

УДК 621.771.23

Курпе О. Г.

ТЕРМОМЕХАНІЧНА ПРОКАТКА ТОВСТИХ ЛИСТІВ ЗІ СТАЛІ МАРКИ ЕН36 НА СТАНІ 3600 ПрАТ «МК «АЗОВСТАЛЬ»

Завдяки низці суттєвих переваг технологія термомеханічної прокатки отримала поширення при виробництві майже усіх видів прокату. Внаслідок цього споживачі отримали продукцію, яка відповідає сучасним вимогам з якості, а виробники отримали додаткову можливість знизити собівартість продукції тим самим зберегти, а в деяких випадках і суттєво підвищити свою конкурентоспроможність.

Наразі, великий перелік світових стандартів з виробництва прокату дозволяє виробляти схожу продукцію різноманітними способами, будь то класична гаряча прокатка, нормалізуюча прокатка, термомеханічна прокатка (ТМСП) або із застосуванням термічної обробки. Але боротьба за собівартість, конкуренція та вимоги до якості продукції встановлюють чіткі пріоритети що до способу виробництва. Окремий перелік сортаменту спеціального призначення, виробництво якого ще залишається із застосуванням тільки термічної обробки.

Тому дуже важливо виконати низку досліджень та засвоїти виробництво прокату способом термомеханічної прокатки замість інших більш витратних способів, якщо це дозволяє відповідний стандарт на продукцію.

Розробка та подальше поширення технології термомеханічної контрольованої прокатки (ТМСП) у світі почалось з 60-х років минулого століття [1]. В нашій країні впровадження цієї технології почалося з виробництва товстолистого прокату на 10 років пізніше [2]. З того часу технологія ТМСП набула розвитку, суттєві зміни також відбулися і у відповідному устаткуванні [3-5]. Зараз цей спосіб виробництва є таким, що постійно розвивається та поширюється на різні види прокату.

Наразі способом ТМСП виробляється товстолистовий та рулонний прокат для конструювання, будівництва, вироблення судів під тиском, для виробництва трубопроводів, дослідження якого наведено у багатьох працях авторів з різних країн світу [3–18].

Процес ТМСП переважно був поширений для виробництва прокату з низьковуглецевих марок сталі [13, 14], але в останній час поширилось вивчення процесу зі застосуванням сталей з вмістом вуглецю до 0,40 % [19]. Вивчення та впровадження сталей з вмістом вуглецю від 0,06 % та нижче отримало подальший розвиток з поглибленими дослідженнями процесів зміцнення та отримання додаткових властивостей [8, 10, 15, 20, 21]. Дослідження впливу різноманітних швидкостей охолодження при реалізації процесу ТМСП на структуру та властивості прокату становлять окрему цікавість [11, 22], та підтверджують ефект суттєвого підвищення властивостей при збільшенні швидкості охолодження.

Якщо дозволяє устаткування, то сучасний рівень технології забезпечує виробництво прокату з межею плинності до та понад 800МПа, але нові більш вищі рівні властивостей становлять і нові проблеми, які потребують подальшого вивчення [12, 15].

З розробкою технології та поглибленим вивченням її впливу на нові властивості прокату, отримав поширення напрямок прогнозування результатів впровадження технології через моделювання розвитку мікроструктури та механічних властивостей, запропонованих авторами робіт [6, 7].

Великий перелік наукових праць свідчить, що для засвоєння технології виробництва продукції способом ТМСП треба виконати низку досліджень з метою підтвердження можливостей технології, обладнання та отримання відповідної якості, згідно з вимогами стандартів та споживачів [23–29].

Розробка технології термомеханічної контрольованої прокатки для виробництва товстолистого прокату розмірами 25 × 2150 × 8000 мм із судосталі марки ЕН36 замість термічної обробки нормалізацією в умовах стану 3600 є актуальним завданням, що забезпечить виробництво прокату відповідно до сучасних вимог та дозволить знизити собівартість продукції.

Метою роботи є розробка технології виробництва товстолистового прокату із судосталі підвищеної міцності марки ЕНЗ6 згідно з вимогами Правил BV, розмірами $25 \times 2150 \times 8000$ мм в умовах стану 3600 ПрАТ «МК АЗОВСТАЛЬ».

