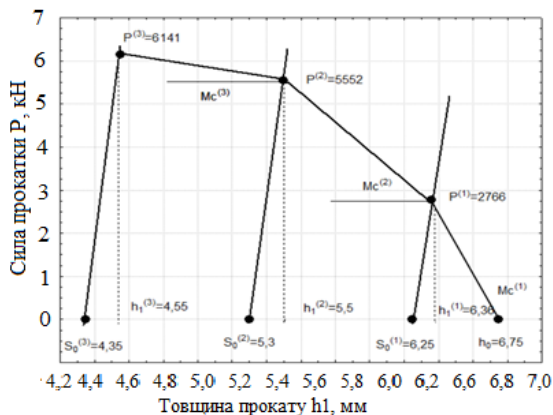


Рисунок 3 – Залежності сили прокатки від товщини прокату і міжвалкового зазору.

Графік залежності зусилля прокатки від товщини прокату має нелінійний характер. Жорсткість смуги на різних частинах графіку

суттєво відрізняється і знаходиться в межах 618 – 7093 Н/мм. Дослідження впливу товщини підкату на вихідну товщину прокату здійснювалось при прокатці свинцевих зразків, отриманих після прокатки при змінненні міжвалкового зазору. Після прокатки з змінненням міжвалкового зазору отримали три підкату товщиною 6,36 мм, 5,5 мм, 4,55 мм. Міжвалковий зазор при проведенні досліджень залишався незмінним і дорівнював 3,95 мм. Проведення досліджень виконувалось за тими ж умовами, що і при змінненні міжвалкового зазору. Результати досліджень наведені в табл. 3.

Таблиця 3 – Експериментальні дані щодо впливу товщини підкату на параметри прокатки.

№	$h_0$ , мм	$S_0$ , мм	$h_1$ , мм	$L_0$ , мм	$b_0$ , мм	$P$ , Н	$\delta_0$ , мм	$\Delta h$ , мм	$M_C$ , Н/мм	$M_K$ , Н/мм
1	6,36	3,95	4,2	281	47	6612	0,25	2,16	3061	26448
2	5,5	3,95	4,15	345	49	5317	0,2	1,35	3934	26585
3	4,55	3,95	4,05	324	44	2736	0,1	0,5	5474	27370

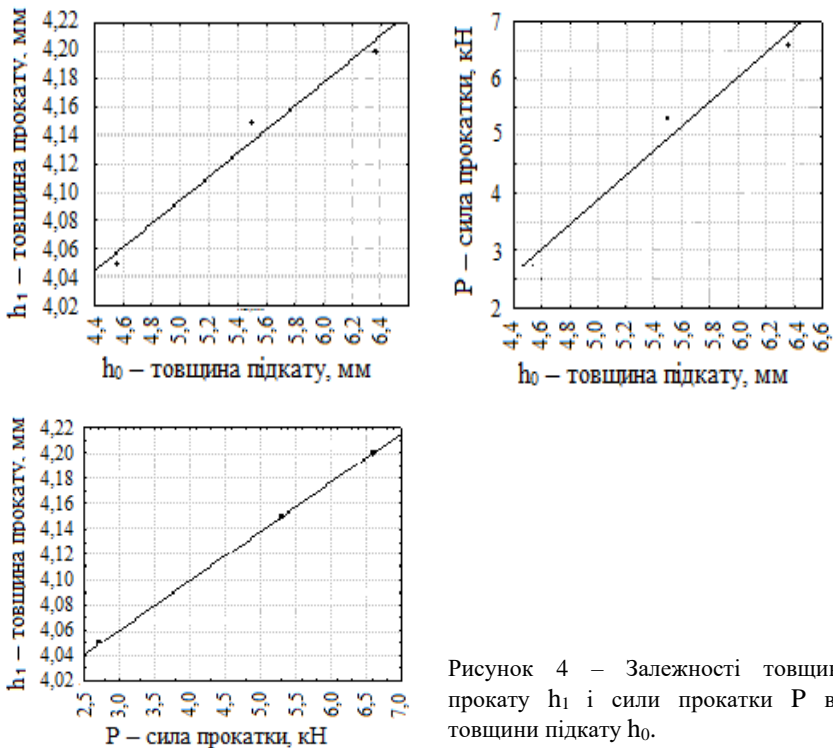


Рисунок 4 – Залежності товщини прокату  $h_1$  і сили прокатки  $P$  від товщини підкату  $h_0$ .

