

DOI: 10.31319/2519-2884.40.2022.3

УДК 621.771.252

В.М. Самохвал, к.т.н., доцент, volsamokhval@gmail.com

О.П. Максименко, д.т.н., професор, 0976776379max@gmail.com

О.В. Нікулін, к.т.н., доцент, av_nikulin@ukr.net

А.Б. Приймак, інженер, personalrav_@ukr.net

Дніпровський державний технічний університет, м. Кам'янське

МОДЕЛЬ ПРОКАТУВАННЯ СТРИЖНІВ В КАЛІБРАХ СИСТЕМИ «ОВАЛ-КРУГ»

Розроблено математичну модель неперервного прокатування круглих стрижнів, яка дозволяє визначати формозміну розкатів, розміри калібрів та інші технологічні параметри. Вдосконалення моделі ґрунтується на використанні умови постійності секундного об'єму, як для швидкісного режиму прокатування, так і для уточнення деформаційного режиму. До особливостей моделі відноситься призначення відношення осей овальних розкатів та використання показника неузгодженості швидкостей в міжклітьових проміжках для контролю і мінімізації натягіння. Модель також може бути використана за основу в системах автоматичного регулювання процесу прокатування для діючих станів.

Ключові слова: неперервне прокатування, модель, вріз, калібр, випередження, натягіння.

A mathematical model of continuous rolling of round rods has been developed, which allows to determine the shape change of workpiece, gauge sizes and other technological parameters. Improvement of the model is based on the use of the condition of constant second volume, both for speed rolling regime and to refine the deformation regime. The peculiarities of the model include the purpose of the ratio of the axes of oval workpieces and the use of the rate of mismatch in the interstand spaces to control and minimize tension. The model can also be used as a basis in systems of automatic control of the rolling process for existing mills.

Key words: continuous rolling, model, groove, pass, forward slip, tension.

Постановка проблеми

Стрижні, як «гарячекатані довгомірні вироби, які мають номінальний розмір 5 мм або більше та змотані у неправильні вільні мотки» [1], виготовляють виключно методом неперервного прокатування. Для такого процесу важливо узгодження деформаційних та кінематичних параметрів між клітьми стану, особливо при застосуванні групового приводу.

На дровових станах попереднього покоління, типу чотириниткових 250, таке узгодження забезпечувалось на етапі розробки технології, виходячи з умови «мінімізації натягіння». Для сучасних високошвидкісних станів стабільна і ефективна робота можлива лише за умов застосування систем автоматичного керування технологічним процесом. Такі системи передбачають використання певних алгоритмів автоматизованого керування, в яких реалізуються певні моделі процесу [2]. Від адекватності таких моделей, залежить ефективність роботи стану та всього виробничого процесу. Тому, дослідження, спрямовані на удосконалення існуючих моделей процесу прокатування стрижнів та розробку нових, зберігають актуальність.

Такі дослідження також важливі і з точки зору розвитку теорії прокатування, зокрема для уточнення залежностей між показниками тертя, випередження, розширення, натягіння при неперервному прокатуванні в калібрах.

Аналіз останніх досліджень та публікацій

Відомі два класи моделей процесу прокатування профілів, які призначені або для визначення параметрів формозміни (розробка калібрівки) або для керування роботою стану.

Узагальнені моделі першого класу при використанні для розробки технології процесу прокатування профілів простої форми, передбачають таку послідовність дій: розрахунок розмірів розкатів (режим деформації); визначення розмірів калібрів, які забезпечують формування розкатів відповідних розмірів; визначення швидкісного та температурного режимів прокату-

вання для умов конкретного стану; розрахунок енергосилових параметрів та навантажень приводу.

Моделі другого класу відображають зв'язок між контрольованими технологічними параметрами та виконання встановлених обмежень для забезпечення заданих показників якості продукції. В моделях цього класу використовують дані про характеристики стану та розміри калібрів, які є умовно постійними і не змінюються в процесі керування процесом. Відповідно, від точності визначення технологічних параметрів на першому етапі, тобто при розробці калібровки, залежить і ефективність моделей автоматичного керування.

Характерною відмінністю калібровок профілів простої форми є послідовне чергування рівновісних та нерівновісних перерізів розкатів. Наприклад, в системах калібрів «овал-квадрат», «овал-круг», «овал-ребровий овал». Наявність рівновісних перерізів значно спрощує визначення розмірів калібрів для формування таких перерізів розкатів.

Тому для профілів простої форми відомі методики основані на застосуванні емпіричних залежностей для визначення розмірів передчистових овальних калібрів у послідовності «овал-круг» [3]. Такі залежності або «формули» зводяться до призначення співвідношень h_{ov}/d_{ro} та b_{ov}/h_{ov} . Наприклад, для круглих профілів діаметром 5—7 мм рекомендується призначити $h_{ov}/d_{ro} = 0,7$; $b_{ov}/h_{ov} = 2,4 \div 2,5$. Така методика дозволяє визначити розміри овальних калібрів без розрахунків розширення в круглих калібрах. Наводячи окремі випадки невідповідності цим співвідношенням фактичних розмірів калібрів існуючих (на той час) калібровок, зокрема для катанки діаметром 5,26 мм, коли $b_{ov}/h_{ov} = 2,22$, Бейнон зауважує «сумнівну цінність застосування емпіричних формул при калібруванні» і робить висновок, що «правильність сконструйованих калібрів підтверджується лише дослідом» [3, с. 105].

