

Перевірка математичної моделі технологічного процесу прокатки на стані Стеккеля заводу Ferriera Valsider SpA

В.В. Кухар¹ • О.Г. Курпе² • А.Г.Присяжний¹

1 - ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», м. Маріуполь, Україна;

2 - ПрАТ «ММК «ІМЕНІ ІЛЛІЧА», МЕТІНВЕСТ ХОЛДІНГ, м. Маріуполь, Україна

Received: 10 October 2018 / Accepted: 16 November 2018

Анотація. В роботі досліджена математична модель процесу прокатки гарячекатаних рулонів на стані Стеккеля заводу Ferriera Valsider SpA. Виконана перевірка розробленої моделі з метою можливості її використання за для проектування технології прокатки. Враховано вплив «пружини» клітей. Середня похибка при моделюванні температурного режиму прокатки на стані 3170 склала від 8,27% до 9,11%, на стані 1780 від 0,003% до -0,92%. Середня похибка при моделюванні сили прокатки на стані 3170 склала від 0,5% до 5,7%, на стані 1780 від -4,89 до 6,59%. Встановлено вплив на фактичний вимір температури попередньої обробки розкату гідробивом окалини, що призводить до значних похибок при подальшому порівнянні з результатами розрахунків.

Ключові слова: моделювання, сила прокатки, температурний режим, пружина кліті, стан Стеккеля.

Вступ

За останні роки суттєво збільшується кількість станів типу Стеккель, які пройшли декілька етапів еволюції. Сучасні стани в змозі виробляти не тільки важкодеформовані електротехнічні та вуглецеві сталі, а і високоміцні та корозійностійкі мікролеговані сталі. Також суттєво розширився розмірний сортамент: замість товщин 2-12 мм сучасні стани можуть виробляти прокат у товщинах від 1,5 до 50 мм, у тому числі у листах. Маса слябів, які використовуються, становить до 70 т. [3] Сучасні стани Стеккеля обладнані всім необхідним устаткуванням для виробництва високоякісного прокату.

У той же час, технологічні особливості виробництва нового сортаменту, якого потребує ринок, суттєво відрізняються від технології виробництва електротехнічних та вуглецевих марок. За для забезпечення необхідного комплексу властивостей, технологічний процес повинен динамічно корегуватися, що можливо зробити за допомогою математичної моделі, пристосованої до умов конкретного стану.

З розвитком цифрових технологій отримали поширене застосування способи математичного моделювання технологій прокатного виробництва. Різні автори пропонують математичні моделі з різною структурою, та які розроблені різноманітними методами [1-3, 6, 7, 9, 12-14]. Слід зазначити, що більшість робіт виконана на базі методу кінцевих елементів.

Різний рівень похибок, який можна отримати при використанні цих моделей, визначає подальше їх застосування від симуляції на рівні учбових програм [12] до цільового проектування технологій.

У роботі [13] автори пропонують застосовувати розроблену модель за для проектування технології контрольованої або термомеханічної [14] прокатки, так як вона враховує термофізичні та структурні параметри. При цьому авторами не вказаний рівень похибки, який дозволяє отримати ця модель. Особливу цікавість становить запропонована авторами [15] модель, яка враховує вплив анізотропії металу в процесі прокатки, у той час як ця особливість іншими авторами не вказана або не враховується.

Похибка, яка вказана авторами в роботі [4], визначена по силі прокатки та становить в середньому 1,42 МН. Слід зазначити, що вказана похибка залежить від рівня сили прокатки, що наведено на графіках в роботі [4]. Похибка при моделюванні вказана авторами в роботі [10] складає +/-10%, а в роботі [11] похибка складає до 15,6% у першому проході і далі знижується. В роботі [16] похибка складає менш ніж 8 %. Таким чином, різний рівень похибок у авторів дає можливість диференційовано використовувати запропоновані моделі за для розрахунку більш або менш чутливих до них способів виробництва. Однак, що є одноставним, так це використання моделей з найменшою похибкою для проектування технології контрольованої або термомеханічної прокатки, як вказано в роботах [13-14, 19].

Слід зазначити, що більшість математичних моделей, які розробляються інженіринговими підприємствами та перевірені на діючому обладнанні, мають обмежений доступ.

Таким чином, використання моделей за для розробки технології прокатки, її оптимізації суттєво спрощує цей процес, зменшує технологічні похибки та ризик отримання продукції незадовільної якості, на що, окрім іншого, звернули увагу автори робіт [5, 7,8].