Устаткування стану 3600 складається з п'яти методичних дворядних печей штовхального типу з можливістю нагрівання слябів товщиною від 130 до 350 мм, шириною від 1100 до 1920 мм, довжиною від 920 до 3420 мм та масою від 1,8 до 16 т. Камера гідрозмиву окалини, що має тиск 150 атм. Універсальна чорнова кліть з максимальною силою прокатки 11 МН у вертикальних валках та 46 МН у горизонтальних валках. Дворядний візок для передавання прокату товщиною від 50,8 мм та більше на ділянку для подальшої обробки плит. Чистова реверсивна кліть з максимальною силою прокатки 46 МН. Чорнова та чистова кліті устатковані з обох сторін вбудованими гідрозмивами окалини з тиском 150 атм. Установка прискореного охолодження виробництва SMS Demag з довжиною охолоджувальної частини 25600 мм, має 24 верхні та 24 нижні колектори ламінарного охолодженням, швидкість охолодження 12–45 °С/с. Дев'ятироликів правильна машина виробництва SMS Demag, поперечні ножиці.

Схема розміщення основного устаткування стану 3600 наведена на рис. 1.

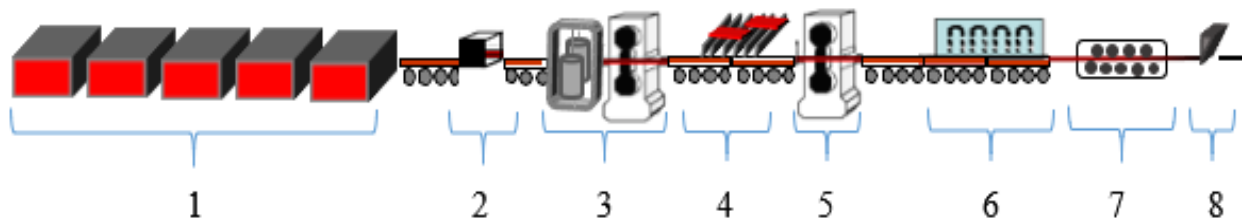


Рис. 1. Схема розміщення основного устаткування стану 3600:

1 – ділянка методичних печей; 2 – камера гідрозмиву окалини; 3 – універсальна чорнова реверсивна кліть; 4 – візок для передавання плит; 5 – чистова реверсивна кліть; 6 – установка прискореного охолодження; 7 – роликів-правильна машина; 8 – поперечні ножиці

Стан виробляє товстолистовий прокат конструкційного, машинобудівного, суднобудівного призначення, а також для будівництва морських бурових платформ, для виготовлення електрозварних труб великого діаметру з підвищеним тиском та іншого призначення. Розміри прокату становлять: товщина від 6 до 200 мм, ширина від 1500 до 3300 мм, довжина від 6 до 24400 мм.

Слід зазначити, що наразі, виробництво прокату із судосталі підвищеної міцності марки ЕНЗ6 товщиною до 50 мм на стані 3600 здійснюється з виконанням термічної обробки – нормалізації, що відповідно зазначено сертифікатом №08458/D0 BV, який видало товариство Bureau Veritas (Бюро Верітас).

Згідно з Правилами BV, товстолистовий прокат товщиною до 100 мм зі сталі марки ЕНЗ6 може виготовлятися з нормалізацією або способом термомеханічної прокатки.

Відповідно до класифікації BV, Правила NR 216 Глава 2 (п. 1.7.3) [30], термомеханічна прокатка ТМ (термомеханічний контрольований процес ТМСР) передбачає суворий контроль температури металу і обтиску при прокатці. Як правило, основна частина обтиску відбувається при температурі близької до температури Ar₃ і може припускати прокатку в двофазній області. Властивості після ТМ (ТМСР) не можуть бути відтворені наступною нормалізацією або іншими видами термообробки. За спеціальним схваленням товариства після прокатки може застосовуватися прискорене охолодження АСС, при якому забезпечується поліпшення механічних властивостей за рахунок контрольованого охолодження зі швидкістю більшою, ніж охолодження на повітрі.

Для проведення дослідної прокатки використані сляби розмірами $220 \times 1850 \times 1590-1600$ мм вагою 5,080–5,112 т, плавка 2104917, з хімічним складом, наведеними в табл. 1.