Незважаючи на «сумнівну цінність» аналогічні емпіричні співвідношення, як такі, що перевірені практикою, знаходять застосування і в наш час. Зокрема, у довіднику [4, с. 176] рекомендовано використовувати графічні залежності для визначення розмірів овальних калібрів у системах «овал-круг» та «овал-ребровий овал». Наприклад, для круга діаметром 10 мм отримуємо: $h_{ov}/d_{ro} = 0,75$; $R/d_{ro} = 0,72$; $h_{ov}/b_{ov} = 0,53$; або $b_{ov}/h_{ov} = 1,88$.

Але найбільш відомою є класична методика розрахунку калібровок профілів простої форми, в тому числі і круглих, запропонована О.П. Чекмарьовим [5, с.182] та ін. Методика передбачає таку послідовність дій:

1. призначення коефіцієнтів видовження по клітям (калібрам);
2. за цими коефіцієнтами, використовуючи площу перерізу готового профілю, обчислюють площі перерізів розкатів по проходам;
3. визначення розширення в рівновісних калібрах (круг, квадрат) з використанням графічних залежностей $\Delta b = \varphi(d, \lambda, D)$;
4. розрахунок розмірів нерівновісних калібрів (овал, ромб) з використанням, наприклад для овалів, залежностей $h_{ov} = d - \Delta b$ та $b_{ov} = \frac{3 \cdot A_{ov}}{2 \cdot h_{ov} + G}$;
5. розрахунок розширення в нерівновісному калібрі для перевірки запасу на розширення.

Для визначення розширення в рівновісному калібрі, окрім графічних залежностей запропонованих О.П. Чекмарьовим [5, с. 110; с. 184], можуть використовуватись інші методики. Наприклад, для профілів простої форми пропонується використовувати залежність В.К. Смірнова [6, с. 98], отриману з статистичної обробки параметрів формо змінення розкатів для значної кількості сортових станів.

Набула поширення також методика Шинокури-Такаї для розрахунку розширення в калібрах простої форми на основі методу приведення до прямокутника розкату [7, 8]. Пропонуються також й інші методики та залежності, наприклад емпірична формула для умов дрогового блоку [9].

Кожна з наведених та інших емпіричних залежностей для розрахунку розширення характеризується певним рівнем точності, який у свою чергу може змінюватись в залежності від

розмірів розкату та умов конкретного стану, тобто є прийнятною лише умовно. Відповідно, в залежності від використаної методики визначення розширення, отримуємо неоднозначне визначення деформаційних параметрів процесу з сумнівною надійністю.

Крім невизначеності, точніше похибок, які вносить неточне визначення розширення, при розробці технології виникають аналогічні питання і відносно інших параметрів процесу, зокрема таких як коефіцієнт тертя, випередження, катаючий діаметр. Як зазначається в роботі [10], «у випадках розрахунку швидкісних параметрів для неперервного сортового прокатування в калібрах ситуація стає проблемною. ... Визначення швидкості прокатування в калібрах є складною задачею, яка завжди виникала при розробці калібрвок, та продовжує залишатись актуальною і в наш час».

Як відомо, основою для визначення швидкісного режиму неперервного прокатування є умова «постійності секундних об'ємів», яку іноді називають законом постійності потоку, і записують у вигляді [11]

$$A_1 \cdot V_1 = A_2 \cdot V_2 = A_i \cdot V_i = \text{const.}$$

Ці співвідношення відображають умову стабільності процесу, згідно якої, за відсутності підпору або натягіння, зменшенню площі поперечного перерізу розкату A_i , по ходу прокатування, повинно відповідати збільшення його швидкості V_i . Добуток площі розкату та його швидкості має розмірність $\text{мм}^2 \cdot \text{м/с}$, тобто умовний об'єм (розмірність довжини в третій степені) за одиницю часу.

На етапі розробки технології зміна площі поперечного перерізу розкату по клітям стану задається деформаційними параметрами, наприклад коефіцієнтом видовження. Швидкісний режим прокатування у більшості методик визначають через константу прокатування, обчислюючи частоту обертання валків. Швидкість виходу розкату з осередку деформації визначають через випередження. Але найпоширеніші залежності для розрахунку випередження, наприклад, формула Головіна-Дрездена [12], не дозволяють з достатньою точністю визначати цю фізичну величину при прокатуванні в калібрах.

В роботі [13], за результатами моделювання процесу прокатування в послідовності калібрів овал-круг, з використанням програмного продукту ABAQUS, підтверджено теоретичні положення, щодо впливу основних параметрів процесу на випередження. Для параметрів існуючої технології прокатування в чотирьох клітях неперервного стану отримано розрахункові значення випередження, відповідно, 0,035; 0,023; 0,037; 0,0025. Показано, що з збільшенням коефіцієнту тертя в діапазоні 0,25—0,33, спостерігається збільшення випередження. Швидкість прокатування також впливає на випередження обернено-пропорційно. Отримані результати також відповідають теоретичним положенням, щодо впливу розширення та товщини розкату. Наявність розширення суттєво зменшує випередження. Зменшення товщини розкату призводить до збільшення випередження, що простежується навіть у відмінностях випередження овальних і круглих калібрів.

Формулювання мети дослідження

Метою роботи є вдосконалення моделі процесу прокатування стрижнів круглого перерізу з використанням системи калібрів «овал-круг», придатної як для розробки технології (визначення розмірів калібрів та енергосилових параметрів) так і в якості програмного забезпечення автоматичних систем керування процесом.

