

PACS numbers: 62.20.F-, 81.05.Bx, 81.20.Hy, 81.40.Ef, 81.40.Lm, 81.70.Bt, 83.50.Uv

Досвід виробництва гарячекатаного прокату товщиною 5 мм з високоміцної марки криці типу 32NiCrMoV9

О. Г. Курпе, В. В. Кухар*

*Інжинірингова компанії «Метінвест Інжиніринг»,
вул. Князя Ярослава Мудрого, 53,
49000 Дніпро, Україна
*Технічний університет «Метінвест Політехніка»,
вул. Південне шосе, 80,
69008 Запоріжжя, Україна*

Метою дослідження є виготовлення дослідної партії рулонного та листового прокату розмірами у 5×1500 мм з високоміцної марки криці типу 32NiCrMoV9 в умовах, обмежених характеристиками наявного устаткування прокатних станів. В роботі виконано аналізу, визначено технологічну схему виробництва листового прокату та здійснено перевірку технічних можливостей устаткування. Запропоновано схему виробництва листового прокату, яка включає попередню прокатку безперервнолитих слябів на товстолитовому стані 3600 з одержанням катаного слябу товщиною у 130 мм, прокатку рулонів на стані 1700, відпалювання у ковпачкових печах, розрізання на листи на агрегаті поперечної порізки. З використанням методів математичного моделювання розроблено технологічні рекомендації з виробництва рулонів з високоміцної марки криці типу 32NiCrMoV9 на стані 1700, які включають температурно-деформаційний, швидкісний режими прокатки та спрямовані на забезпечення ліпших балістичних результатів кінцевого продукту, що є успадкованими. Виготовлено дослідну партію рулонного прокату в умовах широкоштабового

Corresponding author: Oleksandr Hennadiyovych Kurpe
E-mail: aleksandr.kurpe@gmail.com

*Metinvest Engineering LLC,
51 Kniazia Yaroslava Mudroho Str., UA-49000 Dnipro, Ukraine
*Technical University 'Metinvest Polytechnic',
80 Pivdenne Highway, UA-69000 Zaporizhzhia, Ukraine*

Citation: O. H. Kurpe and V. V. Kukhar, Experience of the Hot-Rolled Products Production from High-Strength Steel Grade of Type 32NiCrMoV9 of 5 mm Thickness, *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.*, 45, No. 5: 687–697 (2023) (in Ukrainian). DOI: [10.15407/mfint.45.05.0687](https://doi.org/10.15407/mfint.45.05.0687)

стану 1700. Встановлено, що процес прокатки на стані 1700 супроводжується підвищеним рівнем навантажень на головні двигуни чорнової групи клітей з дотриманням встановлених обмежень по силі прокатки. За результатами механічних випробувань визначено, що після відпалювання рулонів рівень твердості високоміцної марки криці типу 32NiCrMoV9 понизився до рівня 22–24 HRC, який є нижчим за твердість ножів та уможливорює виконати розрізання на листи розмірами у 5×1500×6000 мм на наявному агрегаті поперечної порізки. Правку штаби з високим рівнем границі плинності та тимчасового опору після відпалювання здійснено зі збільшеною кількістю проходів до 7–9 та, відповідно, зменшеними навантаженнями.

Ключові слова: високоміцні криці, моделювання режиму прокатки, широкостабовий стан, гаряча прокатка рулонів, механічні властивості.

