

УДК 621.771.23

DOI <https://doi.org/10.32782/3041-2080/2025-5-23>

ВДОСКОНАЛЕННЯ ТЕХНОЛОГІЙ ВИРОБНИЦТВА ШТАБ НА ЛИВАРНО-ПРОКАТНИХ КОМПЛЕКСАХ

Курпе Олександр Геннадійович,

доктор технічних наук,

керівник інженерно-технологічної групи

ТОВ «МЕТІНВЕСТ СІЧСТАЛЬ»,

старший науковий співробітник науково-дослідного департаменту

ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА»

ORCID ID: 0000-0003-2039-7239

Кухар Володимир Валентинович,

доктор технічних наук, професор,

проректор з науково-дослідної роботи,

професор кафедри металургії та організації виробництва

ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА»

ORCID ID: 0000-0002-4863-7233

У статті представлені матеріали порівняння технологій виробництва штаб на ЛПМ та ШСГП. Технологія з виробництва штаб на ЛПМ є більш прогресивною, але обидва комплекси мають і певні обмеження. ЛПМ має менші витрати металу за рахунок менших відходів металу при об'єднаних безперервних процесах лиття та прокатки. Витрати палива також нижчі та пов'язані з товщиною слябів та їхньою початковою температурою. Інші співвідношення витрат матеріалів та ресурсів між ЛПМ та ШСГП можуть змінюватись залежно від виробництва конкретного сортаменту продукції. Однак ЛПМ мають деякі обмеження зі швидкості деформації в процесі чорнової прокатки. З іншого боку, гнучкість комплексів ШСГП більша, тому що вони не пов'язані безпосередньо з машиною безперервного лиття слябів та виплавою сталі. Обидва комплекси можуть виробляти аналогічні марки сталі, але товщини в кожній групі сталей відрізняються. Для виробництва прокату за ТМСП процесом дуже важливо для отримання кінцевих механічних властивостей дотриматись усіх температурних та деформаційних умов. Керування діаметром зерна аустеніту та структура металу на обох комплексах мають відмінності. Ступінь та швидкість деформації мають спільний значний вплив на розмір зерен аустеніту. У роботі визначено, що для отримання більш дрібного зерна аустеніту швидкість деформації повинна становити не менше ніж $1,0 \text{ c}^{-1}$, ступінь деформації повинен бути 20 % та більше. У роботі запропоновано оптимізований режим прокатки штаби з розмірами $12 \times 2074 \text{ мм}$ зі сталі марки X70 на ЛПМ. Оптимізований режим прокатки забезпечує всі умови технології ТМСП, такі як температура, ступінь та швидкість деформації з метою забезпечення комплексу механічних властивостей.

Ключові слова: режими гарячої прокатки, розмір зерна аустеніту, ступінь деформації, швидкість деформації, ТМСП, ливарно-прокатний модуль.

Kurpe Oleksandr, Kukhar Volodymyr. Improvement of strip production technology in continuous casting and rolling modules

The article presents materials where CRM and HSM technologies are compared. The strip production technology in CRM is more progressive but both complexes have some limitations. CRM has less metal consumption at the expense of lower metal waste when combining casting and rolling continuous processes. Gas consumption is also lower and depends on slabs thicknesses and their initial temperature. The other consumptions relationship between CRMs and HSMs can be changed depending on the specific product mix production. But CRMs have some limits in low strain rate during the roughing rolling process. On the other hand, the flexibility of HSMs complexes is more because they are not directly connected with continuous casting machine and Meltshop. Similar steel grades can be produced at any of these two complexes, but thicknesses in each steel group differ. For rolling product production by TMCP it is very important, for achieving the final mechanical properties, to adhere to all temperature and reduction principles. The austenite grain diameter managing and metal structure at both complexes have differences. The reduction and strain rate have joint significant influence on the austenite grain size. The article has identified, for obtaining austenite finer grain, the strain rate must be 1.0 c^{-1} or more, deformation is to be 20 % or more. The optimized rolling schedule for strip dimensions $12 \times 2074 \text{ mm}$, steel grade X70 at the CRM has been offered in the article. The optimized rolling schedule has satisfied all TMCP conditions such as temperature, reduction and strain rate to ensure a mechanical properties complex.

Key words: hot rolling schedules, austenite grain size, reduction, strain rate, TMCP, casting-rolling module.

Вступ. Технології виробництва штаби на ливарно-прокатних модулях (ЛПМ) [1–9] набувають дедалі більшої популярності. Ці комплекси мають певні переваги порівняно з класичними широкоштабовими станами гарячої прокатки (ШСГП) [10–14], хоча й характеризуються низкою технологічних обмежень. Технологія ЛПМ вважається прогресивнішою, оскільки поєднує в одному комплексі машину безперервного лиття (МБЛЗ) та штабовий прокатний стан, що забезпечує вищу енерго- та металоєфективність. Як і ШСГП, ливарно-прокатні комплекси мають свої етапи розвитку. Останні покоління ЛПМ, розроблені різними виробниками [7–9], мають подібну принципову конструкцію, оскільки орієнтовані на виготовлення схожого сортаменту продукції. Водночас кожен виробник застосовує унікальні технічні рішення, які відображаються в параметрах устаткування. Попри переваги, комплекси ЛПМ мають і певні конструктивно-технологічні обмеження, що ускладнює їх використання для виробництва прокату зі спеціальними властивостями [2; 3].

Так, у роботі [2] досліджено вплив щільності дислокацій на механічні властивості при виробництві низьковуглецевої сталі на ЛПМ, однак механізм технологічного керування цим процесом не розкрито. У роботі [3] досліджено питання отримання прокату з високою міцністю при виробництві на ливарно-прокатних комплексах. Розглянуто та підкреслено особливості механізму формування структури та механічних властивостей на установках смугового лиття порівняно з класичними процесами виробництва смуг, які треба враховувати. У роботі [4] авторами запропоновано рішення щодо оптимізації графіку прокатки, заснованого на енергоспоживанні, якості продукції, навантаженнях на устаткування. Аналогічні дослідження були проведені авторами роботи [6]. Слід зазначити, що моделі [4; 6] не враховували вплив термо-механічних режимів для забезпечення необхідного рівня мікроструктури та комплексу механічних властивостей, які можуть бути важливі для деякого сортаменту у тому числі, що виробляється за технологією ТМСР. Цей сортамент може потребувати більших витрат енергоресурсів. Таким чином, механізми формування мікроструктури і відповідно комплексу механічних властивостей при виробництві штаб на ЛПМ та ШСГП мають відмінності, які повинні бути враховані при розробці технології виробництва.