Відповідно до мети, ставилась задача розробки інженерної моделі процесу на основі використання умови постійності секундних об'ємів та співвідношень геометричних параметрів, які стосуються системи калібрів овал-круг.

Виклад основного матеріалу

Характерною відмінністю моделі є застосування умови постійності об'єму для визначення не тільки швидкісного, але й деформаційного режиму прокатування. До особливостей моделі також відноситься використання постійного співвідношення осей овальних калібрів.

Послідовність розрахунку параметрів прокатування за розробленою моделлю, передбачає призначення коефіцієнтів видовження по клітям стану, визначення площ перерізів та розмірів розкатів за відомими геометричними співвідношеннями для круглих та овальних калібрів,

розрахунок швидкісного режиму прокатування. Результати таких розрахунків, які приймаємо за перше наближення, перевіряємо за критеріями узгодженості швидкостей виходу та входу розкату в осередок деформації для послідовно розташованих клітей, а також за умовою постійності секундного об'єму.

Якщо вказані критерії не виконуються, здійснюємо коригування деформаційного режиму, використовуючи секундний об'єм металу у чистовому калібрі та розрахований у попередньому наближенні швидкісний режим прокатування. Для скоригованого деформаційного режиму повторюємо всі розрахунки, здійснюючи тим самим друге наближення. Параметри прокатування, отримані у другому наближенні, також перевіряємо за обраними критеріями.

Подальше коригування параметрів прокатування (третє і наступні наближення) виконуємо приймаючи неузгодженість швидкостей як чинник, що характеризує відповідне натягіння або підпір. Враховуючи вплив натягіння на розширення у відповідних калібрах, уточнюємо розміри розкатів та інші технологічні параметри. За умови досягнення потрібного рівня точності визначення узгодженого швидкісного режиму прокатування, для отриманих параметрів здійснюється визначення розмірів калібрів та інших технологічних параметрів і розрахунок може вважатись закінченим.

Розглянемо приклад застосування моделі для визначення розмірів калібрів дрогового блоку при виготовленні катанки діаметром 5,5 мм.

Вихідними даними для моделювання процесу прокатування є діаметри валків та частота їх обертання по модулям блоку (клітям стану), а також коефіцієнт тертя по осередкам деформації. Для побудови калібрів задаємо кут випуску круглих калібрів φ та відношення осей овального розкату (b/h) . Технологічними параметрами моделі, які приймаються і можуть коригуватися, є коефіцієнти видовження λ_i та зазори в калібрах G_i по модулям блоку.

Діаметр готового профілю в гарячому стані дорівнює 5,57 мм, відповідно площа перерізу такого розкату становитиме 24,4 мм². Коефіцієнти видовження λ_i для овальних калібрів призначаємо дещо більшими ніж для круглих, наприклад, 1,25—1,27. Для круглих калібрів 1,236—1,246. Використовуючи відомі співвідношення, за призначеними коефіцієнтами видовження (див. табл. 1), обчислюємо площі перерізів та розміри круглих калібрів. Розміри овальних розкатів визначаємо з залежностей

$$h_{ov} = \sqrt{\frac{4 \cdot A_{ov}}{\pi \cdot (b/h)}}; \quad b_{ov} = h_{ov} \cdot (b/h),$$

де A_{ov} — площа поперечного перерізу овального розкату; (b/h) — відношення осей овальних розкатів, яке приймаємо однаковим для всіх калібрів.

Для розрахунку ширини калібрів B_{k_i} та радіусу побудови врізів калібрів R_{g_i} використовуємо відомі залежності [5, с. 184, с. 204]. Результати розрахунків за наведеним алгоритмом представлені в табл. 1.

Розміри розкатів, отримані за запропонованою моделлю вже у першому наближенні, є досить близькими до даних відомих калібровок, опублікованими різними авторами.

Швидкісний режим прокатування визначаємо задаючи частоту обертання двигунів приводу блоку. Так як передаточні числа для кожного з модулів відомі з технічних характеристик блоку, легко визначити частоту обертання та лінійну швидкість валків V_{r_i} кожного з модулів.

При цьому, катаючий діаметр валків визначали з залежності

$$D_{e_i} = D_0 - \frac{A_i}{b_i} + G_i.$$

Швидкість виходу розкату з осередку деформації визначали за відомим співвідношенням $V_1 = V_0 \cdot (1 + S)$.

Величину випередження розраховували за залежністю [17]

$$S = \sqrt[3]{\frac{b_k^2}{D_b \cdot R_g} \left[\left(0,5 - \frac{\alpha_b}{5 \cdot f} \right) \cdot (\lambda - 1) \right]^2},$$

де b_k — половина довжини лінії контактування розкату з поверхнею валка в площині виходу з осередку; D_b — діаметр валків по дну (осі симетрії) калібру; R_g — радіус контуру врізу калібру; α_b — кут захвату по осі симетрії калібру; f — коефіцієнт тертя.