The aim of the study is the production of the experimental lot of coil and plate rolled products with dimensions of 5×1500 mm of high-strength steel of grade type 32NiCrMoV9 in the conditions by means of the available rolling mill equipment. In the work, the technological analysis is carried out, the technological scheme of plate production is defined, and the verification of equipment technical capabilities is carried out. The production scheme of plate products is proposed and includes preliminary rolling of continuous casting slabs at the plate rolling mill 3600 with obtaining of 130 mm thickness rolled slabs, rolling of coils at the strip mill 1700, annealing in the hood type furnaces, and cutting by plates at the crosscutting machine. Applying mathematical modelling methods, the technological recommendations are developed for coils' production from high-strength steel of grade type 32NiCrMoV9 at the rolling mill 1700 that includes temperature–deformation and speed-rolling schedules aimed at providing inherited better ballistic results of the final product. The experimental lot of coils is produced in the conditions of strip rolling mill 1700. As defined, the rolling process at the rolling mill 1700 is accompanied by the increased loading level on the main engines in roughing stands, while complying with defined limits of rolling force. The mechanical-tests' results have determined that, after coil annealing, the hardness level of high-strength steel of grade type 32NiCrMoV9 is decreased to 22–24 HRC that is lower than blades' hardness and allows to cut on plates with dimensions of 5×1500×6000 mm at the available cross-cutting machine. Levelling of plates with high levels of yield and tensile strength after annealing is performed with passes quantity increased up to 7–9, and force is decreased accordingly.

Key words: high-strength steel grades, mathematical modelling of rolling schedules, strip mill, hot rolling of coils, mechanical properties.

(Отримано 25 квітня 2023 р.; остаточн. варіант — 8 травня 2023 р.)

1. ВСТУП

Невпинний розвиток технологій і попит на прокатну продукцію необхідної якості часом випереджає можливості наявного устатку-

вання. Така тенденція забезпечує безперервний розвиток і подальше вдосконалення устаткування, а в обмежених умовах виробництва розвиває наукову думку й уможлиблює досягти необхідної технічної мети. В процесі розробки технологічних рекомендацій з освоєння виробництва гарячекатаного листового прокату товщиною у 5 мм з високоміцної марки криці типу 32NiCrMoV9 в умовах МК «Азовсталь» і ММК «Імені Ілліча» основними проблемами є вибір схеми виробництва кінцевого листового прокату, визначення умов технологічного процесу, які забезпечують успадковану якість прокату та кінцевого виробу, оцінка технічних можливостей устаткування, задіяного у технологічній схемі, з урахуванням механічних властивостей, яких набуває ця криця в процесі оброблення.

2. АНАЛІЗА ЛІТЕРАТУРНИХ ДАНИХ

Кількість вітчизняних досліджень високоміцних криць у порівнянні з іншими крицями є достатньо обмеженою. У світовій практиці для виробництва продукції, що вимагає високої міцності, поширено використовуються криці серії Armoх, Hardox та інші, серед яких слід відзначити такі марки криці, як Armoх 500Т, Armoх 600Т, Armoх Advance, Hardox 450 [1–5]. Ці марки криці можна вважати аналогами вітчизняної високоміцної марки криці типу 32NiCrMoV9.

Поглиблене вивчення високоміцних криць зазвичай супроводжується балістичними дослідженнями, що уможлиблює визначити кінцеве застосування їх і розробити заходи для поліпшення властивостей на стадії виробництва, тобто під час прокатки або кування [2]. Зокрема, автори роботи [6] пишуть про необхідність одержання дрібнозернистої структури й уникання залишків литої дендритної структури, що можливо зробити за допомогою керування деформацією. Одержання кращих балістичних результатів, поміж інших, на думку авторів [6], відбувається за рівномірного загартування та рівномірної твердості металу. Рівномірність цих властивостей є успадкованою від рівномірності структури та властивостей вихідного прокату. Також в роботі [6] акцентується увага на важливості одержання необхідної текстури та структури прокату, можливо, за допомогою поперечної прокатки.

Таким чином, на підставі аналізу досліджень можна зазначити наявність зв'язку між технологічними параметрами процесу прокатки як одного із процесів, що закладає основи для властивостей продукту кінцевого призначення та результатами балістичних випробувань.

Моделювання процесу прокатки є дієвим інструментом, який уможлиблює оцінити можливості наявного устаткування, з урахуванням забезпечення необхідних умов технологічного процесу та

властивостей криці, яка обробляється. У світовому досвіді практика дослідження технологічних процесів прокатки є поширеною та використовується для великого переліку марок криць різноманітного призначення [7–14]. Комплексне дослідження процесу прокатки, що складається з декількох стадій, термооброблення та розрізання високоміцних криць в умовах наявного устаткування вітчизняних металургійних підприємств є окремим питанням і ставить нові виклики.