Актуальність розробки та перевірки математичної моделі для умов стану Стеккеля заводу Ferriera Valsider SpA обумовлена потребою в засвоєнні нових технологій з метою розширення асортименту та задоволення потреб Європейського ринку.

Мета

Метою роботи є перевірка математичної моделі технологічного процесу прокатки гарячекатаних рулонів для умов стану Стеккеля заводу Ferriera Valsider SpA (металургійний завод, який успішно працює в провінції Верона, Італія, є часткою групи METINVEST з 2001 року), для подальшої розробки технології.

Основна частина

Основне устаткування лінії стану Стеккеля заводу Ferriera Valsider SpA складає методична штовхальна піч для нагрівання слябів, яка має шість зон та опалюється природним газом, стан 3170, для прокатування плит та підкату для стану Стеккеля, який включає кліть з двома горизонтальними валками, силою прокатки до 25 МН, та кліть з вертикальними валками, прохідну семизонну роликіву піч для проміжного підігріву підкату, яка опалюється природним газом. Стан Стеккеля включає кліть кварто 1780 з силою прокатки до 24 МН та пічки камерного типу з барабанними моталками, які опалюються природним газом. Установка для ламінарного охолодження полоси після прокатки довжиною 41 м, яка дозволяє охолодити метал зі швидкістю до 40°C/сек. Моталки, для змотування полоси товщиною до 20 мм.

Схема розміщення основного обладнання стану Стеккеля заводу Ferrier Valsider SpA наведена на рис. 1.

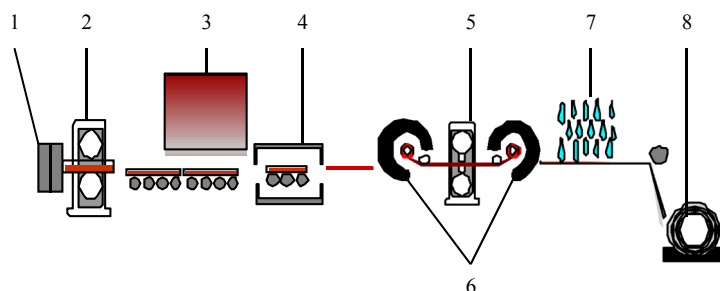


Рис. 1. Схема технологічної лінії з виробництва гарячекатаних рулонів на заводі Ferriera Valsider SpA

- | | |
|-------------------------------|--|
| 1 – еджер; | 5 – кліть кварто 1780; |
| 2 – чорнова кліть 3170; | 6 – пічні моталки; |
| 3 – штовхальна методична піч; | 7 – установка ламінарного охолодження; |
| 4 – прохідна роликіву піч; | 8 – моталка. |

Структура математичної моделі, що була використана для розрахунку, наведена на рис. 2.

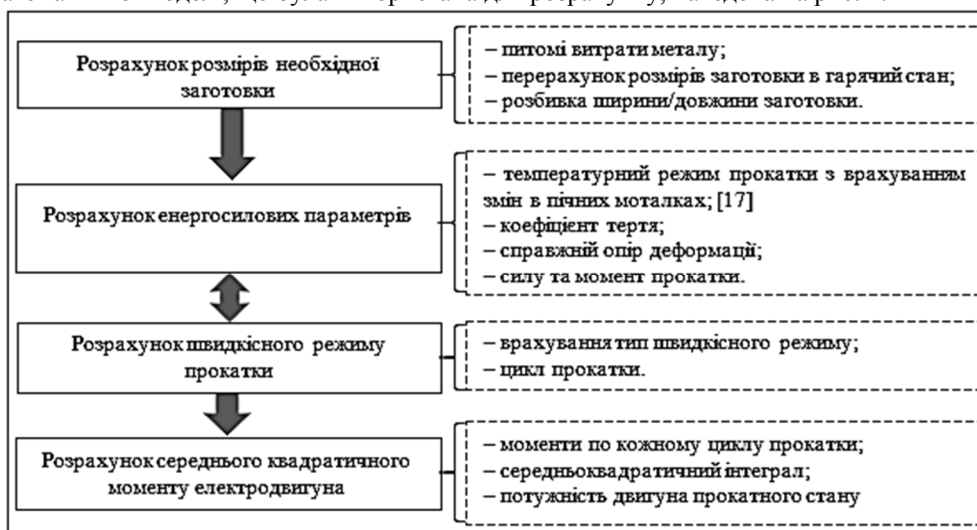


Рис. 2. Структура математичної моделі

При розробці моделі технологічного процесу стану Стеллеля, в якості бази використана модель [19], яка скорегована з урахуванням особливостей устаткування та факторів які впливають на температуру прокату [17].