Таблиця 1. Розрахункові розміри розкатів та їх порівняння з відомими калібровками

Розрахункові дані					Розміри розкатів за даними:			
№р	λ_i	A_i	h_i	b_i	[4, с.394]	[14]	[15]	[16, с.173]
0		235,24	17,31	17,31	кв. 15,5	Ø 17,3	Ø 15,4	Ø 17,0
1	1,25	188,19	10,95	21,89	11x22,8			
2	1,236	152,26	13,92	13,92	Ø13,5	Ø 14,2	Ø 12,9	Ø 13,7
3	1,27	119,89	8,74	17,47	8,8x18,3			
4	1,246	96,22	11,07	11,07	Ø 10,7	Ø 11,3	Ø 10,75	Ø 10,9
5	1,27	75,76	6,94	13,89	6,7x15,1			
6	1,246	60,80	8,80	8,80	Ø 8,75	Ø 8,9	Ø 8,98	Ø 8,7
7	1,27	47,88	5,52	11,04	5,3x12,5			
8	1,246	38,43	6,99	6,99	Ø 6,85	Ø 7,1	Ø 7,07	Ø 7,0
9	1,27	30,26	4,39	8,78	4,3x9,7			
10	1,24	24,40	5,57	5,57	Ø 5,5	Ø 5,5	Ø 5,57	Ø 5,6

Діаметри валків по осі симетрії, на відміну від катаючого діаметру, визначали за формулою

$$D_b = D_0 - h_i.$$

Відстань визначали як середнє значення відстані від вертикальної осі симетрії калібру до точки перетину контурів вхідного розкату і врізу калібру та половини ширини розкату. Наприклад, для овальних калібрів:

- $R_g = R_{ov}$;
- відстань від більшої осі овального калібру до точки перетину контурів

$$h_{ro} = \frac{-R_{ov} \cdot \Delta h - \Delta h^2 / 4}{2 \cdot R_{ro} - 2 \cdot R_{ov} - \Delta h};$$

- відстань між точками перетину контурів вхідного розкату та калібру

$$c_{ov} = \sqrt{R_{ro}^2 - h_{ro}^2};$$

- відстань

$$b_k = \frac{c_{ov} + b}{2},$$

де R_{ov} та R_{ro} — радіуси побудови контурів овального калібру та круглого розкату.

Для круглих калібрів відстань b_k визначали як половину відстані між точками переходу радіусного контуру до прямолінійних випусків.

За результатами розрахунків, зведених до табл. 2, випередження змінюється у межах 0,044—0,056.

Використовуючи випередження, обчислюємо швидкість виходу розкату з осередку деформації V1 для кожного з модулів блоку. Розділивши швидкість виходу на коефіцієнт видовження, отримуємо швидкість входу розкату V0 у відповідний осередок деформації. При цьому, згідного закону постійності потоку, швидкість виходу розкату з попередньої кліти повинна відповідати швидкості входу в наступну. Але, через похибки визначення параметрів формозміни та випередження, отримуємо відмінні значення цих величин. Відносна похибка визначення швид-

кості в міжклітьових проміжках становить від 0,3 до 2,3 %. Неузгодженість швидкостей входу в осередок i -тої кліті та виходу з попередньої ($i-1$) змінюється у межах від 0,9785 до 1,0173.

Таблиця 2. Розрахунок швидкісного режиму прокатування (перше наближення)

Np	De	nr	Vr	Db	αb	S	V1	V0	ΔV	$V0_i/V1_{i-1}$
0										1
1	205,40	1340,05	14,4	201,05	0,252	0,0563	15,22	12,18		1
2	203,06	1690,88	18,0	198,08	0,284	0,0523	18,92	15,31	-0,083	1,0054
3	207,14	2051,49	22,3	203,26	0,226	0,0566	23,51	18,51	0,408	0,9785
4	204,81	2616,33	28,1	200,93	0,252	0,0518	29,51	23,68	-0,174	1,0074
5	208,05	3241,95	35,3	205,06	0,201	0,0534	37,20	29,29	0,217	0,9926
6	206,59	4150,42	44,9	203,20	0,224	0,0496	47,12	37,82	-0,618	1,0166
7	208,66	5093,15	55,6	206,48	0,178	0,0506	58,46	46,03	1,089	0,9769
8	207,51	6512,24	70,8	205,01	0,199	0,0473	74,10	59,47	-1,009	1,0173
9	209,55	8106,64	88,9	207,61	0,158	0,0485	93,26	73,43	0,667	0,9910
10	208,62	10108,55	110,4	206,43	0,176	0,0442	115,30	92,98	0,278	0,9970

При цьому, майже для всіх круглих калібрів спостерігається задне натягіння, тобто швидкість входу розкату в калібр перевищує швидкість виходу розкату з попередньої кліті. Для овальних калібрів навпаки, спостерігається підпір — швидкість розкату на вході в овальний калібр менше швидкості виходу з попереднього круглого.

Крім значної неузгодженості швидкостей в міжклітьових проміжках, спостерігається значні відмінності значень секундного об'єму по клітям (модулям) блоку. Для усунення цих неузгодженостей здійснюємо коригування режиму деформації і перерахунок параметрів прокатування, яке вважаємо другим наближенням.

В другому наближенні за основу розрахунків приймаємо умову постійності секундного об'єму металу, який визначаємо за параметрами прокатування в чистовому калібрі. Для кожного з калібрів, проти ходу прокатування визначаємо площу перерізу розкату як частку від ділення секундного об'єму на швидкість виходу розкату з відповідного калібру (значення згідно табл. 2). За отриманими значеннями площі перерізів розкатів визначаємо коефіцієнти видовження, розміри розкатів та інші параметри прокатування, які зводимо до табл. 3.