Метою дослідження є визначення особливостей технології виробництва штаб на ливарно-прокатних комплексах та широкоштабових станах гарячої прокатки та розробка

технологічних рекомендацій для ЛПМ, що забезпечать отримання необхідного комплексу механічних властивостей.

Методи та методики дослідження. У статті застосовано комплекс методів, що поєднують аналітичний, порівняльний та математичний підходи. Базою для дослідження є технічні характеристики устаткування та режими прокатки на ливарно-прокатних комплексах та широкоштабових станах гарячої прокатки. Окремим напрямом дослідження є визначення впливу швидкості деформації на формування розміру зерна аустеніту. Для цього було використано аналітичний підхід, який базувався на експериментальних даних та методі Холла-Петча. Таким чином, застосування комплексного підходу у проведенні дослідження дозволило отримати уявлення про динаміку формування розміру зерна аустеніту залежно від швидкості деформації та запропонувати рішення щодо вдосконалення технології виробництва штаб на деяких типах ливарно-прокатних комплексів.

Результати.

1. Порівняння сучасних комплексів ЛПМ та ШСГП. Сучасні лінії подовжньо-поперечного різання (ЛПМ) здатні випускати широкий сортамент продукції – від м'яких наднизьковуглецевих сталей (ULC) до покращених високоміцних сталей (AHSS). Товщина штаб варіюється від 0,8 до 25,4 (до 32,0) мм, ширина – від 900 до 2600 мм [7–9]. Широкий діапазон розмірів продукції, що може виготовлятися на ЛПМ, частково перекриває номенклатуру холоднокатаного та гарячекатаного листа, що робить ЛПМ універсальним інструментом для виробництва плоского прокату.

На рисунках 1 і 2 подано типові схеми ЛПМ та ШСГП, які характеризують референтні конструкції існуючих комплексів, що виготовляються провідними машинобудівними компаніями [7–9].

У таблиці 1 наведено порівняльні параметри ливарно-прокатних модулів (ЛПМ) і широкоштабових станів гарячої прокатки (ШСГП).

Розміри сортаменту продукції для обох типів комплексів залежать від технічного завдання, що ставиться перед виробниками устаткування. Ширина та маса штаби можуть бути реалізовані на будь-якому з наведених типів обладнання, якщо це передбачено проєктом. Товщину смуги менше ніж 1,2 мм можна отримати на ЛПМ у режимі безперервної прокатки. Втрати металу на ЛПМ, як правило, менші, ніж на ШСГП. Це зумовлено зменшеними відходами та безперервністю процесу лиття і прокатки, що знижує втрати на обрізи та технологічний простій.

Середнє електроспоживання в обох типах комплексів приблизно однакове. Для ЛПМ воно

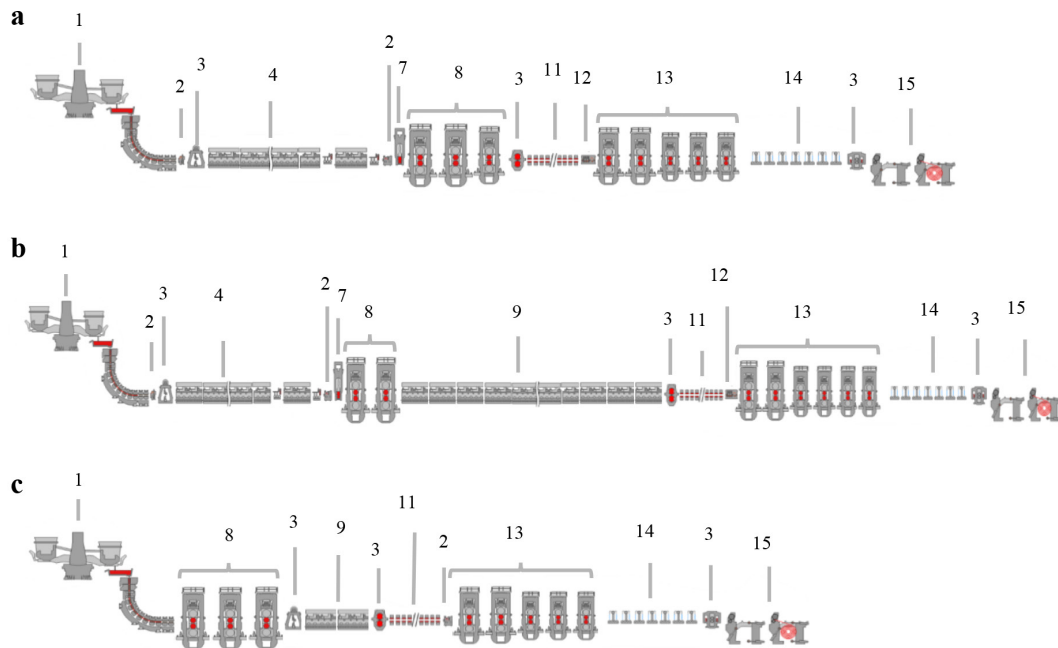


Рис. 1. Референтні типи (а, b, c) ЛПМ комплексів

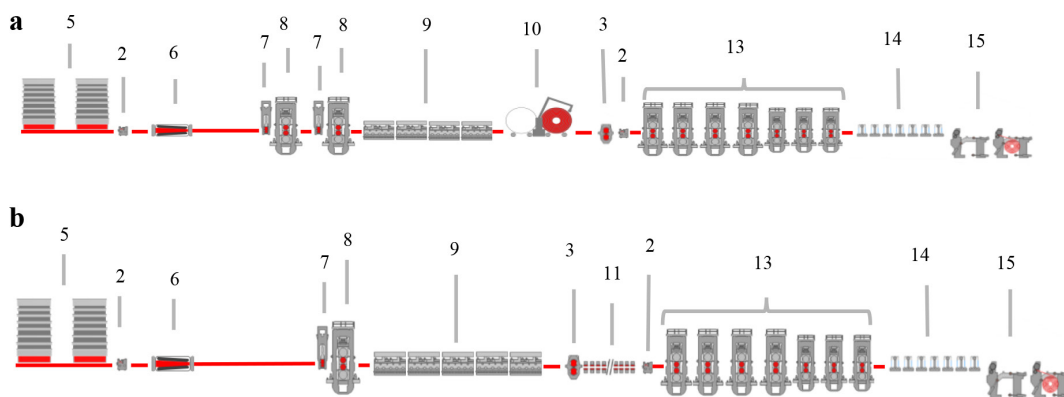


Рис. 2. Референтні типи (а, b) ШСГП комплексів

На рис. 1, 2: 1 – машина безперервного лиття; 2 – гідрозбив; 3 – ножиці; 4 – тунельна піч; 5 – нагрівальна піч; 6 – прес для зменшення ширини; 7 – еджер; 8 – чорновий стан; 9 – теплозберігаючі панелі; 10 – CoilBox; 11 – індукційні нагрівачі; 12 – проміжне охолодження підкату та гідрозбив; 13 – чистовий стан; 14 – установка прискороного охолодження; 15 – моталки