Таблиця 1

Параметри слябів для дослідної прокатки

Марка сталі	№ плавки	CE	Вміст хімічних елементів, %													
			C	Mn	Si	S	P	Nb	Cr	Ni**	Cu	V**	Ti**	Mo	Al	H
ЕН36	2104917	0,38	0,16	1,28	0,25	0,0040	0,019	0,033	0,03	0,03	0,03	0,003	0,012	0,005	0,04	4,9
ЕН36	типовий*	0,37-0,41	0,14-0,16	1,32-1,35	0,22-0,26	0,005-0,011	0,009-0,018	0,032-0,038	0,03-0,08	0,02-0,13	0,02-0,05	-	-	-	0,028-0,040	3,1-4,7
Правила BV NR216, Глава 2		≤0,38	≤0,18	0,90-1,60	≤0,50	≤0,035	≤0,035	0,02-0,05	≤0,20	≤0,40	≤0,35	0,05-0,10	≤0,02	≤0,08	≥0,015	-
		Сума Nb + V + Ti ≤ 0,12 %. Вуглецевий еквівалент CE розраховується по формулі: $CE = C + \frac{Mn}{6} + \frac{(Cr + Mo + V)}{5} + \frac{(Ni + Cu)}{15}$														

* типовий хімічний склад, який застосовується для поточного виробництва вказаного сортаменту з використанням термічної обробки – нормалізації

** вказані елементи використовуються окремо або в комбінації

Хімічний склад дослідних слябів повністю відповідає вимогам «Правил на матеріали та зварювання для класифікації морських споруд» NR216, Глава 2, встановлених для термомеханічного способу виробництва прокату зі сталі марки ЕН36.

Для порівняння хімічних складів в табл. 1 наведений типовий хімічний склад, який використовується наразі для виробництва сталі марки ЕН36 з термічною обробкою – нормалізацією. Наведений хімічний склад має незначні відхилення від складу, який використано в дослідній прокатці, але перевищення встановленого обмеження по вуглецевому еквіваленту унеможливило його використання для термомеханічного способу прокатки.

При проектуванні технології використовувалися принципи низькотемпературної контрольованої прокатки, а саме формування необхідної структури і властивостей прокату при завершенні деформації у двофазній $\gamma - \alpha$ області.

В якості дослідного сортаменту прийнятий прокат розмірами 25 × 2150 мм зі сталі марки ЕН36, який наразі виробляється тільки з нормалізацією.

Розраховані наступні цільові термомеханічні показники процесу прокатки: ступінь деформації після розбивання ширини розкату в чорновій кліті – не менше ніж 15 %; температурний режим в чистовій кліті, температура початку деформації 750–770 °С, температура закінчення деформації 740–720 °С.

Проектування технології виконувалося на базі комплексної математичної моделі стану 3600.

Цільовою схемою прокатки в чорновій кліті є поперечно-поздовжня схема з наростанням деформації, що забезпечує, в середньому, постійну, на рівні 23МН, силу прокатки по пропусках. Реалізація процесу термомеханічної прокатки на стані 3600 здійснювалася відповідно до розроблених температурно-деформаційних режимів, табл. 2, 3.

Фактично, в процесі дослідження було використано дві схеми – поздовжньо-поперечно-поздовжня (розбивка з протягуванням) для партії № 7052 та цільова – поперечно-поздовжня схема для партії № 7053.

Порівняння результатів розрахунку з фактичними параметрами прокатки наведені в табл. 2, 3.

Таблиця 2

Цільові та фактичні параметри виробництва листового прокату розмірами 25 × 2150 мм зі сталі марки ЕН36 в чорновій кліті стану 3600

№ проходу	Цільові параметри				Фактичні параметри									
					партія № 7052				партія № 7053					
	Товщина, мм	Ступінь деформації, %	Сила прокатки, МНх100	Температура, °С	Товщина (стрілка), мм	Товщина (перерахована)*, мм	Ступінь деформації, %	Сила прокатки, МНх100	Температура, °С	Товщина (стрілка), мм	Товщина (перерахована)*, мм	Ступінь деформації, %	Сила прокатки, МНх100	Температура, °С
0	К 221,7				221,7					К 221,7				
1	190	14,3	2045,6	1150	200	202,2	9,6	2250	1128	180	182,7	21,3	2500	1125
2	154	18,9	2386,9	1146	180	182,3	10,9	2300		152	154,2	18,5	2250	
3	К 131	14,9	2299,5	1142	К 145	147,7	23,4	2500		К 115	119,3	29,3	3420	
4	110	16,0	2300,4	1136	123	127,4	15,9	3500		90	93,9	27,1	3200	
5	91	17,3	2302,9	1129	100	103,9	22,6	3200		72	75,2	24,9	2820	
6	75	17,6	2202,7	1121	К 72	76,1	36,5	3300						

К – кантування.