Таблиця 3. Коригування режиму деформації (друге наближення)

Np	Ac	λ_{it}	h	b	Δh	Db	αb	S	V1	V0	$V0_i/V1_{i-1}$
0	235,24		17,31	17,31							
1	184,79	1,2730	10,85	21,69	6,46	201,15	0,2534	0,0592	15,27	11,99	1
2	148,70	1,2427	13,76	13,76	7,93	198,24	0,2829	0,0529	18,93	15,23	0,9978
3	119,67	1,2426	8,73	17,46	5,03	203,27	0,2225	0,0530	23,43	18,85	0,99599
4	95,33	1,2552	11,02	11,02	6,44	200,98	0,2531	0,0528	29,54	23,53	1,00447
5	75,62	1,2606	6,94	13,88	4,08	205,06	0,1995	0,0522	37,16	29,48	0,99786
6	59,70	1,2667	8,72	8,72	5,16	203,28	0,2253	0,0519	47,23	37,28	1,0033
7	48,12	1,2406	5,53	11,07	3,18	206,47	0,1756	0,0471	58,27	46,97	0,99448
8	37,97	1,2675	6,95	6,95	4,12	205,05	0,2004	0,0497	74,27	58,60	1,00564
9	30,17	1,2586	4,38	8,76	2,57	207,62	0,1574	0,0471	93,14	74,01	0,99644
10	24,40	1,2363	5,57	5,57	3,19	206,43	0,1758	0,0437	115,25	93,22	1,00086

Як видно з табл. 3, неузгодженість швидкостей суттєво зменшується, але зберігається. Тому в наступному третьому наближенні таку неузгодженість приймаємо як натягіння або підпір і уточнюємо розміри розкатів.

Задне натягіння призводить зменшення кута нейтрального перерізу і зони випередження. Через це зменшується підпираюча дія сил тертя у поздовжньому напрямку, що призводить до певного зменшення поперечної деформації (розширення). Підпір, тобто протилежне явище, коли швидкість розкату на вході в осередок менше ніж швидкість виходу розкату з попередньої кліті, супроводжується збільшенням зони випередження, збільшенням підпираючої дії сил тертя і відповідного збільшення розширення.

Ці теоретичні положення підтверджені експериментально в роботі [18], де відмічено, що «вплив міжклітьового натягіння на зменшення площі перерізу і на робочий діапазон послідовності проходів в основному досягається впливом на проходи з круглими калібрами».

Відповідно, в третьому наближенні приймаємо товщину розкатів незмінною, а розмір по ширині визначаємо з врахуванням впливу натягіння (підпору) на розширення. Результати розрахунків для третього наближення наведено в табл. 4.

Таблиця 4. Коригування розширення металу в калібрах блоку (третє наближення)

Np	h	b	Af	λ_{if}	Δh	αb	S	V1	V0	$V0_i/V1_{i-1}$	VF
0	17,31	17,31	235,24								2820,94
1	10,85	21,69	184,79	1,2730	6,460	0,2534	0,0592	15,27	11,99		2820,94
2	13,76	13,77	148,84	1,2416	7,933	0,2829	0,0528	18,93	15,24	0,99861	2817,01
3	8,73	17,49	119,87	1,2416	5,044	0,2228	0,0528	23,42	18,87	0,99678	2807,94
4	11,02	11,00	95,16	1,2597	6,469	0,2537	0,0534	29,56	23,46	1,00161	2812,45
5	6,94	13,89	75,69	1,2572	4,059	0,1990	0,0518	37,14	29,54	0,99964	2811,43
6	8,72	8,71	59,62	1,2695	5,171	0,2256	0,0523	47,24	37,21	1,00183	2816,58
7	5,53	11,10	48,24	1,2360	3,172	0,1753	0,0465	58,23	47,11	0,99729	2808,96
8	6,95	6,94	37,88	1,2734	4,143	0,2010	0,0504	74,32	58,36	1,00219	2815,13
9	4,38	8,78	30,21	1,2538	2,555	0,1569	0,0466	93,09	74,25	0,99901	2812,35
10	5,57	5,57	24,39	1,2386	3,204	0,1762	0,0440	115,28	93,07	0,99979	2811,75

Для прикладу, що розглядається, динаміка зміни розрахункових значень відношення швидкостей та секундного об'єму по першим трьом наближенням показана на рис. 1 та 2.