3. МЕТА ТА ЗАВДАННЯ ДОСЛІДЖЕННЯ

Мета цього дослідження полягає в освоєнні виробництва листового прокату товщиною у 5 мм з високоміцної марки криці типу 32NiCrMoV9 в умовах підприємств МК «Азовсталь» і ММК «Імені Ілліча».

В даній роботі необхідно було оцінити можливості виготовлення, розрахувати умови виробництва та виробити дослідну партію гарячекатаних рулонів розмірами у 5,0×1500 мм з високоміцної марки криці типу 32NiCrMoV9 в умовах підприємств МК «Азовсталь» і ММК «Імені Ілліча» (м. Маріуполь).

4. МАТЕРІЯЛ ТА МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕНЬ

Виробництво високоміцної марки криці типу 32NiCrMoV9 згідно з вимогами ТУ У 27.1-14313056-001 було раніше освоєно в конвертерному цеху МК «Азовсталь». Вимоги до хемічного складу марки криці типу 32NiCrMoV9 наведено в табл. 1. Для порівняння в табл. 1 наведено хемічний склад криць, які можна розглядати як аналоги марки криці типу 32NiCrMoV9. Криця розливалася в безперервнolиті сляби в даному випадку товщиною у 250 мм. Далі сляби за вже освоєною технологією прокатувались у товстолистовий прокат на стані 3600. Мінімальна товщина прокату, що виробляється на цьому стані, становить 6 мм. Таким чином, виробництво прокату товщиною у 5 мм за вже наявною технологічною схемою є неможливим.

В якості наступної схеми виробництва розглянуто перекаат слябів на стані 3000 ММК «Імені Ілліча». Максимальна товщина прокату на стані 3000 складає також 6 мм, що не відповідає вимогам замовлення.

Альтернативним варіантом технологічної схеми розглянуто наступну: виробництво катаних слябів на стані 3600 МК «Азовсталь», далі виробництво рулонного прокату на стані 1700 ММК «Імені Ілліча» з розрізанням на листи на агрегаті поперечної порізки (устаткування стану 1700 відповідає умовам 2017 р., тобто до реконструкції чорнової групи клітей). Діючий технічний регламент

ТАБЛИЦЯ 1. Вимоги до хемічного складу високоміцної марки криці типу 32NiCrMoV9.**TABLE 1.** Requirements for the chemical composition of high-strength steel grade 32NiCrMoV9.

Марка криці	Вміст хемічних елементів, %												B
	C	Mn	Si	S	P	Cu	Cr	Ni	Mo	V	Ti	Al	
32NiCrMoV9	0,29–0,36	0,6–1,0	1,20–1,50	≤ 0,003	≤ 0,012	≤ 0,30	1,5–2,0	2,0–2,4	0,45–0,55	0,18–0,25	0,005–0,025	0,015–0,050	
Armoх 500Т (SSAB)	≤ 0,32 ≤ 1,20 ≤ 0,40			≤ 0,003 ≤ 0,010			≤ 1,0 ≤ 1,80 ≤ 0,70						≤ 0,005
Armoх 600Т/ Armoх Advance (SSAB)	≤ 0,47 ≤ 1,00 ≤ 0,70			≤ 0,003 ≤ 0,010			≤ 1,5 ≤ 3,0 ≤ 0,70						≤ 0,005
Hardox 450 (SSAB)	≤ 0,26 ≤ 1,60 ≤ 0,70			≤ 0,010 ≤ 0,025			≤ 1,40 ≤ 1,50 ≤ 0,60						≤ 0,005

стану 1700 уможливилює виробляти прокат з необхідними розмірами у 5×1510 мм. Відкритим питанням залишається оцінка технічних можливостей устаткування стану 1700 з виробництва прокату з рівнем механічних властивостей, які має високоміцна марка криці типу 32NiCrMoV9.