дещо зростає через виробництво прокату малої товщини та інтенсивне використання індукційних нагрівачів для підтримання температури. У ШСГП підвищене споживання пов'язане з прокаткою слябів більшої товщини. Витрати газу також залежать від початкової температури слябів і їхньої товщини. У ЛПМ сляби додатково нагріваються в тунельній печі з температури близько 1000–1050 °С. Натомість у ШСГП сляби можуть надходити в нагрівальну піч холодними або з температурою навколишнього середовища. Кінцева температура перед прокаткою для обох комплексів становить 1150–1200 °С.

Гнучкість виробництва у ШСГП є вищою, ніж у ЛПМ. Це зумовлено тим, що ШСГП не прив'язані безпосередньо до машини

безперервного лиття й процесу виплавки сталі. Зупинка прокатного стану не тягне за собою зупинку всього виробництва. Партії прокати можуть бути сформовані незалежно від графіка розливки на МБЛЗ, а самі стани можуть працювати автономно від виробництва слябів. Ці висновки наведені для загальної характеристики комплексів. Співвідношення витрат між ЛПМ та ШСГП може змінюватися залежно від виробництва конкретного сортаменту продукції.

Усі наведені марки сталі можуть бути вироблені як на ЛПМ, так і на ШСГП. Однак товщинний діапазон у межах кожної групи сталей може відрізнятися залежно від типу комплексу. Найбільш суттєві відмінності стосуються груп сталей зі специфічними вимогами до механічних

Таблиця 1

Порівняння параметрів ЛПМ та ШСГП

№	Параметри	ЛПМ	ШСГП
1	Сортамент продукції		
1.1	Розміри		
1.1.1	Товщина, мм	0,8–25,4 (32,0) ¹	1,2–25,4
1.1.2	Ширина, мм	800–2134 (2600) ¹	900–2350
1.1.3	Вага рулонів, т	Макс: 32 (45,7)	Макс: 32 (45)
1.2	Марки сталі ²	ULC, LC, PER, MC, HC, LC MA, PER MA, MC MA, WR, API ³ , TRIP/DP, AS	ULC, LC, PER, MC, HC, LC MA, PER MA, MC MA, WR, API, TRIP/DP, AS
1.3	Товщина слябів, мм	До 140 (160) ¹	До 250 (300)
2	Витрати металу, кг/т ⁴	1018	1040 ⁵
3	Споживання електричної енергії, кВт · год/т	~ 90,0	~ 91,0 ⁵
4	Витрати природного газу, м³/т	0/11 ⁶	32,8
5	Гнучкість в організації виробництва	Менша гнучкість	Більше гнучкості

¹ SMS Проєкт на стадії будівництва; ² Тип сталей: ULC – наднизьковуглецеві; LC – низьковуглецеві; PER – перитектичні; MC – середньовуглецеві; HC – високовуглецеві; LC MA – низьковуглецеві мікролеговані; PER MA – перитектичні мікролеговані; MC MA – середньовуглецеві мікролеговані; WR – стійкі до погодних умов; TRIP – пластичність, спричинена перетворенням; DP – двофазні; AS – леговані сталі; ³ обмеження товщини; ⁴ кращі практики; ⁵ HSM + CCM; ⁶ для різних ЛПМ комплексів (нульове споживання для комплексу без тунельної печі)

властивостей, зокрема таких, що підлягають випробуванням на ударну в'язкість за методикою DWTT (Drop Weight Tear Test) та випробуванням за методом Шарпі з V-надрізом (Charpy V-notch, CVN) при низьких температурах. Ці види випробувань особливо чутливі до структури металу та розміру зерна, що формується під час термомеханічної обробки, а також до особливостей прокатки, властивих кожному типу комплексу.

2. Розрахунок та порівняння режимів прокатки. Для порівняння двох технологій були розраховані режими прокатки для референтних комплексів ЛПМ (рис. 1, а) та ШСГП (рис. 2, б), див. табл. 2 і 3. Розрахунки виконано із застосуванням власної математичної моделі, з урахуванням технічних параметрів устаткування, наведених у джерелах [7–9]. При моделюванні технологічного процесу для обох комплексів використовувався однаковий сортамент продукції – сталь марки X70 згідно зі стандартом API 5L, виготовлена за технологією термомеханічної обробки (TMCP). Параметри штаби: товщина 12 мм, ширина 2074 мм, маса рулону 31,6 т. Ці характеристики відповідають вимогам до заготовок для поздовжньоозварених труб діаметром 660 мм. Запропонований хімічний склад сталі X70 наведено у таблиці 4.

З технічної точки зору обидва типи комплексів здатні виробляти штаби зі сталі марки X70 із наведеними геометричними параметрами. Як відомо, для мікролегованих низьковуглецевих сталей цього типу критично важливим є дотримання певних технологічних умов, що забезпечують формування необхідного комплексу механічних властивостей кінцевого продукту [15]. До таких умов належать: температура

аустенізації; ступінь деформації; температура гальмування рекристалізації аустеніту в зоні чорнової прокатки; інші параметри термомеханічної обробки. Виконання цих умов забезпечує стабільне формування структури, що успадковується у готовому виробі, та досягнення заданого рівня механічних властивостей.

Керування температурою аустенізації дає змогу впливати на розмір зерна та ступінь розчинення мікролегуючих елементів у твердому розчині. Цей механізм добре реалізується на комплексах ШСГП. Натомість для ЛПМ це питання залишається відкритим, оскільки сляби в ЛПМ не проходять стадію охолодження до феритного стану з подальшим повторним нагрівом, що обмежує один із шляхів керування структуроутворенням. Установлено, що зерно в повторно нагрітих слябах є дрібнішим, ніж у тих, що не зазнавали охолодження.