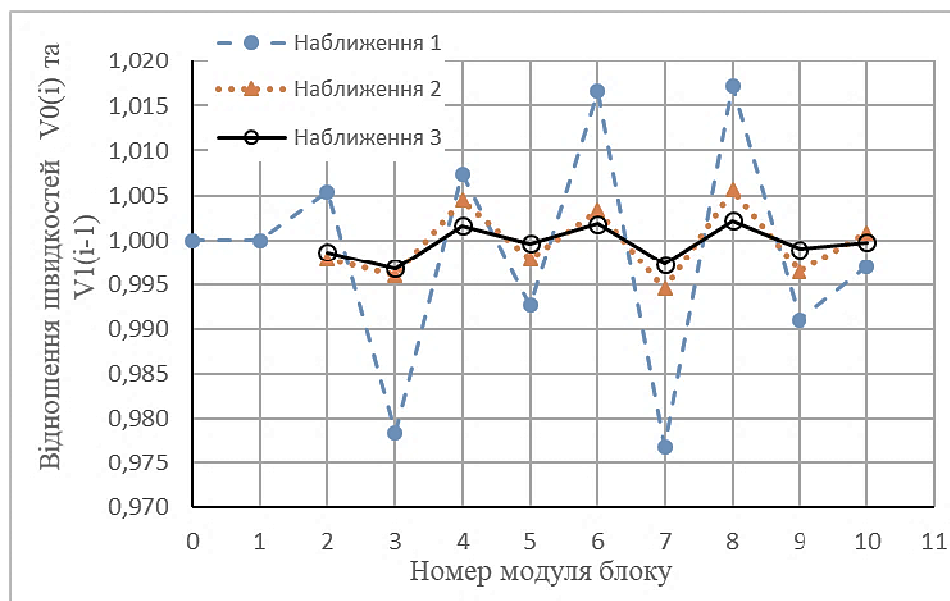


Рис. 1. Зміна незгодженості швидкостей по наближенням

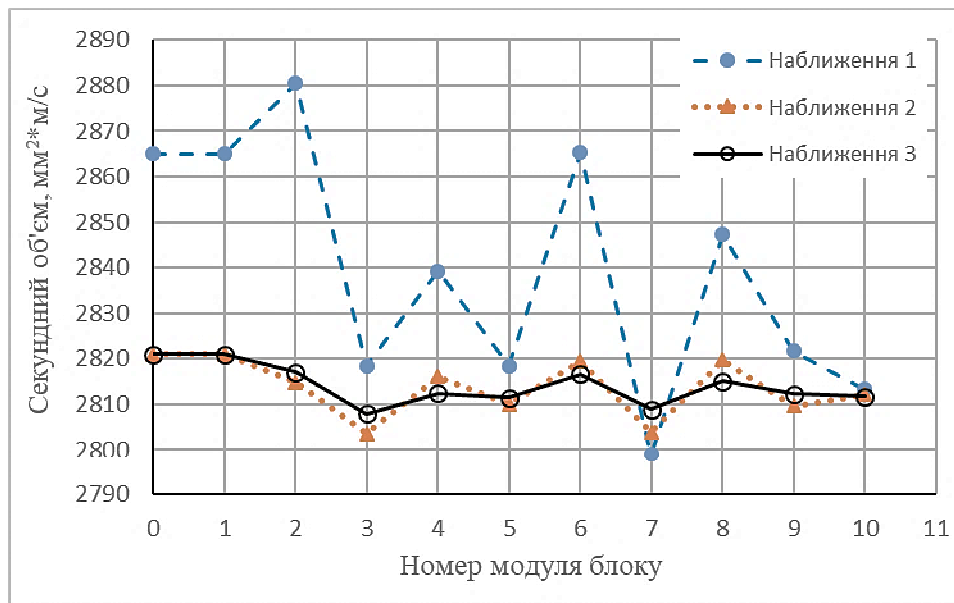


Рис. 2. Зміна значень секундного об'єму металу по наближенням

Модель передбачає можливість здійснення подальших наближень до досягнення заданого рівня точності визначення швидкісного режиму та/або секундного об'єму. Але за результатами обчислень у подальших наближеннях, після перших трьох, такі параметри як розміри розкатів, площа перерізу та інші, змінюються незначною мірою. Відповідно, для визначення розмірів калібрів з точністю характерною для інженерних розрахунків достатньо перших трьох наближень.

Розміри калібрів розраховуються для призначених у першому наближенні зазорів G по клітям, та для розмірів розкатів, визначених у третьому наближенні. Використовуючи відомі геометричні співвідношення, визначаємо ширину калібрів (ширину врізу) Bgr , глибину врізу Hgr , радіус побудови R . Зокрема, для овальних калібрів радіус побудови калібру визначаємо за формулою

$$R = \frac{Hgr}{2} + \frac{Bgr^2}{Hgr},$$

де Bgr — ширина врізів, що утворюють калібр, по буртам валків, яку приймаємо в 1,06 рази більше ніж ширина розкату.

Ширину овального калібру визначаємо як довжину хорди по осі калібру

$$Bk = 2 \cdot \sqrt{R^2 - (R - H_{gr} - G/2)^2}.$$

Для круглих калібрів використовуємо співвідношення [6]

$$Bk = d / \cos(\varphi); \quad Bgr = Bk - G \cdot \tan(\varphi).$$

Таким чином, сукупність використаних залежностей та послідовність обчислень реалізують математичну модель процесу прокатування круглих профілів у системі калібрів «овал-круг». Модель, на основі прийнятих базових параметрів, дозволяє в автоматичному режимі визначати розміри калібрів та технологічні параметри неперервного прокатування круглих профілів. Для розширення переліку технологічних параметрів, модель може бути доповнена додатковими блоками, наприклад для визначення температурних та енергосилових параметрів, зношення валків. Засоби реалізації програми можуть бути обрані в залежності від потреб, від Excel до середовищ професійних комп'ютерних систем. Модель також може бути використана за основу при розробці моделей автоматичного регулювання процесу прокатування.

Висновки

На основі використання умови постійності секундного об'єму металу розроблено інженерну модель процесу прокатування стрижнів у системі калібрів овал-круг. Алгоритм розрахунків за допомогою моделі передбачає здійснення трьох обов'язкових наближень. Перше наближення зводиться до призначення режиму деформацій по клітям стану через коефіцієнти видовження та визначення швидкісного режиму прокатування. Друге наближення включає коригування режиму деформування виходячи з умов забезпечення постійності секундних об'ємів, а третє — коригування розмірів розкату, відповідно до змін розширення від неузгодженості швидкісного режиму (натягіння або підпору).