Відповідно до технологічного регламенту стану 1700, з урахуванням навантаження на устаткування стану для виробництва прокату з розмірами у 5×1510 мм товщина слябу має становити 130 мм. Таким чином, на стані 3600 зі слябу товщиною у 250 мм було виготовлено катаний сляб з розмірами у 130×1510 мм.

Слід зазначити, що устаткування стану 1700 розраховано на виробництво криці з тимчасовим опором у холодному стані не більшим за 550 МПа. Марка криці типу 32NiCrMoV9 має тимчасовий опір після прокатки з природнім охолодженням на повітрі на рівні 1200 МПа і вище [15], що перевищує наявні обмеження стану 1700. Дослідження авторів роботи [15] показали, що марка криці типу 32NiCrMoV9 є мартенситного класу та в діапазоні температур гарячої прокатки знаходиться в аустенітному стані. Мартенситне перетворення для цієї марки криці відбувається в діапазоні температур 350–150°C. Таким чином, під час прокатки марка криці типу 32NiCrMoV9 може мати нижчий рівень властивостей, що дасть змогу прокатати її в умовах стану 1700.

На підставі цього, шляхом моделювання розроблено режим прокатки (табл. 2) з урахуванням рекомендацій інституту-розробника

ТАБЛИЦЯ 2. Рекомендації з режиму прокатки рулонів з марки криці типу 32NiCrMoV9.**TABLE 2.** Recommendations for the rolling schedules of coils of steel grade 32NiCrMoV9.

Прокатний стан	№ кліті	Товщина після проходу h , мм	Ступінь деформації, %	Швидкість прокатки, м/с	Температура перед проходом, °С	Сила прокатки, МН
Заготовка 130×1510×4600						
Чорнова група стану 1700	01	122	6,2	0,85	1280	7,35
	1	90	26,2	1,26	1258	24,49
	2	64	28,9	1,36	1241	24,44
	3	48	25,0	1,78	1212	19,83
	4	36	25,0	1,78	1182	19,27
	4а	28	22,2	2,89	1132	19,38
Чистова група стану 1700	5	19,3	31,1	1,36	1050	23,68
	6	12,7	34,2	1,36	1029	23,81
	7	9,15	28,0	1,36	999	19,86
	8	6,9	24,6	1,40	976	17,74
	9	5,65	18,1	1,40	913	16,62
	10	5,0	11,5	1,43	879	13,07

марки криці типу 32NiCrMoV9 по температурі нагрівання слябів по зонах печі $\leq 1290^{\circ}\text{C}$. Нагрів здійснювався з холодного посаду, тобто від 20°C .

Під час моделювання враховано рекомендації [7] стосовно ступеня деформації під час чорнової прокатки на рівні $\geq 14\%$, за виключенням кліті 01, які спрямовані на поліпшення механічних властивостей і рівномірність розподілу їх по перерізу прокату.

Через високий рівень міцності марки криці типу 32NiCrMoV9 встановлено, що прокатка буде здійснюватися в умовах підвищеного навантаження на устаткування, яке підтверджується результатами розрахунків режиму прокатки (рис. 1, 2).

Умовами розробки режиму прокатки було дотримання сили прокатки за проходами в допустимих межах. За даного підходу мали місце перевищення розрахованої потужності головних двигунів над допустимим рівнем. Перевищення потужності було оцінено через коефіцієнт навантаження (див. рис. 1), який у клітках чорнової групи №№ 1–4а становить від 1,02 до 2,35.