Для перевірки математичної моделі використані фактичні дані по прокатці рулонів, сортамент яких наведений в табл. 1.

Таблиця 1

Сортамент слябів та рулонів для перевірки математичної моделі

шифр плавки	№ сляба	Марка сталі	Переріз слябу, мм	Переріз рулону, мм
81518	A1/02005400	S355JR+AR	220x1520x9800	15x1500
83270	A1/02008812	S355J2+N		12x1500
83749	A1/02008905	S355J2+N		10x1500

Хімічний склад слябів, використаних для перевірки моделі, наведений в табл. 2

Таблиця 2

Хімічний склад сталі з якої вироблявся прокат для перевірки моделі

шифр плавки	Масова доля елементів, %														
	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Cu	Al	Ti	Nb	Mo	V	N	As
81518	0,14	0,023	1,40	0,014	0,003	0,05	0,18	0,02	0,035	0,005	0,034	0,01	0,005	0,007	0,005
83270	0,14	0,015	1,34	0,017	0,004	0,04	0,02	0,02	0,033	0,005	0,034	0,01	0,005	0,005	0,005
83749	0,13	0,009	1,37	0,014	0,004	0,05	0,03	0,03	0,037	0,005	0,030	0,01	0,005	0,006	0,005

При моделюванні, розрахунок дійсного опору металу пластичній деформації виконувався з використанням фактичного хімічного складу слябів по методиці Андреюка та Тюленева [18].

Слід зазначити, що для використання фактичних даних по режимах прокатки, зазор між робочими валками треба перерахувати у товщину прокату з врахуванням «пружини» кліті.

Розрахунок «пружини» кліті дуо, стану 3170 виконано на підставі даних по валковому зазору, фактичній довжині прокату та силі прокатки у цьому проході:

$$S_r = F / (H_f - H_G), \quad (1)$$

де F – сила прокатки, МНх100; H_f – фактична товщина прокату, розрахована на підставі вимірювань фактичної ширини та довжини прокату в останньому проході та маси розкату, мм; H_G – валковий зазор у останньому проході, мм.

Таким чином, розрахована «пружина» кліті стану 3170 становить 180 МНх100/мм. Дані, з яких виконаний розрахунок, наведені в табл. 3

Таблиця 3

Дані розрахунку «пружини» кліті дуо, стану 3170

Параметр	Одиниця виміру	Значення
F	МНх100	1397
H_G	мм	29,4
Ширина прокату	мм	1494
Довжина прокату	мм	56280
Маса розкату	т	24,48
S_r	МНх100/мм	180

Для розрахунку «пружини» в кліті кварто 1780 стану Стеккеля, в залежності від сили прокатки, на основі вдосконаленого рівняння [19], розроблена наступна формула:

$$S_f = 2,0242 \ln(F) - 10,646 \quad (2)$$

Формула (2) отримана на фактичних даних, результати обробки яких наведені на рис. 3.

З врахуванням «пружини» обох клітей виконані розрахунки технологічних параметрів прокату рулонів, табл. 4, сортамент яких наведений в табл.1. Розрахунок справжнього опору деформації виконано по методиці Л.В. Андріюка, на основі хімічного складу сталі [3]. На підставі цих параметрів виконані розрахунки швидкісних режимів та моментів головних електродвигунів стану 3170 та 1780 (Стеккеля).

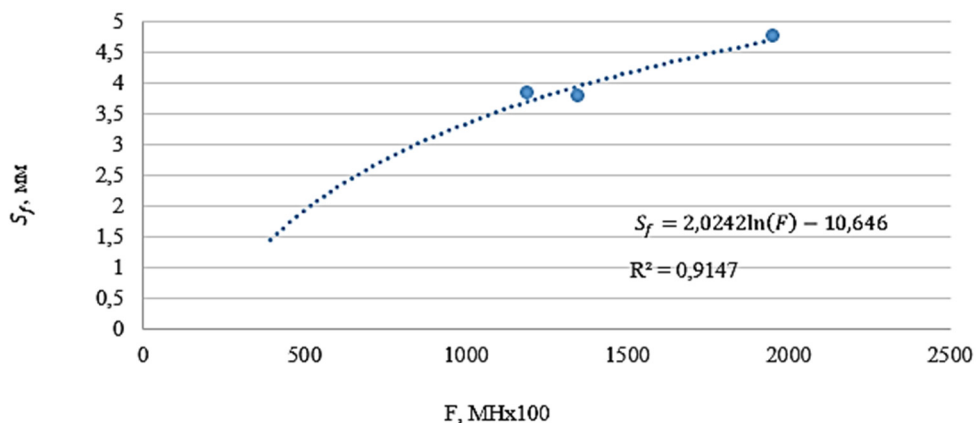


Рис. 3. Залежність «пружини» кліті кварто 1780 стану Стеккеля від сили прокатки по проходах