* фактична товщина розкату, перерахована з урахуванням пружини кліті.

Таблиця 3

Цільові та фактичні параметри виробництва листового прокату розмірами 25 × 2150 мм зі сталі марки ЕН36 в чистовій кліті стану 3600

№ проходу	Цільові параметри				Фактичні параметри									
					партія № 7052				партія 7053					
	Товщина, мм	Ступінь деформації, %	Сила прокатки, МНх100	Температура, °С	Товщина (стрілка), мм	Товщина (перерахована)*, мм	Ступінь деформації, %	Сила прокатки, МНх100	Температура, °С	Товщина (стрілка), мм	Товщина (перерахована)*, мм	Ступінь деформації, %	Сила прокатки, МНх100	Температура, °С
0	75					76,1					75,2			
1	71	5,3	2427,1	760	66	66,8	12,2	3450	768	65	65,6	12,8	3370	767
2	65	8,5	3419,2	756	56	58,2	12,9	4300		57	58,4	11,0	3820	
3	59,5	8,5	3322,9	754	48	50,3	13,6	4370		51	52,6	9,9	3950	
4	54	9,2	3452,6	752	42	44,2	12,1	4320		45	46,6	11,4	3950	
5	49	9,3	3345,3	750	38	39,1	11,5	3670		40	41,5	10,9	3900	
6	44	10,2	3501,9	747	34	35,1	10,2	3650		36	37,3	10,1	3750	
7	39,5	10,2	3393,9	744	31	31,6	10,0	3370		32	33,3	10,7	3770	
8	35	11,4	3570,2	741	29	29	8,2	3020		29	30	9,9	3570	
9	31	11,4	3458,9	737	29	26,6	8,3	1550	738	27	27,3	9,0	3200	
10	27,5	11,3	3274,6	736						26,5	25,6	6,2	2470	721
11	25	9,1	2654,1	734										

К – кантування.

* фактична товщина розкату, перерахована з урахуванням пружини кліті.

Фактичні параметри прокатки, у тому числі ступінь деформації після розбивання в чорновій кліті, та температурний режим в чистовій кліті, були витримані.

Схема прокатки в чорновій кліті, яка була застосована при виробництві партії 7053, є більш раціональною, оскільки дозволяє при збільшенні ступеню деформації знизити кількість проходів, зменшити цикл прокатки в чорновій кліті при незначному збільшенні сили прокатки в 3 та 4 проході, та більш наближена до цільової. Схема прокатки при виробництві партії 7052 за рахунок фази поперечної прокатки (проходи 3–5) та збільшеного ступеню деформації по проходах 3, 5 та 6 призвела до підвищення сили прокатки, отже є більш енерговитратною.

Змінення ширини заготовки в чорновій кліті при реалізації різних комбінацій поперечної та поздовжньої схеми прокатки наведено на рис. 2.

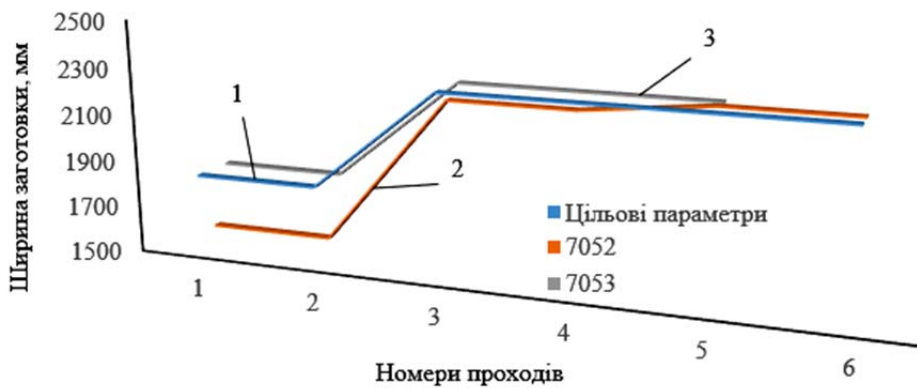


Рис. 2. Змінення ширини заготовки в чорновій кліті при реалізації цільової схеми прокатки (1), схеми при виробництві партії 7052 (2), схеми при виробництві партії 7053 (3)

Схеми прокатки в чорновій кліті, які були застосовані, наведені на рис. 3.