В моделі використано відомі залежності та геометричні співвідношення, сукупність та послідовність використання яких забезпечує визначення технологічних параметрів та розмірів калібрів з необхідною точністю.

За потреби, пропонується модель може використовуватись як основа для визначення необхідного числа інших технологічних параметрів, за рахунок доповнення відповідними блоками.

Крім цього, модель може бути використана за основу при розробці систем автоматичного регулювання процесу прокатування для умов діючого стану.

Список використаної літератури

1. ДСТУ EN 10079:2018 Виробисталеві. Номенклатура (EN 10079:2007, IDT). На заміну ДСТУ EN 10079-2002. Чинний від 01.01.2020. ДП «УкрНДНЦ». 2021. 38 с.
2. Бобух А.О. Автоматизовані системи керування технологічними процесами: Навч. посібник. Харків: ХНАМГ, 2006. 185 с.
3. Бейнон Р. Калибровка валков и расположение прокатных станов. (Пер. з англ. І.С. Победіна, за ред. П.І. Полухіна). М.: Metallurgizdat. 1960. 204 с.
4. Беньковский М.А., Богоявленский К.Н., Виткин А.И. и др. Технология прокатного производства: Справочник. В 2-х книгах. М.: Metallurgiya, 1991. Кн. 1. 440 с.
5. Чекмарев А.П., Мутьев М.С., Машковцев Р.А. Калибровка прокатных валков: Учебное пособие. М.: Metallurgiya. 1971. 512 с.
6. Смирнов В.К., Шилов В.А., Инатович Ю.В. Калибровка прокатных валков: Учебное пособие. М.: Metallurgiya. 1987. 368 с.
7. Shinokura T., Takai K. A new method for calculating spread in rod rolling. *J. Applied Metalworking*. 1982. 2(2). P. 94–99. <https://doi.org/10.1007/BF02834206>
8. Lambiase F. and Langella A. Automated Procedure for Roll Pass Design. *Journal of Materials Engineering and Performance*. 2009. 18(3) P. 263–272. DOI: 10.1007/s11665-008-9289-2
9. Штода М.Н. и др. Уширение при прокатке в калибрах вытяжной системы «овал-круг». *Вісник НТУ «ХП»*. 2016. №30 (1202). С. 79–87.
10. Огинский И.К., Ремез О.А., Самсоненко А.А., Бояркин В.В. Опережение при прокатке в калибрах. *Обработка материалов давлением. Сборник научных трудов ДГМА*. 2014. №2(39). С. 159–164.
11. Выдрин В.Н., Федосиенко А.С., Крайнов В.И. Процесс непрерывной прокатки. М.: Metallurgiya, 1970. 456 с.
12. Василев Я.Д., Минаев О.А. Теория продольной прокатки: Підручник. Донецьк: УНІТЕХ, 2009. 488 с.
13. Arroni H, Menghari GH, Khojasteh J, Mouziraji MG, Mouloudi S. Experimental and Finite Element Investigation of Forward Slip in Rod Rolling and the Influences on Rolled Bars Process. *Int J Adv Technol*. 2018. 9: 212. doi:10.4172/0976-4860.1000212
14. Morgan Rod Reducing/Sizing Mill. Vdocument.in/ Primetals Technologies USA LLC. 2016. 5 p.
15. Eriksson C. Roll pass design for improved flexibility and quality in wire rod rolling: Doctoral thesis. Stockholm. 2004. 52 p. URL: SPIKBLAD.pdf (diva-portal.org)
16. Горбанев А.А., Жучков С.М., Филиппов В.В. и др. Теоретические и технологические основы высокоскоростной прокатки катанки. Минск: Выш. шк. 2003. 287 с.

17. Динник А.А., Галицкий В.П., Кукель С.Э., Ермаков С.И. Оперезение при прокатке в овальных и круглых калибрах. *Теория прокатки: Материалы Всесоюзной научно-технической конференции «Теоретические проблемы прокатного производства»*, Днепропетровск, ДМетИ. 1972. М.: Металлургия. 1975. С. 197–199.
18. Eriksson C., Lundberg S-E. Working range of roll pass sequences in wire rod rolling with interstand tensions. *Iron & Steelmaking*. 2004. Vol. 31, N 1, p.81–92.
DOI: 10.1179/030192304225011016 .

MODEL OF ROLLING RODS IN THE ROLL PASS OF THE OVAL-ROUND SYSTEM

Samokhval V., Maksimenko O., Nikulin O., Pryimak A.

Abstract

For modern high-speed rolling mills, stable and efficient operation is possible only with the use of automatic process control systems. Such systems involve the use of certain process models, both for control and technology development. Therefore, research aimed at improving existing models of the process of rolling rods and developing new ones remains relevant.

The aim is to improve the model of the process of rolling rods of round cross-section using a system of passes "oval-round", suitable for the development of technology (determining the size of pass and power parameters) and as software for automatic process control systems.

A characteristic difference of the proposed improved model is the application of the condition of volume constancy to determine not only the speed but also the deformation parameters of rolling. Features of the model also include the appointment of the ratio of the axes of oval passes and the use of the rate of mismatch in the interstand spaces to control and minimize tension. The sequence of calculations in the model includes an iterative procedure with three mandatory approximations, which involves adjusting the coefficients of elongation using the condition of constant volume, and adjusting the size of the workpieces using speed mismatch as a factor characterizing the corresponding tension or compressive.