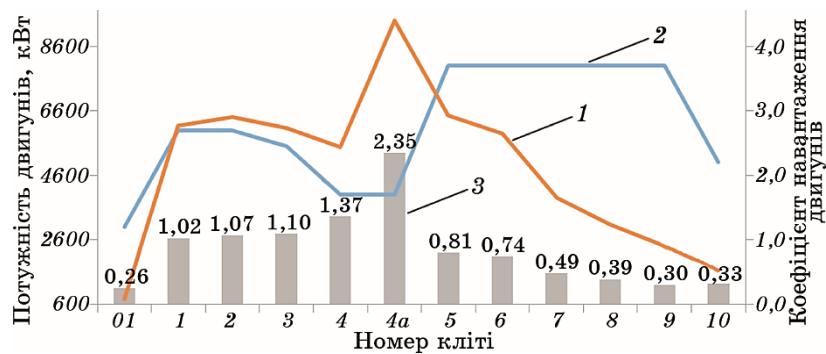


Рис. 1. Результати розрахунку потрібної потужності двигунів (1), проектна потужність (2) і коефіцієнти навантаження (3) головних двигунів за прокатки штаби з марки криці типу 32NiCrMoV9 на стані 1700.

Fig. 1. The results of calculating the required engine power (1), design power (2) and load factors (3) of the main engines, when rolling strips of steel grade 32NiCrMoV9 at the rolling mill 1700.

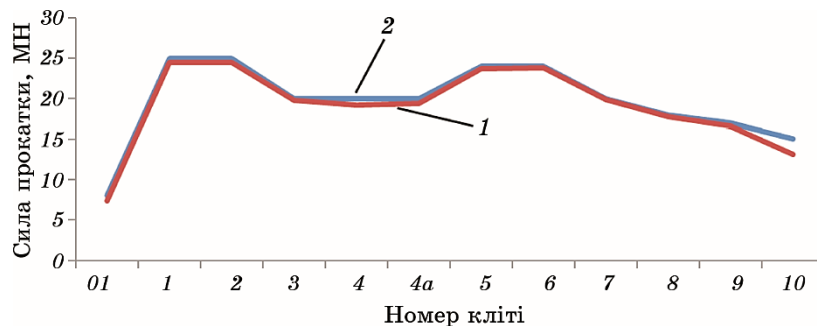


Рис. 2. Результати розрахунку сили прокатки (1), допустима сила прокатки (2) за прокатки штаби з марки криці типу 32NiCrMoV9 на стані 1700.

Fig. 2. The results of calculating the rolling force (1), permissible rolling force (2), when rolling strips of steel grade 32NiCrMoV9 at the rolling mill 1700.

5. РЕЗУЛЬТАТИ ТА ОБГОВОРЕННЯ

На підставі розроблених рекомендацій було виконано дослідну прокатку рулону № 177891201, топлення 0687, партії 78912 з марки криці типу 32NiCrMoV9. Час нагрівання слябу розмірами у 130×1510×4600 мм в печі склав 3 год. 55 хв. Швидкість нагрівання — 0,55 мм/хв. Фактичні контрольні температури за технологічними операціями наведено в табл. 3.

Одночасно з природнім охолодженням у дослідному рулоні відбувалися структурні перетворення з аустеніту в мартенсит з відпо-

ТАБЛИЦЯ 3. Фактичні контрольні температури.

TABLE 3. Actual control temperatures.

Устаткування/операція	Фактична температура, °С
Кліть 4а (температура за кліттю)	1105
Кліть 10 (температура кінця прокатки)	880
Змотування	740

відним підвищенням механічних властивостей, в тому числі тимчасового опору до рівня 1200 МПа і вище. Потужності устаткування, яке було на стані 1700, унеможлилювали надалі виконувати технологічні операції з розрізання цього рулону на листи розмірами у 5×1500×6000 мм.

З метою пониження рівня механічних властивостей дослідний рулон був відправлений для проходження відпалювання у ковпаківій печі цеху холодного прокату (рис. 3). Режим відпалювання рулону з марки криці типу 32NiCrMoV9 здійснювали за режимом, зазначеним у табл. 4. Процес відпалювання здійснювали без захисної атмосфери. Після відпалювання рулон охолоджувався природнім способом до температури навколишнього середовища. Випробування механічних властивостей рулону після відпалювання показали результати, зазначені у табл. 5.

