

УДК (628.52.011.56:621.771.23-413):620.179.1

М.Г. ІЄВЛЄВ\*, Г.Г. ГРАБОВСЬКИЙ\*\*

**МАТЕМАТИЧНІ МОДЕЛІ ДЕФОРМАЦІЇ КЛІТІ ДЛЯ АСУ ТП  
ТОВСТОЛИСТОВИХ ПРОКАТНИХ СТАНІВ**

\*Інститут проблем математичних машин і систем НАН України, м. Київ, Україна

\*\*ДНВК «Київський інститут автоматики», м. Київ, Україна

**Анотація.** Одним із найважливіших показників роботи товстолистого стану є точність реалізації заданих геометричних розмірів прокатної продукції. Значною мірою цей показник залежить від точності прогнозування параметрів прокатки за математичними моделями. Математична модель деформації кліті поряд з моделлю зусилля прокатки є найважливішою при управлінні геометричними розмірами прокатної продукції на товстолистових станах: товщиною, шириною, профілем і площинністю листа. У статті розглянуті відомі методики розрахунку деформації елементів кліті, показано, що вони дають істотно різні результати і придатні лише для якісної оцінки деформації кліті, а ті з них, які мають достатню точність, громіздкі і непридатні для реалізації в керуючих обчислювальних машинах, що використовуються при автоматизації процесів прокатки в реальному масштабі часу. З вищесказаного випливає, що найбільш правильний метод отримання моделі деформації кліті, придатної для використання в АСУ ТП, експериментальний. Розглянуто розроблену авторами модель деформації кліті, отриману шляхом проведення активних експериментів із мінімальним порушенням технологічного процесу. Методика експериментів передбачає перерозподіл обтиснень між пропусками при прокатці різних заготовок у всьому діапазоні ширини листів, що підлягають прокатуванню на стані. Розглянуто ще один спосіб визначення характеристик деформації кліті, розроблений авторами, який дозволяє визначати ці характеристики у процесі автоматичного управління прокаткою без перерозподілу обтиснень між пропусками. Описані у статті математичні моделі деформації кліті, розроблені авторами, були використані в ряді автоматизованих систем управління режимами прокатки на ТЛС.

**Ключові слова:** товстолистий стан, автоматичне керування, математичні моделі, деформація кліті, зусилля прокатки, АСУ ТП.

**Аннотация.** Одним из важнейших показателей работы толстолистого стана является точность реализации заданных геометрических размеров прокатной продукции. В значительной степени этот показатель зависит от точности прогнозирования параметров прокатки по математическим моделям. Математическая модель деформации клетки наряду с моделью усилия прокатки является важнейшей при управлении геометрическими размерами прокатной продукции на толстолистных станах: толщиной, шириной, профилем и плоскостностью листа. В статье рассмотрены известные методики расчета деформации элементов клетки. Показано, что они дают существенно различные результаты и пригодны лишь для качественной оценки деформации клетки, а те из них, которые имеют достаточную точность, громоздки и непригодны для реализации в управляющих вычислительных машинах, используемых при автоматизации процессов прокатки в реальном масштабе времени. Из вышесказанного следует, что наиболее правильный метод получения модели деформации клетки, пригодной для использования в АСУ ТП, экспериментальный. Рассмотрена разработанная авторами модель деформации клетки, полученная путем проведения активных экспериментов с минимальным нарушением технологического процесса. Методика экспериментов предусматривает перераспределение обжатий между пропусками при прокатке различных заготовок во всем диапазоне прокатываемой на стане ширины. Рассмотрен еще один способ определения характеристик деформации клетки, разработанный авторами и позволяющий определять эти характеристики в процессе автоматического управления прокаткой без перераспределения обжатий между пропусками. Описанные в статье математические моде-

ли деформации клетки, разработанные авторами, были использованы в ряде автоматизированных систем управления режимами прокатки на ТЛС.

**Ключевые слова:** толстолистовой стан, автоматическое управление, математические модели, деформация клетки, усилие прокатки, АСУ ТП.