Таблиця 4

Параметри прикатки рулонів

Кліть	№ проходу	Шифр плавки (переріз)								
		81518 (15x1500)			83270 (12x1500)			83749 (10x1500)		
		Показчики								
Товщина, мм	Температура, °C	Сила прокатки, МНх100	Товщина, мм	Температура, °C	Сила прокатки, МНх100	Товщина, мм	Температура, °C	Сила прокатки, МНх100		
3170	1	200,5	1200	867,8	199,89	1200	923,4	200,3	1200	827,5
	2	178,8	1194	946,4	178,6	1193	943,9	179,5	1190	879,7
	3	158,4	1187	965,3	158,5	1185	965,2	158,6	1179	950,9
	4	139,6	1179	970,4	139,2	1176	1004,5	139,7	1168	949,8
	5	120,5	1169	1060,4	120,3	1166	1071,4	120,9	1153	1045,0
	6	103,9	1158	1048,2	103,5	1154	1080,1	103,9	1138	1064,8
	7	87,2	1144	1163,6	86,7	1140	1196,6	87,2	1117	1200,6
	8	71,8	1127	1243,9	72,4	1122	1199,1	72,4	1095	1255,8
	9	57,9	1105	1341,9	59,4	1099	1297,1	59,7	1067	1320,5
	10	46,8	1076	1350,2	47,7	1070	1445,0	48,2	1031	1504,0
	11	37,2	1037	1532,5	37,5	1032	1633,7	38,2	985	1751,6
1780 (Стеккель)	1	23,9	999	1901,0	23,4	987	2121,6	22,2	1005	2024,3
	2	19,0	973	1173,8	16,7	961	1615,5	13,7	968	1787,2
	3	15,2	931	1236,7	12,4	918	1549,2	10,5	908	1250,4

Оцінювання похибки розрахунків виконувалось на таких параметрах як температура та сила прокатки, динаміка яких по проходах наведена на рис. 4-6.

В результаті розрахунку сили прокатки та температури по проходах виконана оцінка похибок між фактичними та розрахованими даними, результати наведені в табл. 5.

На підставі отриманих результатів розрахунків параметрів прокатки та похибок слід зазначити наступне:

- на стані 3170 суттєве відхилення фактичної температури від розрахованої пов'язане з похибками фактичних замірів, на які могли вплинути залишки води на поверхні розкатів після гідрозбиву, або з охолодження прокатних валків. При цьому розрахована та фактична температури наприкінці прокатки в кліті 3170 мають найменші похибки, які становлять 0,38%, 0,96% та 0,39% для рулонів товщиною 15 мм, 12 мм та 10 мм відповідно. Розрахована сила прокатки в кліті 3170 має схожу динаміку з фактичними даними, що також підтверджує правильність виконаного розрахунку температур.

- на стані 1780 похибка розрахунків температур становить від 0% до 1,57%, що є достатньо задовільним результатом з урахуванням впливу обладнання, яке використовується, зокрема пічних моталок. Похибка, отримана при розрахунку сили прокатки у першому проході для рулонів товщиною 12 мм та 10 мм, пов'язана з фактично більшою температурою металу перед станом ніж та, що виміряна після гідрозбиву, що можна побачити при порівнянні з температурами на виході з прохідної пічки, отриманих результатів, табл. 6.