За результатами вимірювань, які наведені в таблиці 3 побудовані графіки залежностей розмірів і параметрів прокатки (рис. 4). Рівняння регресії і коефіцієнти кореляції наведені в таблиці 4.

Таблиця 4 – Рівняння регресії.

№ рівняння	Рівняння регресії	Коефіцієнт кореляції
4	$h_1 = 3,68 + 0,0833h_0$	0,97
5	$P = -701 + 219h_0$	0,98
6	$h_1 = -10626 + 2691P$	0,99

З наведених графіків можна визначити, що змінення товщини підкату впливає як на товщину прокату, так і на силу прокатки.

На рис. 5 наведені залежності сили прокатки від товщини прокату і міжвалкового зазору при змінній товщини підкату. Ці графіки підтверджують високу жорсткість кліті, яка дорівнює 2696 – 2790 кг/мм для різних ділянок характеристики і значно меншу жорсткість смуги 312, 401, 558 кг/мм. При цьому меншій товщині підкату відповідає більша жорсткість смуги. Це обумовлено нелінійністю залежності сили прокатки від товщини прокату. Такі співвідношення жорсткості кліті і смуги призводять до того, що вплив товщини підкату на товщину прокату не дуже суттєвий. Змінення товщини підкату на 1,81 мм призводить до змінення товщини прокату на 0.15 мм, що обумовлено високою жорсткістю кліті. Тому при проведенні експериментальних досліджень необхідно задавати великі значення змінення товщини підкату, щоб отримати достовірне змінення товщини прокату.

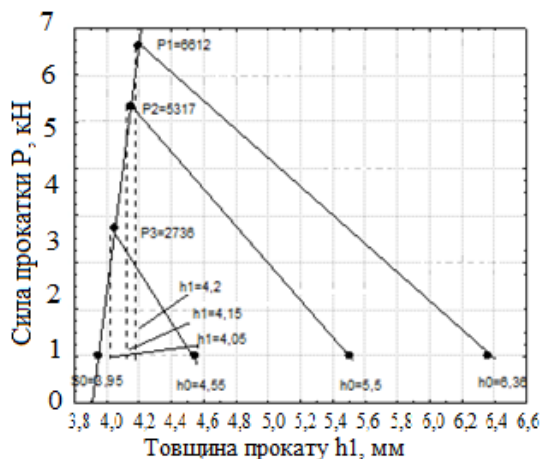


Рисунок 5 – Залежності сили прокатки  $P$  від товщини прокату і міжвалкового зазору  $S_0$  при змінній товщини підкату  $h_0$ .

Автоматизована система регулювання товщини прокату лабораторного стану 150 може бути реалізована як замкнута система в

тому випадку, якщо вимірювання товщини підкату і формування управляючого впливу – змінення міжвалкового зазору буде виконуватися оператором. Це обумовлено відсутністю автоматизованого вимірювача товщини підкату і товщини готового прокату. Ручне формування сигналу завдання на переміщення верхнього валка для змінення міжвалкового зазору і вимірювання товщини підкату і товщини прокату ручним мікрометром не впливає на процес компенсування відхилення товщини підкату на товщину прокату.

Автоматизована система регулювання товщини прокату є системою регулювання по збуренню, яким є відхилення товщини підкату. По результатах вимірювання товщини підкату розраховується відхилення товщини підкату від заданої, розраховується величина змінення міжвалкового зазору для компенсації товщини підкату. Необхідна величина переміщення задається з панелі оператора в регулятор положення натискних гвинтів і за допомогою регулятора положення натискних гвинтів здійснюється переміщення натискних гвинтів. Потім виконується прокатка підкату і вимірюється мікрометром товщина готового прокату з урахуванням компенсації впливу товщини підкату.