**Abstract.** One of the most important indicators of the plate mill operation is the accuracy of implementation of the specified geometric dimensions of rolled products. To a large extent, this indicator depends on the accuracy of predicting rolling parameters using mathematical models. The mathematical model of the stand deformation, along with the rolling force model, is the most important in controlling the geometric dimensions of rolled products on thick-plate mills: thickness, width, profile and flatness of the sheet. The paper discusses the well-known methods of calculating the deformation of the stand elements, it is shown that they give significantly different results and are suitable only for a qualitative assessment of the deformation of the stand, and those of them that have sufficient accuracy are cumbersome and unsuitable for implementation in control computer used in the automation of rolling processes in real time. From the above, it follows that the most correct method for obtaining a model of stand deformation suitable for use in ACS TP is experimental. The paper considers the stand deformation model developed by the authors, obtained by conducting “active” experiments with minimal disruption of the technological process. The experimental technique provides for the redistribution of reductions between passes during rolling of various billets in the entire range of widths rolled on the mill. Another method for determining the deformation characteristics of the stand, developed by the authors, is considered and makes it possible to determine these characteristics in the process of automatic rolling control without redistributing reductions between passes. The mathematical models of the stand deformation described in the paper, developed by the authors, were used in a number of automated control systems for rolling modes on the rolling mill.

**Keywords:** plate mill, automatic control, mathematical models, stand deformation, rolling force, ACS TP.

DOI: 10.34121/1028-9763-2020-3-87-92

## 1. Вступ

Математична модель деформації кліті поряд з моделлю зусилля прокатки є найважливішою при управлінні товщиною, шириною, профілем і площинністю листа на товстолистових станах. Аналіз вимог до точності математичних моделей параметрів прокатки для АСУ ТП товстолистових станів (ТЛС) і математичні вирази, що дозволяють, задаючись вимогами до точності кінцевих товщини і ширини листа, визначати допустимі похибки моделей зусилля прокатки і деформації кліті, наведені в [1].

Метою цієї статті є опис і порівняння відомих у літературі і розроблених за участю авторів математичних моделей деформації кліті на ТЛС. Розроблена і використана для ряду АСУ ТП ТЛС математична модель деформації кліті отримана шляхом проведення активних експериментів з мінімальним порушенням технологічного процесу.

## 2. Математичні моделі деформації кліті

Дослідженню деформації кліті присвячено значну кількість робіт. Робочу кліть розглядають як систему, що складається з окремих пружних елементів, яка під дією зусилля прокатки отримує деформацію відповідно до закону Гука. Загальна пружна деформація кліті стану визначається співвідношенням

$$\sigma_K = \frac{P}{M_K^P}, \quad (1)$$

де  $P$  – зусилля прокатки,  $M_K^P$  – коефіцієнт жорсткості робочої кліті.

У формулі (1) величина  $\frac{1}{M_K^P}$ , зворотна жорсткості, називається «податливістю»

кліті і характеризується величиною зміни розчину валків, що виникає в результаті пружної деформації кліті під дією одиничного зусилля.

Податливість усієї кліті дорівнює сумі податливостей її окремих деталей:

$$\frac{1}{M_K^P} = \frac{1}{M_B^P} + \frac{1}{M_D^P} + \frac{1}{M_C^P}, \quad (2)$$

де  $M_B^P$ ,  $M_C^P$  – коефіцієнт жорсткості валкової системи і станини відповідно,  $M_D^P$  – сумарний коефіцієнт жорсткості всіх деталей кліті, виключаючи станину і валкову систему.

На підставі даних досліджень [2] показано, що найбільш складна деформація і більша кількість змінних, що впливають на деформацію кліті, доводиться на валкову систему. Однак, відомі методики розрахунку деформації валкової системи дають істотно різні результати і придатні лише для якісної оцінки прогину валків [3, 4], а ті з них, які мають достатню точність, громіздкі і непридатні для реалізації в реальному масштабі часу в ЕОМ, що використовуються при автоматизації процесів прокатки.