Обтиснення є ефективним інструментом регулювання розміру зерна аустеніту. За даними сучасних досліджень [16; 17], для мікролегованих низьковуглецевих сталей рекомендований ступінь деформації становить не менше 20 % за один прохід. Така деформація сприяє формуванню дрібного зерна аустеніту, з якого згодом утворюється дрібнозернистий ферит. Ефективність цього механізму зберігається до температури гальмування рекристалізації аустеніту, яка для досліджуваної сталі X70 (за розрахунками за відомою формулою) становить 907 °С. На основі моделювання встановлено, що:

- на ЛПМ ця температура була досягнута на першому чистовому проході (F1);
- на ШСГП – на третьому проході (F3).

Таблиця 2

Режим прокатки штаби з розмірами 12 × 2074 мм з марки сталі Х70 на ЛПМ

Кліть №*	Товщина, мм	Ступінь деформації, %	Швидкість деформації, с ⁻¹	Швидкість прокатки, м/с	Вхідна температура, °С	Сила прокатки, кН
	141					
R1	100	29,1	0,42	0,21	1097	27 961
R2	64	36,0	0,86	0,33	1072	33 062
R3	40	37,5	1,96	0,52	1049	28 777
ACC F1	29	27,5	3,18	0,78	910	32 669
F2	22	24,1	4,53	1,01	893	28 631
F3	17	22,7	7,43	1,31	873	24 211
F4	14	17,6	8,97	1,57	853	20 031
F5	12	14,3	10,22	1,81	843	16 713

* R1-3 – номери клітей чорнової групи; ACC – прискорене охолодження; F1-5 – номери клітей чистої групи

Таблиця 3

Режим прокатки штаби з розмірами 12 × 2074 мм з марки сталі Х70 на ШСГП

Кліть №*	Товщина, мм	Ступінь деформації, %	Швидкість деформації, с ⁻¹	Швидкість прокатки, м/с	Вхідна температура, °С	Сила прокатки, кН
	222					
R1-1	177	20,3	2,33	1,93	1150	27646
R1-2	135	23,7	3,53	2,41	1143	29643
R1-3	99	26,7	5,35	3,01	1134	30532
R1-4	70	29,3	7,96	3,66	1123	30634
R1-5	50	28,6	11,59	4,54	1106	28515
ACC F1	39	22,0	1,80	0,55	960	23417
F2	29	25,6	2,72	0,68	937	26875
F3	22,5	22,4	3,60	0,83	924	23127
F4	18,4	18,2	4,42	1,00	897	20337
F5	15,2	17,4	5,97	1,16	882	18355
F6	13,2	13,2	6,53	1,33	851	15964
F7	12	9,1	6,51	1,49	836	12270

* R1-1 – R1-5 – номери проходів в чорновій кліті; ACC – прискорене охолодження; F1-7 – номери клітей чистої групи

Таблиця 4

Хімічний склад дослідної сталі марки Х70

Марка сталі	Хімічний склад, %													
	C	Mn	Si	S	P	Al	Nb	V	Cu	Ni	Cr	Mo	Ti	N
X70	0,06	1,55	0,35	0,005	0,011	0,026	0,034	0,026	0,21	0,05	0,05	0,01	0,025	0,0050

Таким чином, необхідна деформація ($\geq 20\%$) при температурі нижче 907 °С досягнута в обох випадках, що забезпечує отримання дрібного зерна. За розрахунками [17], середній розмір зерна аустеніту:

- для ЛПМ (середній ступінь деформації 34 %) становив ~32 мкм;
- для ШСГП (ступінь деформації 25 %) – ~36 мкм.

Це свідчить про порівняну ефективність технологій чорнової прокатки обох типів комплексів у контексті контролю структури.

Крім того, слід відзначити ще один фактор, який раніше не враховувався при розрахунку розміру зерна аустеніту, – це швидкість деформації,

яка відрізняється між ЛПМ та ШСГП. Швидкість деформації впливає на опір металу до деформації, однак наразі не враховується у більшості відомих моделей розрахунку розміру зерна аустеніту.

3. Дослідження впливу швидкості деформації на розмір зерна аустеніту. Для встановлення зв'язку між швидкістю деформації та розміром зерна аустеніту було використано результати, наведені в роботі [17], де розглядається залежність між опором деформації та розміром зерна на основі співвідношення Холла – Петча. Крім того, було залучено дані пластометричних досліджень сталі марки Х70 з джерела [18], що дало змогу експериментально підтвердити вплив технологічних

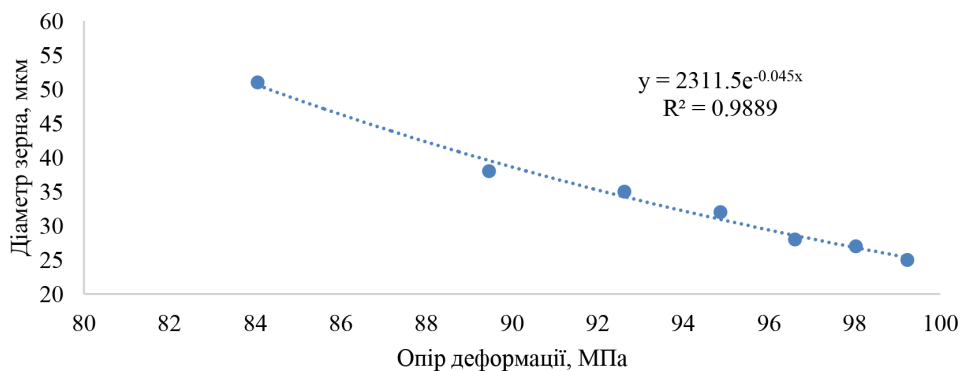


Рис. 3. Залежність між опором до деформації та розміром зерна для сталі марки X70

параметрів на структуру аустеніту. На основі узагальнених результатів побудовано графічну залежність між опором деформації та розміром зерна аустеніту, що подано на рис. 3.

Таким чином, для розрахунку залежності діаметра зерна аустеніту від опору деформації для сталі марки X70 по стандарту API-5L можна використовувати таке співвідношення:

$$D = 2311.5e^{-0.045\sigma_t}, \quad (1)$$

де σ_t – опір деформації для сталі марки X70 або її аналога, МПа.