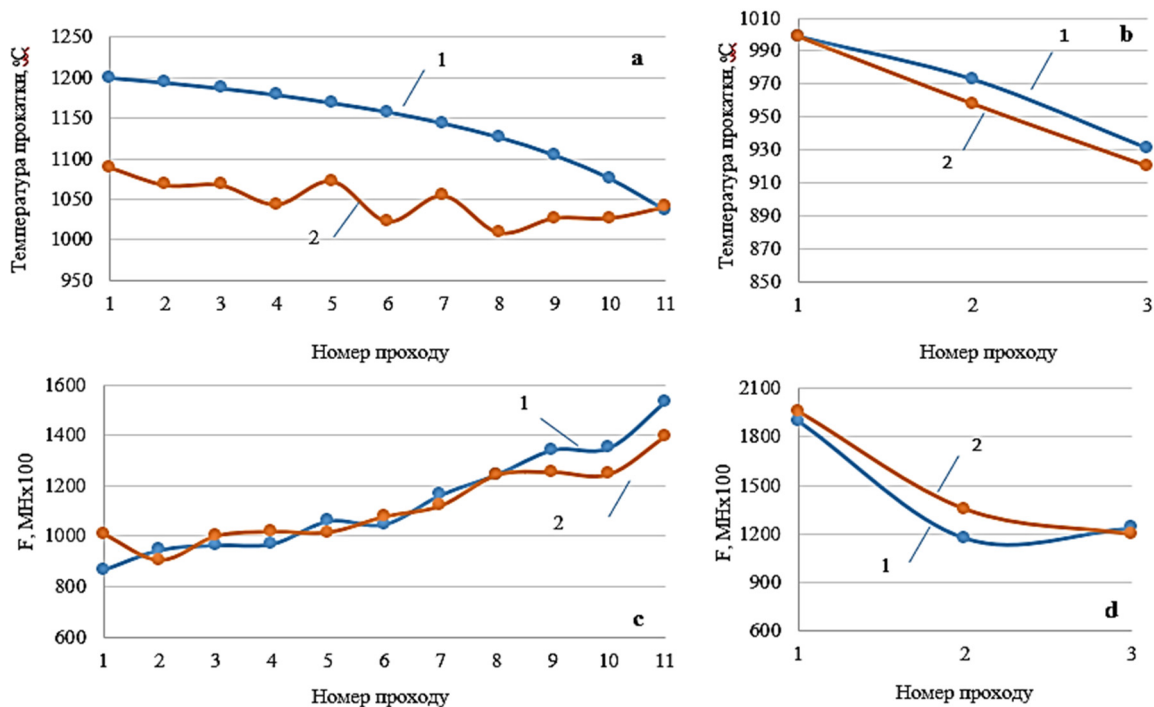


Рис. 4. Зміння розрахованих (1) та фактичних (2) показників прокату: температури (а) та сили прокатки (с) на стані 3170; температури (b) та сили прокатки (d) на стані 1780 при виробництві ролонів номінальними розмірами 15x1500 мм

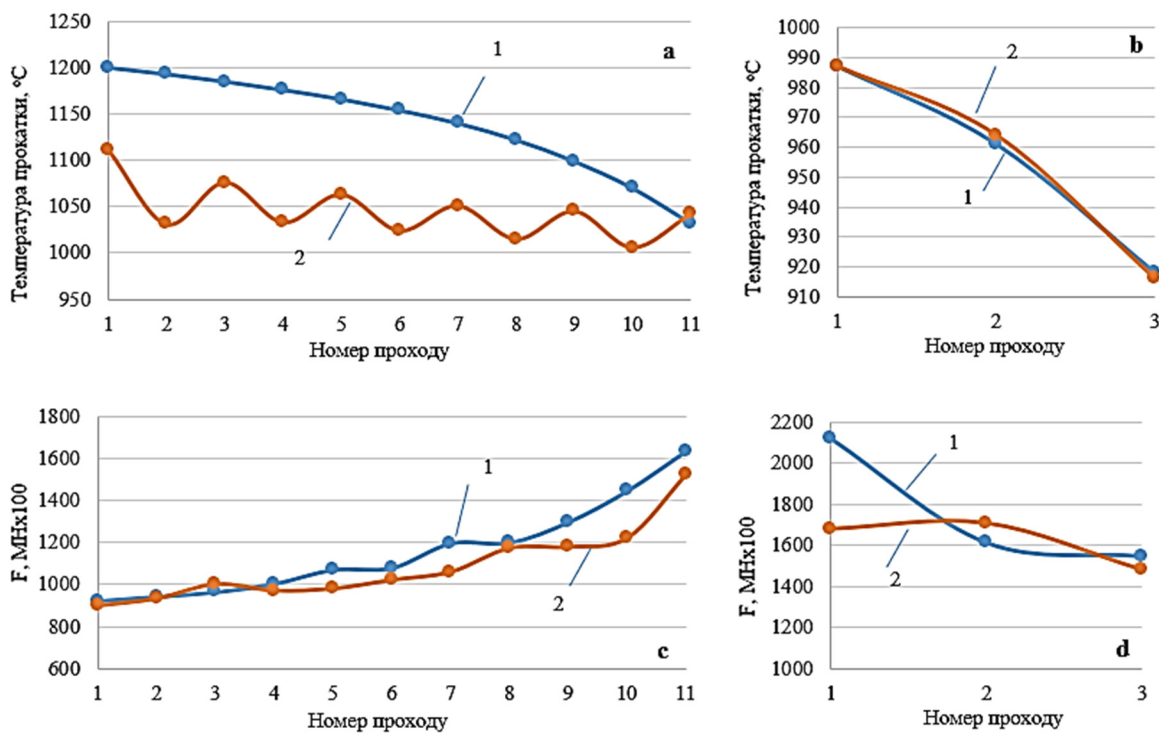


Рис. 5. Зміння розрахованих (1) та фактичних (2) показників прокату: температури (а) та сили прокатки (с) на стані 3170; температури (b) та сили прокатки (d) на стані 1780 при виробництві ролонів номінальними розмірами 12x1500 мм