При визначенні деформації необхідно також урахувати геометричне профілювання і знос робочих і опорних валків, а також їх температурний профіль. Існують методики, наприклад [5], які дозволяють урахувати згадані вище фактори. Необхідно, однак, відзначити, що ці методики не є універсальними. Вони отримані на конкретних станах і не можуть бути використані на інших. Крім того, експериментальні дослідження показують, що деформація кліті (навіть виключаючи валкову систему) далека від лінійної [4]. Це можна пояснити вибіркою люфтів, змінанням прилеглих поверхонь, які проходять із підвищенням тиску до значення, що обумовлює повне прилягання і перехід до простого розтягування – стиску. З вищесказаного випливає, що теоретичні моделі деформації кліті придатні лише для попередніх розрахунків, а найбільш правильний метод отримання моделі деформації кліті, придатної для використання в АСУ ТП, експериментальний.

Відомий спосіб експериментальної оцінки характеристик деформації кліті прокатного стану від зусилля прокатки, який полягає в тому, що зразки (картки) з м'якої сталі обжимають зближенням валків натискним механізмом до досягнення певного навантаження (зусилля), розводять валки, подають картку у напрямку прокатки і повторюють обтиснення з збільшенням навантаження у кілька разів. Потім змінюють зусилля прокатки  $P$  і положення натискного механізму  $H$  у кожному обтисненні, вимірюють товщину картки  $h$  у місцях проведених навантажень; обчислюють зміни зусилля  $\Delta P$ , положення натискного механізму  $\Delta H$ , товщини картки  $\Delta h$  між двома черговими навантаженнями і обчислюють характеристики деформації кліті за такими формулами [6]:

$$M = \frac{\Delta P}{\Delta h - \Delta H}, \quad (3)$$

$$\chi = h - H - \frac{P}{M}, \quad (4)$$

де  $M$  – модуль жорсткості кліті, що залежить від ширини листа,  $\chi$  – поправочний член, що враховує початкове профілювання валків, їх знос і теплову деформацію,  $h$ ,  $H$ ,  $P$  відповідають одному з місць проведених навантажень. Величина деформації кліті  $d$ , що дорівнює різниці товщини листа і розчину ненавантажених валків (характеризується положенням натискного механізму), визначається залежністю [7, 8]

$$d = \chi + \frac{P}{M} \quad (5)$$

Недоліком цього способу є, по-перше, те, що описаний спосіб передбачає проведення спеціального експерименту і вимагає припинення прокатки. Внаслідок цього отримане значення модуля жорсткості кліті для різної ширини обтиснених карток інтерполюється на проміжні значення ширини розкату з певною похибкою, що погіршує точність одержуваного з урахуванням ширини модуля жорсткості кліті. По-друге, в періоди між проведеннями експерименту фактичні характеристики деформації кліті ( $M, \chi$ ) змінюються і відрізняються від одержуваних у результаті експерименту, відповідно погіршується точність прокатки. Внаслідок цього у процесі управління прокаткою потрібно періодичне уточнення характеристик деформації кліті.

Авторами розроблена і використана для ряду АСУ ТП ТЛС модель деформації кліті, яка отримана шляхом проведення активних експериментів із мінімальним порушенням технологічного процесу [7]. Методика передбачає перерозподіл обтиснень за пропусками при прокатці різних заготовок у всьому діапазоні ширин, що прокатуються на стані. За фактичним розчином валків, зусиллям прокатки і товщини заміряної смуги розраховується деформація кліті (рис. 1):

$$d_{кл} = h_{вых} - H_{ки}, \quad (6)$$

де  $h_{вых}$  – заміряна товщина смуги, яка визначається шляхом вимірювання мікрометром товщини відрізаних від розкату проб,  $H_{ки}$  – фактичний розчин валків, зафіксований за показаннями датчика розчину валків.