Зовнішній вигляд рулону перед розрізанням наведено на рис. 4.

Одержані механічні властивості штаби з марки криці типу 32NiCrMoV9і після відпалювання не досягли рівня механічних властивостей, які б уможливили виконати в штатному режимі правку та розрізання прокату. В той же час твердість штаби після від-

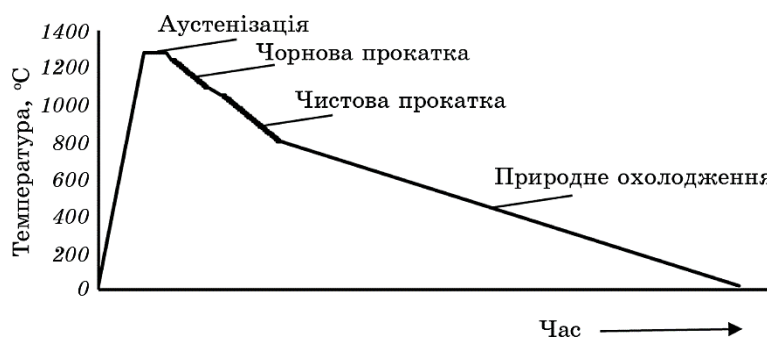


Рис. 3. Схема процесу прокатки штаби з високоміцної марки криці типу 32NiCrMoV9.

Fig. 3. Scheme of the strip rolling process for the high-strength steel grade 32NiCrMoV9.

ТАБЛИЦЯ 4. Режим відпалювання рулону з марки криці типу 32NiCrMoV9.**TABLE 4.** Annealing schedules of a coil of steel grade 32NiCrMoV9.

Параметер	Значення параметра
Температура металу в печі, °C	690
Тривалість витримки, год	15
Температура проміжної витримки, °C	550
Тривалість проміжної витримки, год	3
Температура печі, °C	850

ТАБЛИЦЯ 5. Результати механічних випробувань рулону з марки криці типу 32NiCrMoV9 після відпалювання.**TABLE 5.** The results of mechanical tests of a coil of steel grade 32NiCrMoV9 after annealing.

Параметр	Значення параметра
Межа плинності, МПа	570
Тимчасовий опір, МПа	810
Відносне видовження, %	21
Твердість, <i>HRC/HB</i>	22–24/240–250

палу не перевищувала твердість ножів агрегату порізки № 2, яка становить 41–43 *HRC*. На підставі цього у цьому агрегаті виконано розрізання дослідного рулону на листи з подальшою правкою на 11-роліковій машині з пониженими параметрами правки та збільшенням проходів до 7–9 шт.

Поломки або сколювання ножів під час розрізання марки криці типу 32NiCrMoV9 не було зафіксовано.

Таким чином, в умовах стану 1700 і з використанням термічного відділення цеху холодного прокату виготовлено дослідний рулон з високоміцної марки криці типу 32NiCrMoV9 і виконано його розрізання на листи розмірами у 5×1500×6000 мм відповідно до вимог замовлення.

Згідно з ТУ У 27.1-14313056-001, твердість прокату має бути не більшою за 340 *HB*; тож вироблені листи повністю відповідають вимогам замовлення.

Слід зазначити, що кінцеві властивості, що підтверджуються спеціальними випробуваннями та забезпечуються в готовому виробі після термічного оброблення у виробника броньованої техніки, не були метою даного дослідження.



Рис. 4. Зовнішній вигляд рулону з марки криці типу 32NiCrMoV9 після остаточного охолодження.

Fig. 4. Appearance of a coil of steel grade 32NiCrMoV9 after final cooling.

6. ВИСНОВКИ

1. Розроблено технологічні рекомендації з виробництва рулонів і листів з високоміцної марки криці типу 32NiCrMoV9 розмірами у 5×1500×6000 мм з використанням устаткування стану 3600 МК «Азовсталь», стану 1700 та ковпакових печей цеху холодного прокату ММК «Імені Ілліча».