Опір деформації для сталі марки X70 було розраховано за співвідношенням, наведеним у роботі [18], із використанням таких вихідних даних: температура 1050 °С, ступінь деформації 20 %, швидкість деформації від 0,1 до 15 с⁻¹, що відповідає умовам чорнової прокатки. Діаметр зерна аустеніту визначали за формулою (1) на основі отриманих значень опору деформації. На підставі цих результатів побудовано залежність між швидкістю деформації та діаметром зерна аустеніту (рис. 4).

Отже, для розрахунку залежності діаметра зерна аустеніту від швидкості деформації для сталі марки X70 по API-5L можна використовувати таке співвідношення:

$$D = 38.857 \cdot v^{-0.554}, \quad (2)$$

де v – швидкість деформації, с⁻¹.

Відповідно до рис. 4, швидкість деформації має великий вплив на діаметр зерна. Інтенсивність подрібнення зерна аустеніту показана на рис. 5.

Інтенсивне подрібнення зерна аустеніту спостерігається при швидкості деформації від 0,1 с⁻¹ до 1,0 с⁻¹, що становить 63,7 %. При швидкості деформації від 1,0 с⁻¹ до 3,0 с⁻¹ інтенсивність подрібнення зерна аустеніту трохи знижується і становить від 63,7 % до 80 %. При швидкості деформації від 3,0 с⁻¹ та більше інтенсивність подрібнення зерна аустеніту має мінімальну інтенсивність. Тож для отримання більш дрібного зерна аустеніту швидкість деформації за прохід повинна становити 1,0 с⁻¹ і більше, при ступені деформації 20 % і більше.

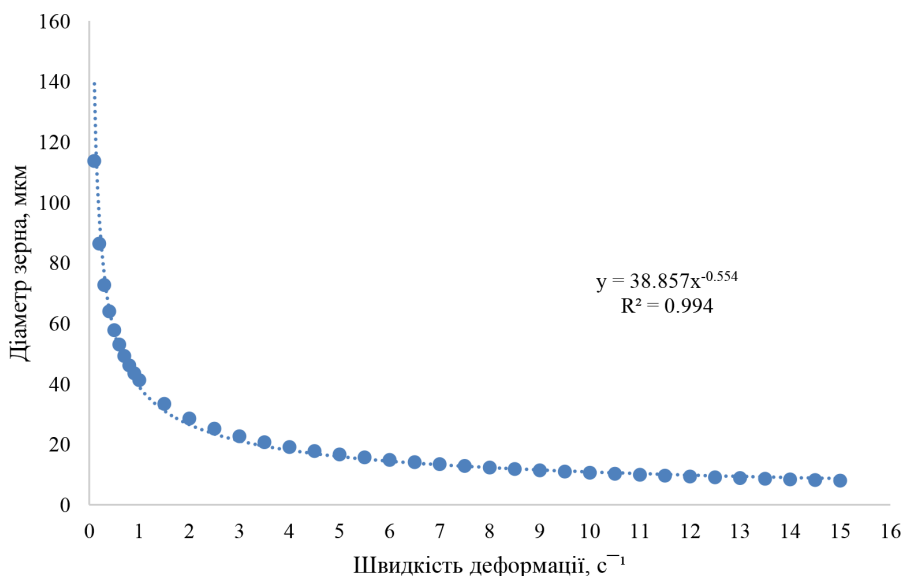


Рис. 4. Залежність між швидкістю деформації та діаметром зерна аустеніту для сталі марки X70

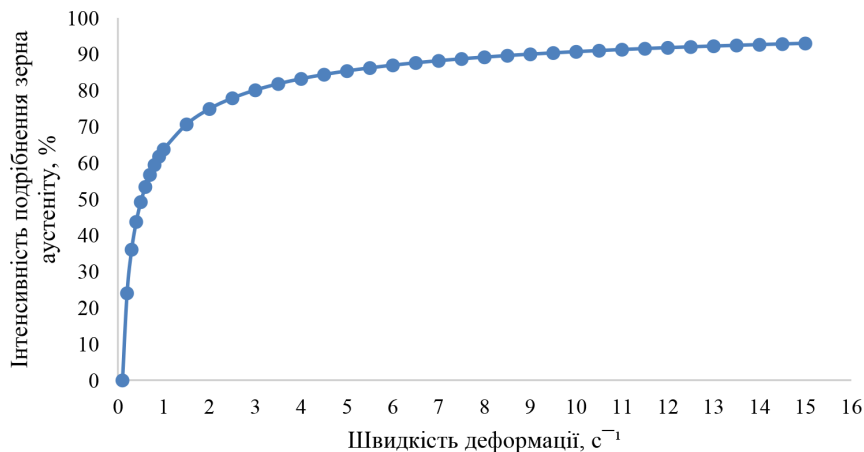


Рис. 5. Інтенсивність подрібнення зерна аустеніту для сталі марки X70

Виходячи з цього, ступінь та швидкість деформації мають спільний значний вплив на розмір / діаметр зерна аустеніту. Високий рівень обтиснення при низькому рівні швидкості деформації не дає ефекту подрібнення зерна.

4. Оптимізація технології виробництва прокату на ЛПМ, аналіз результатів. Якщо порівнювати швидкість деформації на ЛПМ та ШСГП (табл. 2, 3) в зоні активної рекристалізації (температура від початку прокати до 907°C), то на ЛПМ вона задовольняє вимогам ($1,0 \text{ с}^{-1}$ і більше) тільки в кліті R3, а на ШСГП – у всіх проходах від R1-1 до F2. Таким чином, зерно аустеніту на ШСГП буде більш дрібним, ніж на ЛПМ. Крім того, тест DWTT та CV матиме кращі результати після прокати на ШСГП.

Щодо ступеня деформації з рівнем 20 % і більше, яке здійснюється в зоні активної рекристалізації, то на ЛПМ воно відбувається в чорновій групі. Температура після чорнової групи ще досить висока (табл. 2). Для зниження температури розкату перед чистовою групою застосовується прискорене охолодження. Крім того, це допомагає контролювати діаметр зерна, охолоджуючи розкат до температури гальмування рекристалізації аустеніту.

На ШСГП обтиснення, яке супроводжується процесом рекристалізації, відбувається в чорновій кліті та частково в чистовій групі (кліті F1, F2). Температура, що близька до температури гальмування рекристалізації аустеніту, досягається після кліті F2 без додаткового процесу прискореного охолодження.