Для визначення початкової ділянки кривої деформації кліті безпосередньо перед прокаткою досліджуваної партії розкатів проводиться зведення валків у «забій» (зведення робочих валків з максимально можливим зусиллям). При цьому фіксуються розчин валків і зусилля прокатки месдозами (пристроями вимірювання зусилля прокатки). Далі проводиться розведення валків з одночасною фіксацією показань месدوزи і датчика розчину валків у контрольних точках. За розрахованою деформацією кліті і відповідною їй силою прокатки будується значення жорсткості кліті. Теоретична пружна деформація кліті  $d$  може бути представлена прямою, пропорційною вертикальній складовій сили прокатки  $P$  (згідно з законом Гука),

$$d = \frac{P}{M_T^P}, \quad (7)$$

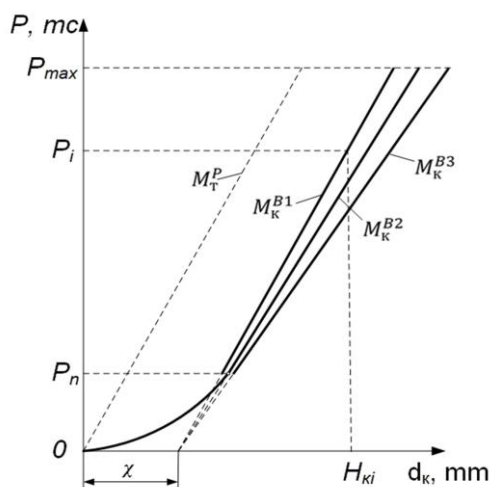


Рисунок 1 – Графік залежності деформації кліті від зусилля прокатки

де  $M_T^P$  – жорсткість робочої кліті теоретична (рис. 1).

Експериментально визначена жорсткість кліті представлена кривою  $M_к^B$ . Початкова ділянка має значну кривизну, що пояснюється нерівномірною пружною деформацією навантажених деталей робочої кліті (наявністю люфтів і мікронерівностей по контактних поверхнях). Експериментальна крива жорсткості може бути представлена у вигляді двох ділянок. Перша ділянка характерна для прокатки з невеликою силою  $P_L$  ( $P_L \approx 0,1P_{max}$ ), де  $P_{max}$

– максимально допустима розрахункова сила прокатки в даній кліті.

У цьому випадку товщина листа на початковій ділянці при  $P_i < P_{Л}$

$$h_{\text{вих}} = H_{ki} + a_0 P^2 + a_1 P, \quad (8)$$

де  $a_0, a_1$  – постійні коефіцієнти.

Друга ділянка кривої деформації використовується при прокатці з силою  $P_i$ , що перебуває в діапазоні  $P_i > P_{Л}$ . У цьому випадку товщина листа при максимальній ширині визначається як

$$h_{\text{вих}} = H_{ki} + \chi + \frac{P_i}{M_{\kappa}^{B1}}. \quad (9)$$

Аналогічно будуються криві  $M_{\kappa}^{B2}, M_{\kappa}^{B3}$  і так далі для інших ширин, що прокатуються на стані.

За наведеною методикою для ТЛС 2250 і 3600 шляхом кусочно-лінійної апроксимації були отримані коефіцієнти модулів деформації клітей у всьому робочому діапазоні зміни сили прокатки і ширини листів, які представлені в табл. 1.

Таблиця 1 – Значення коефіцієнтів модулів клітей на початковій ділянці деформації  $P_i \leq P_{Л}$ , кН / мм

Ширина металу, що прокатується, мм	Модуль кліті ТЛС 2250 при $a_0 = -119 \cdot 10^{-7}$ і $a_1 = 976 \cdot 10^{-5}$	Модуль кліті ТЛС 3600 при $a_0 = -98 \cdot 10^{-7}$ і $a_1 = 857 \cdot 10^{-5}$
$B \leq 1250$	5000	6000
$1250 < B < 1800$	5300	6400
$1800 \leq B \leq 2500$	5600	6800
$B > 2500$	–	7200

Розглянемо ще один спосіб визначення характеристик деформації кліті, розроблений авторами і який дозволяє визначати ці характеристики у процесі автоматичного управління прокаткою без перерозподілу обтиснень за пропусками [7]. У передостанньому і останньому пропусках циклу прокатки від моменту появи зусилля прокатки і до досягнення зусиллям прокатки фіксованого значення, близького до нуля, проводиться зчитування інформації про кут повороту валків ( $\varphi_{N-1}$  і  $\varphi_N$ ) після заповнення осередку деформації, про що свідчить досягнення зусиллям прокатки сталого значення. У тих же пропусках проводиться зчитування інформації про зусилля прокатки ( $P_{N-1}$  і  $P_N$ ) і положення натискного механізму ( $H_{N-1}$  і  $H_N$ ), а після закінчення циклу прокатки зчитується інформація про товщину прокатаної смуги ( $h_N$ ).