Для визначення величини міжвалкового зазору, який необхідний для компенсування відхилення товщини підкату, треба застосувати рівняння (1) і (4), які пов'язують вихідну товщину прокату з товщиною підкату і міжвалковим зазором. Після належних перетворень отримаємо

$$\Delta S_0 = \frac{K_{h_1}^{S_0}}{K_{h_1}^{S_0}} \Delta h_0 = 0,0875 \Delta h_0. \quad (7)$$

Було виконано фізичне моделювання роботи автоматизованої системи в ручному режимі, яке полягало в прокатці свинцевих зразків з формуванням управляючого впливу змінням міжвалкового зазору. Для цього було підготовлено три зразки товщиною 5,2 мм, 4,17 мм, 3,25 мм. Зразок товщиною 4,17 мм був обраний як такий, що відповідає умовам процесу прокатки, зразки товщиною 5,2 мм і 3,25 мм є коливаннями товщини прокату. Результати прокатки наведені в табл. 5.

Таблиця 5 – Результати прокатки з регулюванням міжвалкового зазору.

№	h <sub>0</sub> , мм	S <sub>0</sub> , мм	dS <sub>0</sub> , мм	h <sub>1</sub> , мм	L <sub>0</sub> , мм	b <sub>0</sub> , мм	P, Н	Δh, мм
1	4,17	2,75	0	3	483	48	6220	1,17
2	3,25	2,84	0,083	2,94	576	44	2865	0,36
3	5,2	2,66	-0,094	2,95	308	48	8554	2,25

На рис. 6 наведено графічне зображення процесу регулювання товщини прокату. Лінії 1-3 – це лінеаризовані лінії пластичної деформації



метала, лінія 1 відповідає номінальному режиму прокатки. Лінія 2 відповідає процесу прокатки, коли товщина підкату збільшується, лінія 3-коли товщина прокату зменшується. Точка Т1 відповідає встановленому міжвалковому зазору 2,75 мм (лінія 1з), що призводить при товщині підкату 4,17 мм (лінія 1) до появи товщини прокату 3,0 мм.

Якщо товщина підкату збільшується (лінія 2), то це призводить при незмінному міжвалковому зазорі до того, що товщина прокату становить 3,08 мм (точка Т2).

Якщо товщина підкату зменшується (лінія 3), то це призводить при незмінному міжвалковому зазорі до того, що товщина прокату становить 2,9 мм (точка Т3).

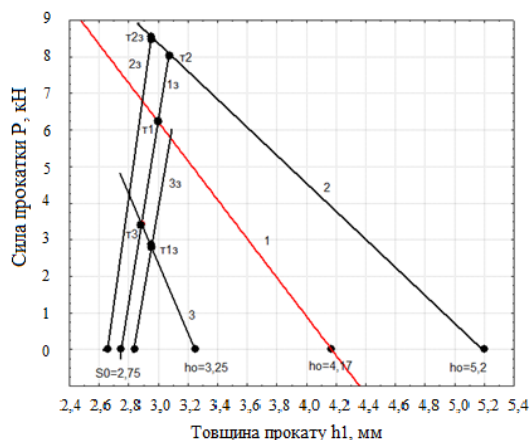


Рисунок 6 – Графічне зображення процесу регулювання товщини прокату.

Для компенсації впливу зміння товщини підкату на товщину прокату необхідно змінити міжвалковий зазор. Було розраховано зміння міжвалкового зазору для компенсації товщини підкату при його збільшенні. Для цього величину міжвалкового зазору зменшили на  $-0.094$  мм (лінія 2з) і отримали товщину прокату 2,95 мм, яка була менше заданої (3,0 мм) на 0,05 мм, тобто трапилось перерегулювання. Було розраховано зміння міжвалкового зазору для компенсації товщини підкату при його зменшенні. Для цього величину міжвалкового зазору збільшили на  $0.083$  мм (лінія 3з) і отримали товщину прокату 2,94 мм, яка була менше заданої (3,0 мм) на 0,06 мм, тобто трапилось недорегулювання.

## Висновки

Проведені експериментальні дослідження дозволили встановити залежності між товщиною готового прокату і силою прокатки і збуренням – змінням товщини підкату і управляючою дією – змінням міжвалкового зазору. Були визначені жорсткості кліті і прокату і показано, що жорсткість кліті значно вище жорсткості прокату і це

потребує для визначення впливу товщини підкату задавати значний діапазон змінення товщини підкату.

Показано, що лінія пластичної деформації прокату має суттєво нелінійний характер, жорсткості прокату змінюються в діапазоні 618 – 7093 Н/мм і тому розрахування змінення міжвалкового зазору по виразу (7) з коефіцієнтами передачі, які отримані експериментальним шляхом, не забезпечує повної компенсації впливу змінення товщини підкату. Треба враховувати нелінійний характер лінії пластичного деформування і різні значення жорсткості смуги.