Таким чином, керування діаметром зерна та структурою металу на обох комплексах має відмінності, починаючи з процесу аустенізації та враховуючи рекристалізаційні процеси, які закінчуються на різних стадіях прокати.

З метою отримання необхідного комплексу механічних властивостей при реалізації

технології ТМСР на ЛПМ, враховуючи виконання вищезазначених умов щодо якомога більшого подрібнення зерна аустеніту, запропоновано оптимізований режим прокати штаби зі сталі марки X70 (табл. 5).

Оптимізований режим прокати штаби розміром $12 \times 2074 \text{ мм}$ зі сталі марки X70 на ЛПМ враховує ключові умови процесу ТМСР: температуру, ступінь та швидкість деформації. Для їх забезпечення застосовано додаткові інструменти контролю температури прокати. Зокрема, було введено проміжне охолодження розкату після клітей R1, R2, F1 і F2. Таке обладнання є типовим для сучасних ливарно-прокатних комплексів. Крім того, швидкість прокати була синхронізована та збільшена на всіх клітях, що зумовлено конструктивними особливостями ЛПМ – відносно невеликою відстанню між агрегатами, через що підкат одночасно перебуває в чорновій і чистовій групах клітей. Зміни параметрів прокати на ЛПМ наведено на рис. 6.

Криві на рис. 6 демонструють, що підвищення швидкості прокати та швидкості деформації призводить до збільшення сили прокати. Водночас застосування обладнання для проміжного охолодження розкату дає змогу підтримувати температурну криву практично незмінною.

Оптимізований процес є більш енергоємним. Сумарні витрати електроенергії на прокатному обладнанні ЛПМ у базовому режимі (табл. 2) становлять $68,6 \text{ кВт} \cdot \text{год/т}$, тоді як в оптимізованому режимі (табл. 4) – $94,5 \text{ кВт} \cdot \text{год/т}$ (+38 %). Розрахунки виконані з використанням власної математичної моделі. Попри зростання енергоспоживання, застосування оптимізованих режимів розширює асортимент ЛПМ і підвищує якість готової продукції.

Оптимізований режим прокати може бути реалізований на ЛПМ із компоновкою

Таблиця 5

Оптимізований режим прокатки штаби з розмірами 12 × 2074 мм з марки сталі Х70 на ЛПМ

Кліть №*	Товщина, мм	Ступінь деформації, %	Швидкість деформації, с ⁻¹	Швидкість прокатки, м/с	Вхідна температура, °С	Сила прокатки, кН
	141					
R1	100	29,1	1,09	0,55	1097	29 853
ACC R2	64	36,0	2,16	0,82	1074	34 681
ACC R3	40	37,5	4,90	1,30	1053	30 097
ACC F1	29	27,5	7,25	1,78	910	35 194
ACC F2	22	24,1	10,32	2,30	884	32 288
ACC F3	17	22,7	16,76	2,95	857	28 278
F4	14	17,6	20,04	3,52	852	21 929
F5	12	14,3	23,09	4,09	842	18 374

* R1-3 – номери клітей чорнової групи; ACC – прискорене охолодження; F1-5 – номери клітей чистової групи

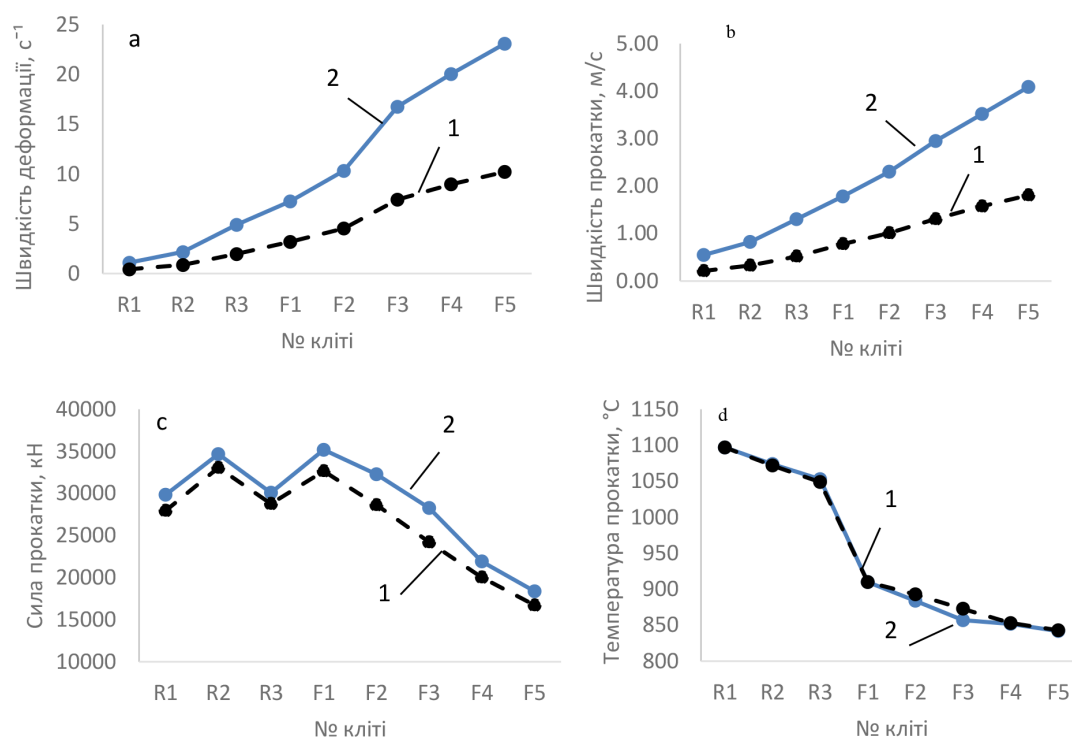


Рис. 6. Зміна параметрів прокатки ЛПМ (а – швидкість деформації; б – швидкість прокатки; с – сила прокатки; d – температура прокатки) для 1 – базового режиму прокатки, для 2 – оптимізованого режиму прокатки

устаткування, поданою на рис. 1а та 1б. Для типу ЛПМ, зображеного на рис. 1с, його застосування є неможливим, оскільки в цьому випадку сляб одночасно перебуває у машині безперервного лиття та в чорновій групі клітей. Крім того, порізка слябів здійснюється лише після чорнової прокатки, що обмежує швидкість прокатки, а отже, і швидкість деформації швидкістю розливки.