2. Розроблені технологічні рекомендації включають температурно-деформаційний і швидкісний режими прокатки, спрямовані на забезпечення кращих балістичних результатів кінцевого продукту, що є усадкованими.

3. На підставі розробленого режиму прокатки виготовлено дослідний рулон розмірами у 5×1500 мм і вперше підтверджено можливість прокатки в умовах стану 1700 високоміцної марки криці типу 32NiCrMoV9 за гарячекатаними режимами.

4. Для розрізання на листи дослідний рулон пройшов відпалювання в ковпаковій печі, що уможливило знизити рівень механічних властивостей і зробити його придатним для розрізання та правки на наявному агрегаті поперечної порізки.

5. Подальші дослідження можуть бути спрямовані на вдосконалення технологічного процесу прокатки за результатами випробувань кінцевого продукту.

Роботу присвячено колеґам і друзям, загиблим внаслідок нападу російської федерації на Україну.

ЦИТОВАНА ЛІТЕРАТУРА—REFERENCES

1. Ambuj Saxena, A. Kumaraswamy, Shashi Prakash Dwivedi, Ashish Kumar Srivastava, and Nagendra Kumar Maurya, *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, **106**: 102502 (2020).
2. A. Kurzawa, D. Pyka, M. Bocian, K. Jamroziak, and J. Sliwinski, *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, **18**, Iss. 4: 1697 (2018).
3. B. McDonald, H. Bornstein, A. Ameri, A. Daliri, and A. C. Orifici, *Int. J. Solids and Structures*, **176–177**: 135 (2019).
4. Maweja Kasonde and Stumpf Waldo, *Mater. Sci. Eng.*, **485**, Iss. 1–2: 140 (2008).
5. M. Saleh, M. Kariem, V. Luzin, K. Toppler, H. Li, and D. Ruan, *Mater. Sci. Eng.*, **709**: 30 (2018).
6. I. G. Crouch, S. J. Cimpoeru, H. Li, and D. Shanmugam, *Science of Armour Materials* (Ed. I. G. Crouch) (Woodhead Publishing: 2017), p. 55.
7. O. Kurpe and V. Kukhar, *Sci. J. Ternopil National Technical University*, **98**, No. 2: 68 (2020).
8. Hai-jun Li, Zhen-lei Li, Guo Yuan, Zhao-dong Wang, and Guo-dong Wang, *J. Iron and Steel Research Int.*, **20**, Iss. 7: 29 (2013).
9. Yunbo Xu, Yongmei Yu, Xianghua Liu, and Guodong Wang, *J. University of Sci. Technol. Beijing, Mineral, Metallurgy, Mater.*, **15**, Iss. 4: 396 (2008).
10. V. Javaheria, N. Khodaieb, A. Kaijalainen, and D. Portera, *Mater. Charact.*, **142**: 295 (2018).
11. V. V. Kukhar, O. H. Kurpe, E. S. Klimov, A. H. Prysiazhnyi, and O. S. Anishchenko, *Monographic Series 'European Science'. Book 3, Pt. 3* (Karlsruhe: 2020), p. 78.
12. G. W. Bright, J. I. Kennedy, F. Robinson, M. Evans, M. T. Whittaker, J. Sullivan, and Y. Gao, *Proc. Eng.*, **10**: 106 (2011).
13. Wen Tan, Bin Han, Shui-ze Wang, Yi Yang, Chao Zhang, and Yong-kun Zhang, *J. Iron and Steel Research Int.*, **19**: 37 (2012).
14. J. Kim, J. Lee, and S. M. Hwang, *Int. J. Heat Mass Transfer*, **52**, Iss. 7–8: 1864 (2009).
15. V. D. Poznyakov, A. A. Hayvoronskiy, V. A. Kostin, V. V. Durachenko, and Yu. N. Kostin, *Mekhanika ta Mashynobuduvannya*, No. 1: 260 (2017) (in Russian).