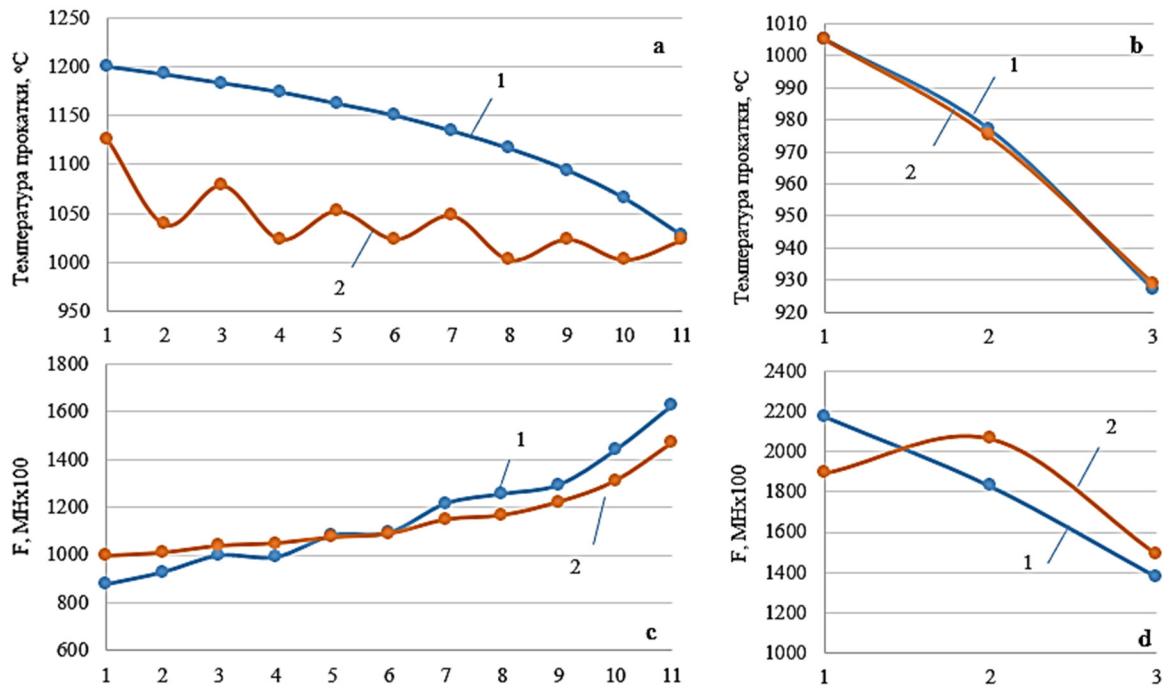


Рис. 6. Змінення розрахованих (1) та фактичних (2) показників прокату: температури (а) та сили прокати (с) на стані 3170; температури (б) та сили прокати (д) на стані 1780 при виробництві рулонів номінальними розмірами 10x1500 мм

Таблиця 5

Похибки між фактичними та розрахованими даними на дослідженому сортаменті

Стан	Параметр	Похибка розрахунків, %			
		шифр плавки	81518	83270	83749
3170	Температура	Переріз рулону, мм	15x1500	12x1500	10x1500
		середня	-9,11	-9,06	-8,27
		мін	-13,2	-15,71	-14,7
	Сила прокати	Макс	0,38	0,96	1,81
		середня	0,8	5,7	0,5
		мін	-16,0	-3,6	-13,6
1780 Стеккеля	Температура	Макс	8,8	15,5	9,5
		середня	-0,92	0,03	0,003
		мін	0	0,22	-0,205
	Сила прокати	Макс	1,57	0,31	0,22
		середня	-4,89	6,59	-2,73
		мін	-15,1	-5,6	-12,94
Макс	3,37	20,9	12,89		

Таблиця 6

Порівняння фактичних температур розкату після прохідної пічки, та температур перед станом Стеккеля

шифр плавки	Переріз рулону, мм	Температура тіла рулону, °C	
		після прохідної пічки	перед станом Стеккеля
81518	15x1500	997	999
83270	12x1500	1001	987
83749	10x1500	1048	1005

Таким чином, математична модель технологічного процесу прокатки може використовуватись за для проектування технології на станах Стеккеля. Отримані похибки розрахунків внаслідок впливу на фактичні показники технологічних факторів не знижують цінності розробленої моделі, і можуть бути зменшені шляхом підвищення точності вимірів (температури) шляхом корегування місць їх контролю.