Висновки

1. Виконано порівняння сучасних проєктів комплексів ШСГП та ЛПМ. Визначено їхні основні відмінності: для ЛПМ – можливість виробляти штаби меншої товщини (до

0,8 мм), зниження витрат металу та палива на нагрів заготовки; для ШСГП – вища гнучкість виробництва та ширші можливості контролю розміру аустенітного зерна і, відповідно, комплексу механічних властивостей готової продукції.

2. Окреслено механізми керування розміром аустенітного зерна в процесі прокатки. Досліджено вплив швидкості деформації, підтверджено її суттєве значення поряд зі ступенем деформації. Побудовано залежність між швидкістю деформації та розміром зерна, а також визначено критичний рівень швидкості, необхідний для подрібнення зерна аустеніту.

3. Виконано критичний аналіз режимів деформації при виробництві штаби розміром 12 × 2074 мм зі сталі марки Х70 на ШСГП та ЛПМ. Встановлено принципові відмінності, що охоплюють увесь процес – від аустенізації до рекристалізаційних перетворень, які завершуються на різних стадіях прокатки.

4. Запропоновано оптимізований режим деформації для ЛПМ, який забезпечує формування максимально дрібного зерна аустеніту та досягнення необхідного комплексу кінцевих механічних властивостей. Прикладом є виробництво рулонів зі сталі марки Х70 згідно зі стандартом API 5L.

ЛІТЕРАТУРА:

1. Process control system of ultra thin strip production line at Tangshan Iron and Steel Group Co. in China. *IFAC Proceedings Volumes* / Okamoto K., Wakamiya Y., Shimoda N., Itoh T., Wan H., Liu W. 2003. Vol. 36(24). P. 263–268. DOI: [https://doi.org/10.1016/S1474-6670\(17\)37640-1](https://doi.org/10.1016/S1474-6670(17)37640-1)
2. Quantitative study on yield point phenomenon of low carbon steels processed by compact endless casting and rolling. *Materials Science and Engineering: A* / Gi K. J., Um H. Y., Kang J. Y., Jeong H. J., Choi K. H., Lee S. H., Kim S. Y., Chung J. S., Kim H. S. 2018. Vol. 734. P. 408–415. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.msea.2018.08.006>
3. Achieving high strength and large elongation in a strip casting microalloyed steel by ageing treatment. *Materials Science and Engineering: A* / Xu S., Wang S., Li S., Cao R., Wu H., Wu G., Gao J., Feng Q., Li H., Mao X. 2022. Vol. 860. Article 144217. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.msea.2022.144217>
4. Rolling schedule design for the ESP rolling process based on NSGA-II-DE. *ISA Transactions* / Peng W., Wei C., Yang J., Chen X., Qi B., Li X., Sun J., Zhang D. 2025. Vol. 158. P. 427–441. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.isatra.2024.12.047>
5. Coiler control in endless hot strip rolling. *IFAC Proceedings Volumes* / Motomura T., Ueda K., Imazeki T., Fukui Y., Yahiro K. 2005. Vol. 38(1). P. 57–62. DOI: <https://doi.org/10.3182/20050703-6-CZ-1902.01688>
6. Optimizing steel coil production schedules under continuous casting and hot rolling. *European Journal of Operational Research* / Torres N., Greivel G., Betz J., Moreno E., Newman A., Thomas B. 2024. Vol. 314(2). P. 496–508. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2023.10.005>
7. ARVEDI ESP real endless strip production. Brochure No.: T10-0-N022-L4-P-V3-EN. Primetals Technologies Austria GmbH. 2023. URL: [ARVEDI_ESP_-_REAL_ENDLESS_STRIP_PRODUCTION_01.pdf](https://www.arvedi.com/ARVEDI_ESP_-_REAL_ENDLESS_STRIP_PRODUCTION_01.pdf)
8. CSP Nexus plant supplied by SMS to JSW STEEL (Dolvi Works). *SMS group GmbH. Düsseldorf*. 2024. URL: [CSP® Nexus plant supplied by SMS group to JSW STEEL \(Dolvi Works\) – SMS group GmbH](https://www.sms-group.com/en/products/technologies/product-lines/due_26_192.htm)
9. DUE® A revolutionary concept for thin slab casting and rolling. Danieli & C. S.p.A. 2025. URL: https://www.danieli.com/en/products/processes-technologies/product-lines/due_26_192.htm
10. Wang S., Shi Y., Liu S. Integrated scheduling for steelmaking continuous casting – hot rolling processes considering hot chain logistics. *Mathematical Problems in Engineering*. 2020. Article ID 6902934. 10 p. DOI: <https://doi.org/10.1155/2020/6902934>
11. Steinboeck A., Mühlberger G., Kugi A. Control of strip tension in a rolling mill based on loopers and impedance control. *IFAC Proceedings Volumes*. 2014. Vol. 47(3). P. 10646–10651. DOI: <https://doi.org/10.3182/20140824-6-ZA-1003.00993>
12. Kwon W., Kim S., Won S. Active disturbance rejection control for strip steering control in hot strip finishing mill. *IFAC-PapersOnLine*. 2015. Vol. 48(17). P. 42–47. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2015.10.075>
13. High productivity improvement in JFE Fukuyama no.1 hot strip mill. *IFAC Proceedings Volumes* / Yokota S., Sekine H., Tsuchiya Y., Mugita H., Aimoto K. 2005. Vol. 38(1). P. 187–192. DOI: <https://doi.org/10.3182/20050703-6-CZ-1902.01710>
14. Li P., Li F. The optimal design of hot steel strip temperature control algorithm. *IFAC Proceedings Volumes*. 2003. Vol. 36(24). P. 129–132. DOI: [https://doi.org/10.1016/S1474-6670\(17\)37615-2](https://doi.org/10.1016/S1474-6670(17)37615-2)
15. Developing of X65 steel coils making at Steckel mill using thermo-mechanical control process. *E3S Web of Conferences* / Kurpe O., Kukhar V., Klimov E., Chernenko S., Prysiashnyi A. 2021. Vol. 280. Article 07017. P. 1–6. DOI: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202128007017>
16. Kurpe O. H., Kukhar V. V., Klimov E. S. Finite-element simulation of Steckel mill rolling. *Key Engineering Materials. Switzerland*. 2021. Vol. 887. P. 564–574. DOI: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.887.564>
17. Курпе О. Г., Кухар В. В. Дослідження процесів рекристалізації в умовах термомеханічного процесу прокатки сталі марки Х65. *Вісник КрНУ імені Михайла Остроградського. Матеріалознавство*. 2020. Вип. 2(121). С. 122–128. DOI: [10.30929/1995-0519.2020.2.122-128](https://doi.org/10.30929/1995-0519.2020.2.122-128)
18. Капланов В. І., Курпе О. Г. Вдосконалена залежність для визначення пластичних властивостей сталі категорії міцності Х70. *Університетська наука – 2009 : тези доп. міжнар. наук.-техн. конф. ПДТУ. Маріуполь, 2009*. С. 156–157.