The model uses known expression and geometric relationships, the combination and sequence of which provides the definition of technological parameters and sizes of roll passes with the required accuracy. The program can be implemented in various forms depending on the needs, from the most common applications to environments of professional computer systems. The model can be used as a basis for the development of systems for automatic control of the rolling process for the conditions of the existing mills.

References

- [1] DSTU EN 10079:2018 *Vyrobystalevi. Nomenklatura [Definition of steel products]* (EN 10079:2007, IDT). Valid from 01.01.2020. Kyiv. State Standard of Ukraine. 2011. 38 p. [in Ukrainian].
- [2] Bobukh A.O. (2006) *Avtomatyzovani systemy keruvannia tekhnolohichnymy protsesamy: Navch. posibnyk [Automated process control systems: Handbook]*. Kharkiv: National University of Urban Economy in Kharkiv. 185 p. [in Ukrainian].
- [3] Beinon R. (1960) *Kalybrovka valkov i raspolozhenye prokatnykh stanov [Roll Design and Mill Layout]* (Transl. from English I.S. Pobiedina, edited by P.I. Polukhina). M.: Metallurhyzdat. 204 p. [in Russian].
- [4] Beniakovskiy M.A., Bohoiavlenskiy K.N., Vytyn A.Y. y dr. (1991) *Tekhnolohiya prokatnoho proyzvodstva: Spravochnyk. V 2-kh knykhakh [Rolling technology: Handbook]* M.: Metallurgy. Book 1. 440 p. [in Russian].
- [5] Chekmarev A.P., Mutev M.S., Mashkovtsev R.A. (1971) *Kalybrovka prokatnykh valkov: Navch. posibnyk [Roll Pass Design: Handbook]*. M.: Metallurgy. 512 p. [in Russian].

- [6] Smyrnov V.K., Shylov V.A., Ynatovych Yu.V. (1987) *Kalybrovka prokatnykh valkov: Havch. posibnyk [Roll Pass Design: Handbook]*. M.: Metallurgy. 368 p. [in Russian].
- [7] Shinokura T., Takai K. (1982) A new method for calculating spread in rod rolling. *J. Applied Metalworking*. 2(2). P. 94–99. <https://doi.org/10.1007/BF02834206>
- [8] Lambiase F. and Langella A. (2009) Automated Procedure for Roll Pass Design. *Journal of Materials Engineering and Performance*. 18(3) P. 263–272. DOI: 10.1007/s11665-008-9289-2
- [9] Shtoda M.N. and other (2016) *Ushyrenye pry prokatke v kalybrakhvytiashnoi system «oval - kruh» [Spread by rolling in the roll pass of the elongation system "oval - round"]* Bulletin of NTU “KhPI”. # 30 (1202). P. 79–87. [in Russian].
- [10] Ohynskiy Y.K., Remez O.A., Samsonenko A.A., Boiarkyn V.V. (2014) *Operezhenye pry prokatke v kalybrakh [Forwardsleep of rolling in gauges]* Materials working by pressure. Collection of science papers DGMA. №2(39). P. 159–164. [in Russian].
- [11] Vydryn V.N., Fedosyenko A.S., Krainov V.Y. (1970) *Protsess nepreryvnoi prokatky [Continuous rolling process]*. M.: Metallurgy. 456 p. [in Russian].
- [12] VasylevYa.D., Mynaiev O.A. (2009) *Teoriiapozdovzhnoiprokatky:Pidruchnyk. [Theory of longitudinal rolling]*. Donetsk:UNITECH. 488 p. [in Ukrainian].
- [13] Arroni H, Menghari GH, Khojasteh J, Mouziraji MG, Mouloudi S. (2018) *Experimental and Finite Element Investigation of Forward Slip in Rod Rolling and the Influences on Rolled Bars Process*. Int J Adv Technol. 9: 212. DOI:10.4172/0976-4860.1000212
- [14] *Morgan Rod Reducing/Sizing Mill*. (2016) Vdocument.in/ Primetals Technologies USA LLC. 5 p.
- [15] Eriksson C. (2004) *Roll pass design for improved flexibility and quality in wire rod rolling*: Doctoral thesis. Stockholm. 52 p. URL: SPIKBLAD.pdf (diva-portal.org)
- [16] Horbanev A.A., Zhuchkov S.M., Fylyppov V.V. y dr. (2003) *Teoretycheskiye i tekhnolohycheskiye osnovy vysokoskorostnoi prokatky katanky [Theoretical and technological foundations of high-speed rolling of wire rod]* Mynsk: Vysh. shk. 287 p. [in Russian].
- [17] Dynnyk A.A., Halytskyi V.P., Kukel S.Э., Ermakov S.Y. (1972) *Operezhenye pry prokatke v ovalnykh i kruhlykh kalybrakh. Teoryia prokatky: Materyaly Vsesoiuznoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsyy «Teoretycheskiye problemy prokatnoho proyzvodstva» [Forwardsleepby rolling in oval and round passes. Rolling Theory: Proceedings of the All-Union Scientific and Technical Conference "Theoretical Problems of Rolling Production"]*. Dnepropetrovsk, DMetY. – M.: Metallurgy. 1975. P. 197–199. [in Russian].
- [18] Eriksson C., Lundberg S-E. (2004) *Working range of roll pass sequences in wire rod rolling with interstand tensions*. Iron & Steelmaking. Vol. 31, N 1, p.81–92. DOI: 10.1179/030192304225011016 .