Дослідження також показали, що для визначення необхідних параметрів достатньо мати обмежену кількість свинцевих зразків, наприклад, три свинцевих зразка, що в значній мере спрощує проведення досліджень, тому що процес підготовки зразків не простий, і це дозволяє застосовувати експериментальні дослідження в навчальному процесі.

Проведені експериментальні дослідження визначили, що їх можливо провести в умовах виконання студентами лабораторних робіт, вони дозволяють отримати студентами необхідний досвід в дослідженні прокатного стану як об'єкту автоматизації і роботи системи регулювання товщини прокату.

#### Перелік посилань

1. Действующая модель прокатного стана. Руководство по эксплуатации 5Л.00.00.00.РЭ. Днепропетровск : Облполиграфиздат, 1988. 7с.
2. Зінченко М. Д., Потап О. Ю., Рибальченко М. О., Маначин І. О. Модернізація лабораторного прокатного стана 150 для формування у студентів навичок дослідження об'єкта автоматизації. *Системні технології*. 2021. Вип. 3 (134). С. 87- 98.

#### References

1. Active model of rolling mill. Operation manual. 5L.00.00.00.RE. Dnepropetrovsk: Oblpoligrafizdat, 1988. 7 p.
2. Zinchenko M. D., Potap O. Yu., Rybalchenko M. O., Manachyn I. O. Modernization of laboratory rolling mill 150 for the formation of students' studies of automation object research. *System technologies*. 2021, Issue 3 (134). P. 87-98.

**M. D. Zinchenko**, Ph. D. (Tech.), Senior Researcher, ORCID 0000-0003-4381-9692

**O. Y. Potap**, Ph. D. (Tech.), Associate Professor, ORCID 0000-0001-8643-0228

*Ukrainian State University of Science and Technologies*

### RESEARCH OF LABORATORY ROLLING STAND 150 AS AN OBJECT OF AUTOMATION

**Summary.** The purpose of the work is to study the laboratory rolling mill 150 as an object of automation to establish the relationship between rolling parameters and the dimensions of the rolled products, as well as the implementation of the system of

automated regulation of the thickness of the rolled products (SAR). The work is intended for further application in the educational process for the formation of students' competencies in the study of automation objects and the synthesis of SAR. Teaching students with the help of computer equipment and technological process simulation packages definitely made progress in education, allowed to quickly explore different modes of processes and obtain the necessary solutions to problems. But the lack of studies of real processes with real sensors and executive mechanisms and in the conditions of obstacles creates a feeling of ease in research and decision-making.

The conducted experimental studies made it possible to establish the dependence between the thickness of the finished rolled product and the rolling force, the change in the thickness of the roll and the change in the gap between the rolls. The stiffnesses of the rolling mill and rolled metal were determined. The stiffness of the rolling mill is equal to 26801 N/mm and is much higher than the stiffness of rolled steel. It is shown that the line of plastic deformation of the rolled product has a significantly nonlinear character, the stiffness of the rolled product varies in the range of 618 - 7093 N/mm. It is shown that changing the inter-roll gap does not provide full compensation for the effect of changing the thickness of the roll. Research has also shown that to determine the necessary parameters, it is enough to have a limited number of lead samples, which allows you to apply experimental research in the educational process. The conducted experimental studies determined that it is possible to conduct them in the conditions of laboratory work performed by students, they allow students to gain the necessary experience in the study of the rolling state as an object of automation and the operation of the system for regulating the thickness of the rolled metal.

**Key words:** laboratory rolling mill 150, rolling thickness, rolling force, rolling mill stiffness, rolled metal stiffness, roll gap.

**For citation:** Zinchenko M. D., Potap O. Y. Doslidzhennia laboratornoho prokatnoho stana 150 yak obiekta avtomatyziatsii [Research of laboratory rolling stand 150 as an object of automation] *Fundamental and applied problems of ferrous metallurgy*. 2022. Collection 36. P. 314-324. [In Ukrainian]. DOI: 10.52150/2522-9117-2022-36-314-324.

*Стаття надійшла до редакції збірника 27.10.2022 р.  
Рекомендовано до друку редколегією збірника (Протокол № 5 від 20.12.2022 р.)*