REFERENCES:

1. Okamoto, K., Wakamiya, Y., Shimoda, N., Itoh, T., Wan, H., & Liu, W. (2003). Process control system of ultra thin strip production line at Tangshan Iron and Steel Group Co. in China. *IFAC Proceedings Volumes*, 36(24), 263–268. [https://doi.org/10.1016/S1474-6670\(17\)37640-1](https://doi.org/10.1016/S1474-6670(17)37640-1)
2. Gi, K. J., Um, H. Y., Kang, J. Y., Jeong, H. J., Choi, K. H., Lee, S. H., Kim, S. Y., Chung, J. S., & Kim, H. S. (2018). Quantitative study on yield point phenomenon of low carbon steels processed by compact endless casting and rolling. *Materials Science and Engineering: A*, 734, 408–415. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2018.08.006>
3. Xu, S., Wang, S., Li, S., Cao, R., Wu, H., Wu, G., Gao, J., Feng, Q., Li, H., & Mao, X. (2022). Achieving high strength and large elongation in a strip casting microalloyed steel by ageing treatment. *Materials Science and Engineering: A*, 860, 144217. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2022.144217>
4. Peng, W., Wei, C., Yang, J., Chen, X., Qi, B., Li, X., Sun, J., & Zhang, D. (2025). Rolling schedule design for the ESP rolling process based on NSGA-II-DE. *ISA Transactions*, 158, 427–441. <https://doi.org/10.1016/j.isatra.2024.12.047>
5. Motomura, T., Ueda, K., Imazeki, T., Fukui, Y., & Yahiro, K. (2005). Coiler control in endless hot strip rolling. *IFAC Proceedings Volumes*, 38(1), 57–62. <https://doi.org/10.3182/20050703-6-CZ-1902.01688>
6. Torres, N., Greivel, G., Betz, J., Moreno, E., Newman, A., & Thomas, B. (2024). Optimizing steel coil production schedules under continuous casting and hot rolling. *European Journal of Operational Research*, 314(2), 496–508. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2023.10.005>
7. PrimetalsTechnologiesAustriaGmbH. (2023). *ARVEDIESPrealendlessstripproduction* [BrochureNo.T10-0-N022-L4-P-V3-EN]. https://ARVEDI_ESP_-_REAL_ENDLESS_STRIP_PRODUCTION_01.pdf
8. SMS group GmbH. (2024). *CSP Nexus plant supplied by SMS to JSW STEEL (Dolvi Works)*. <https://www.sms-group.com>
9. Danieli & C. S.p.A. (2025). *DUE® A revolutionary concept for thin slab casting and rolling*. https://www.danieli.com/en/products/processes-technologies/product-lines/due_26_192.htm
10. Wang, S., Shi, Y., & Liu, S. (2020). Integrated scheduling for steelmaking continuous casting – hot rolling processes considering hot chain logistics. *Mathematical Problems in Engineering*, 2020, Article ID 6902934, 10 pages. <https://doi.org/10.1155/2020/6902934>
11. Steinboeck, A., Mühlberger, G., & Kugi, A. (2014). Control of strip tension in a rolling mill based on loopers and impedance control. *IFAC Proceedings Volumes*, 47(3), 10646–10651. <https://doi.org/10.3182/20140824-6-ZA-1003.00993>
12. Kwon, W., Kim, S., & Won, S. (2015). Active disturbance rejection control for strip steering control in hot strip finishing mill. *IFAC-PapersOnLine*, 48(17), 42–47. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2015.10.075>
13. Yokota, S., Sekine, H., Tsuchiya, Y., Mugita, H., & Aimoto, K. (2005). High productivity improvement in JFE Fukuyama no.1 hot strip mill. *IFAC Proceedings Volumes*, 38(1), 187–192. <https://doi.org/10.3182/20050703-6-CZ-1902.01710>
14. Li, P., & Li, F. (2003). The optimal design of hot steel strip temperature control algorithm. *IFAC Proceedings Volumes*, 36(24), 129–132. [https://doi.org/10.1016/S1474-6670\(17\)37615-2](https://doi.org/10.1016/S1474-6670(17)37615-2)
15. Kurpe, O., Kukhar, V., Klimov, E., Chernenko, S., & Prysiashnyi, A. (2021). Developing of X65 steel coils making at Steckel mill using thermo-mechanical control process. *E3S Web of Conferences*, 280, 07017, 1–6. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202128007017>
16. Kurpe, O. H., Kukhar, V. V., & Klimov, E. S. (2021). Finite-element simulation of Steckel mill rolling. *Key Engineering Materials*, 887, 564–574. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.887.564>
17. Kurpe, O. H., & Kukhar, V. V. (2020). Doslidzhennia protsesiv rekristalizatsii v umovakh termomekhanichnoho protsesu prokatky stali marky Kh65 [Study of recrystallization processes under thermo-mechanical rolling of X65 steel]. *Visnyk KrNU imeni Mykhaila Ostrohradskoho. Materialoznavstvo – Herald of KrNU. Materials Science*, 2(121), 122–128. <https://doi.org/10.30929/1995-0519.2020.2.122-128> [in Ukrainian]
18. Kaplanov, V. I., & Kurpe, O. H. (2009). Vdoskonalena zalezhist dlia vyznachennia plastychnykh vlastyvostei stali katehorii mitsnosti Kh70 [Improved formula for determining plastic properties of high-strength steel grade X70]. *Universytetska nauka – University Science*, Conference Proceedings of the International Scientific and Technical Conference of PSTU. Mariupol, 156–157. [in Ukrainian]

Стаття надійшла: 02.08.2025

Стаття прийнята: 22.08.2025

Опублікована: 10.11.2025