Висновки

1. В роботі виконано перевірку розробленої математичної моделі на фактичних даних отриманих на станах 3170 и 1780 заводу Ferriera Valsider SpA. Середня похибка при моделюванні температурного режиму прокатки на стані 3170 склала від 8,27% до 9,11%, на стані 1780 від 0,003% до -0,92%. Середня похибка при моделюванні сили прокатки на стані 3170 від 0,5% до 5,7%, на стані 1780 від -4,89 до 6,59%.
2. Встановлено вплив на вимір температури попередньої обробки розкату гідросбивом окалини, що призводить до значних похибок при подальшому порівнянні з результатами розрахунків.
3. Розроблена модель може бути використана за для проектування технологічних режимів прокатки на станах Стеккеля.

Проверка математической модели технологического процесса прокатки на стане Стеккеля завода Ferriera Valsider SpA

В.В. Кухар, А.Г. Курпе, А.Г. Прысяжный

Аннотация. В работе исследована математическая модель процесса прокатки горячекатаных рулонов на стане Стеккеля завода Ferriera Valsider SpA. Выполнена проверка разработанной модели с целью возможности ее использования для проектирования технологии прокатки. Учено влияние «пружини» клетей. Средняя погрешность при моделировании температурного режима прокатки на стане 3170 составила от 8,27% до 9,11%, на стане 1780 от 0,003% до -0,92%. Средняя погрешность при моделировании силы прокатки на стане 3170 составила от 0,5% до 5,7%, на стане 1780 от -4,89 до 6,59%. Установлено влияние на фактическое измерение температуры предыдущей обработки раската гидросбивом окалины, что приводит к существенным отклонениям при дальнейшем сравнении с результатами расчетов.

Ключевые слова: моделирование, сила прокатки, температурный режим, «пружина» клетки, стан Стеккеля

Checking the mathematic model of the rolling technological process at Ferriera Valsider SpA Steckel Mill

V. Kukhar, O. Kurpe, A. Prysiaznyi

Abstract. Goal: Mathematic model checking of the technological process of hot-rolled coils rolling at Ferriera Valsider SpA Steckel Mill.

Method of doing research: The checking of the developed model was carried out to allow its applying for the rolling process design. The influence of the mill springe was taken into account. It was determined the influence over the actual temperature measuring of the previous transfer bar processing by means of water descaling that results in significant inaccuracies when further comparing to the calculation results.

Value: The average inaccuracy when modelling the rolling temperature conditions at mill 3170 is from 8,27% to 9,11%, at mill 1780 is from 0,003% to -0,92%. The average inaccuracy when modelling the rolling force at mill 3170 is from 0,5% to 5,7%, at mill 1780 is from -4,89 to 6,59%.

Keywords: simulation, rolling force, temperature conditions, mill springe, Steckel mill.

References

1. Starchenko, D.I. (1994), "Dinamika prodol'noi prokatki", ISIO, Kiev.
2. Kurpe, A.G. (2006), "Simulation of the technological process for plates rolling at rolling mill 3600 of Azovstal Iron and Steel Works", extended abstract of dissertation PhD in Technical Sciences, 05.16.05, Federal State Unitary Enterprise (FSUE) I.P. Bardin Central Research Institute for Ferrous Metallurgy, Moscow.
3. Kononov, Yu.V. (2008), "Spravochnik prokatchika. Proizvodstvo goryachekatanykh listov i polos", vol. 2, no. 1, «Teplotekhnika», Moskva.
4. Duk, Man Lee. (2004), "Applications to improve rolling force prediction ability in a plate mill", Automation in Mining. Mineral and Metal Processing, Nancy, France. Vol. 37, no.15, pp. 65-70, [https://doi.org/10.1016/S1474-6670\(17\)31001-7](https://doi.org/10.1016/S1474-6670(17)31001-7)