Витяжка в останньому пропуску визначається за формулою

$$\lambda_N = \frac{\varphi_N D (1 + S_N^*)}{\varphi_{N-1} D (1 + S_{N-1}^*)}, \quad (10)$$

де  $D$  – діаметр робочих валків,  $S_N^*, S_{N-1}^*$  – випередження металу відповідно в останньому і передостанньому пропусках.

Як показує чисельний аналіз, для умов прокатки на ТЛС відмінністю випереджень у сусідніх пропусках можна знехтувати, тобто  $S_N^* \approx S_{N-1}^*$ . Відповідно

$$\lambda_N = \frac{\varphi_N}{\varphi_{N-1}}.$$

За витяжкою  $\lambda_N$  і вимірною кінцевою товщиною обчислюється товщина розкату перед останнім пропуском:

$$h_{N-1} = h_N \frac{\varphi_N}{\varphi_{N-1}}.$$

У результаті рішення системи рівнянь

$$\left. \begin{aligned} h_N &= H_N + \chi + \frac{P_N}{M} \\ h_N \frac{\varphi_N}{\varphi_{N-1}} &= H_{N-1} + \chi + \frac{P_{N-1}}{M} \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

визначаються значення параметрів характеристики деформації кліті  $M$  і  $\chi$ :

$$M = \frac{P_{N-1} - P_N}{\left( h_N \frac{\varphi_N}{\varphi_{N-1}} - h_N \right) - (H_{N-1} - H_N)}, \quad (12)$$

$$\chi = h_N - H_N - \frac{P_N}{M}. \quad (13)$$

Описаний спосіб використовується в алгоритмах управління режимами прокатки на ТЛС.

### 3. Висновки

Проведено дослідження математичних моделей деформації кліті на ТЛС. Показано, що на деформацію прокатної кліті впливає ряд змінних: жорсткість валкової системи і станини, а також деталей кліті, причому найбільший вплив робить валкова система. Розроблена за участю авторів математична модель деформації кліті, отримана шляхом проведення активних експериментів із мінімальним порушенням технологічного процесу, була використана в АСУ ТП ряду станів, у тому числі листових станів 1500, 2250, 3600 і 5000.

### СПИСОК ДЖЕРЕЛ

1. Ієвлев Н.Г. Анализ требований к точности математических моделей параметров прокатки для АСУ ТП толстолистовых станов. *Математичні машини і системи*. 2018. № 4. С. 56–68.
2. Меерович И.М., Герцев А.И., Горелик В.С. и др. Повышение точности листового проката. М.: Металлургия, 1969. 262 с.
3. Полухин П.И., Железнов Ю.Д., Полухин В.П. Тонколистовая прокатка и служба валков. М.: Металлургиздат, 1967. 231 с.
4. Сафьян М.М. Прокатка широкополосной стали. М.: Металлургия, 1969. 357 с.
5. Антонов С.П., Боровик Л.К., Поляков Е.А. и др. Расчет профилировки валков листопркатных станов с использованием ЦВМ. *Сталь*. 1973. № 2. С. 136–140.
6. Руденко Е.А., Коновалов Ю.В., Остапенко А.Л., Оробцева В.В. *Металлургия*. 1975. № 3. С. 61–65.
7. Ієвлев М.Г., Грабовський Г.Г. Математичні моделі і алгоритми керування в АСК ТП товстолистових прокатних станів. К.: Техніка, 2001. 248 с.
8. Ієвлев М.Г., Корбут В.Б. Автоматизовані системи захисту устаткування прокатних клітей від перевантажень. *Науково-технічна інформація*. 2011. № 4 (50). С. 50–53.

Стаття надійшла до редакції 30.07.2020