5. HU, Xian-lei., ZHAO, Zhong., WANG, Jun., WANG, Zhao-dong., LIU, Xiang-hua., WANG, Guo-dong. (2006), "Optimization of Holding Temperature and Holding Thickness for Controlled Rolling on Plate Mill", *Journal of iron and steel research, International*, Vol. 13, no. 3, pp. 21-25. [https://doi.org/10.1016/S1006-706X\(06\)60055-1](https://doi.org/10.1016/S1006-706X(06)60055-1)
6. John, G. Lenard. (2007), "Primer on Flat Rolling. Mathematical and Physical Modelling of the Flat Rolling Process", *Elsevier Ltd*, Chapter 3, pp. 36-98, <https://doi.org/10.1016/B978-008045319-4/50005-X>
7. Mantyla, P., Korhonen, R., Jonsson, N-G. (1992), "Improved Thickness and Shape Accuracy with Advanced Pass Scheduling in Plate Rolling", *Journal of Materials Processing Technology*, Elsevier, Vol. 34, pp. 255-263, [https://doi.org/10.1016/0924-0136\(92\)90115-9](https://doi.org/10.1016/0924-0136(92)90115-9)
8. QI, Xiang-dong., WANG, Tao., XIAO, Hong. (2012), "Optimization of Pass Schedule in Hot Strip Rolling", *Journal of Iron and Steel Research International*, Vol. 19, no. 8, pp. 25-28, [https://doi.org/10.1016/S1006-706X\(12\)60135-6](https://doi.org/10.1016/S1006-706X(12)60135-6)
9. Yue, S. (2002), "The Mathematical Modelling of Hot Rolling of Steel", *Metal Forming Science and Practice 9*, in J.G. Lenard (ed.), Published by Elsevier Science Ltd, no. 11, pp. 213-226, <https://doi.org/10.1016/B978-008044024-8/50011-4>
10. Yuen, W.Y.D., Dixon, A., Nguyen, D.N. (1996), "The modelling of the mechanics of deformation in fiat rolling", *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 60, pp. 87-94, [https://doi.org/10.1016/0924-0136\(96\)02312-6](https://doi.org/10.1016/0924-0136(96)02312-6)
11. ZHANG, Jin-ling., CUI, Zhen-shan. (2011), "Prediction of Velocity and Deformation Fields During Multipass Plate Hot Rolling by Novel Mixed Analytical-Numerical Method", *Journal of Iron and Steel Research, International*, vol. 18, no. 7, pp. 20-27. [https://doi.org/10.1016/S1006-706X\(11\)60085-X](https://doi.org/10.1016/S1006-706X(11)60085-X)
12. Radionova, L.V., Chernyshev, A.D., Lisovskiy, R.A. (2017), "Interactive Educational System –Virtual Simulator "Sheet Rolling"", *International Conference on Industrial Engineering, ICIE, South Ural State University*, The Russian Federation, pp. 512-518.
13. Galantuccia, L.M., Tricaricob, L. (1999), "Thermo-mechanical simulation of a rolling process with an FEM approach", *Journal of Materials Processing Technology* 92-93, pp. 494-501, [https://doi.org/10.1016/S-0924-0136\(99\)00242-3](https://doi.org/10.1016/S-0924-0136(99)00242-3)
14. Hanoglu, U., Šarler, B. (2018), "Multi-pass hot-rolling simulation using a meshless method", *Computers and Structures* 194, pp. 1-14.
15. Matruprasad, Rout., Surjya, K., Pal., Shiv, B. (2016), "Finite element simulation of a cross rolling process", *Singh Journal of Manufacturing Processes* 24, pp. 283–292.
16. WANG, Min-ting., ZANG, Xin-liang., LI, Xue-tong., DU, Feng-shan. (2007), "Finite Element Simulation of Hot Strip Continuous Rolling Process Coupling Microstructural Evolution", *Journal of Iron and Steel Research international*, vol. 14, no. 3, pp. 30-36.
17. Zinchenko, Ju.A., Pismar'ov, K.Je., Kurpe, O.G., Zmazneva, Je.V., Publichne akcionerne tovarystvo "Mariupol's'kyj metalurgijnyj kombinat IM. ILLICHa. (2017), Sposib vyznachennja parametrov prokatky ruloniv na stani Stekkelja, Ukrai'na, Pat. 117875.
18. Konovalov, Yu.V., Ostapenko, A.L., Ponomarev, V.I. (1986), "Raschet parametrov listovoi prokatki", *Metallurgiya*, Moskva, Russia.
19. Kurpe, A.H. (2006), Modelirovanie tehnologicheskogo processa prokatki tolstyh listov na stane 3600 OAO «MK «Azovstal'»: avtoref. dis. Kand. Tehn. Nauk: 05.16.05. Moskva, Russia.