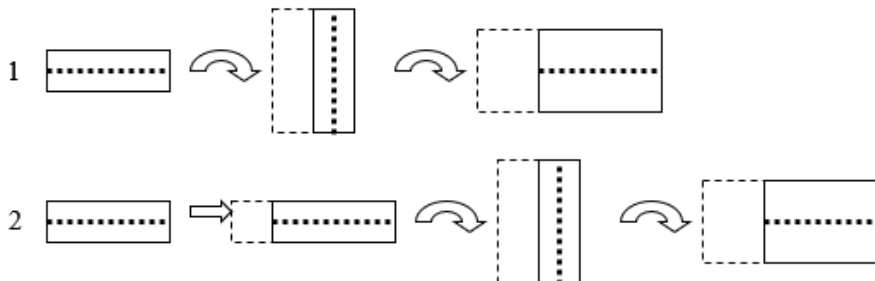


Рис. 3. Схема прокатки в чорновій кліті цільова та фактично застосована на партії № 7053 (1), фактично застосована на партії № 7052 (2)

Після прокатки та остаточного охолодження, від прокату було відібрано проби для здійснення комплексу механічних випробувань (основних та додаткових), відповідно до вимог Правил BV NR 216 Глава 2 та Правил BV NR 480 «Схвалення процесу виготовлення металопродукції». Результати випробувань наведені в табл. 4, 5.

Для порівняння чинної технології з дослідною прокаткою в табл. 4 наведені результати випробувань прокату виробленого з нормалізацією та по технологіях ТМСП.

Таким чином, результати основних механічних випробувань прокату виробленого по режимам термомеханічної прокатки, повністю задовольняють вимогам Правил BV. Додаткові випробування в цілому також показали позитивний результат. Виняток склали результати випробувань зразків партії 7052 на ударний вигін з деформаційним зістаренням і оцінка частки волокна в зламі при температурі « -60°C », які показали більш низький рівень властивостей. Дані результати вимагають проведення додаткових випробувань та дослідження мікроструктури.

Таблиця 4

Результати основних випробувань прокату згідно з вимогами Правил BV NR 216 Глава 2 та Правил BV NR 480

Вид випробувань	Вимоги BV	Результати випробувань		Порівняльні дані зі станом після термічної обробки – нормалізації
		Партія 7052	Партія 7053	
Товщина прокату, мм		25	25	23-27
Межа плинності, R_{eH} , МПа, не менше	355	437	450	367-426
Тимчасовий опір, R_m , МПа	490-630	550	560	496-540
Відносне подовження, A_5 , %, не менше	21	30	30	25-36
Середня робота удару, Дж				
KVL ₄₀ (подовжене випробування)	34	144/166/155	142/125/149	194/204
KVT ₄₀ (поперечне випробування)	24	99/105/107	116/107/117	

Таблиця 5

Результати додаткових випробувань прокату згідно з вимогами Правил BV NR 216 Глава 2 та Правил BV NR 480

Вид випробувань	Результати випробувань	
	Партія 7052	Партія 7053
Випробування на розтягнення (зі зняттям напруги) при 600°C (2мін/мм) мін. 1 час.		
Межа плинності, R_{eH} , МПа, не менше	435	459
Тимчасовий опір, R_m , МПа	548	556
Відносне подовження, A_5 , %, не менше	30	31
Випробування на ударний вигін на не зістарених зразках, Дж		
KVL ₀	171/192/187	149/177/182
KVL ₂₀	185/187/192	173/188/146
KVT ₂₀	143/135/132	132/142/136
KVL ₄₀	144/166/155	142/125/149
KVT ₄₀	99/105/107	116/107/117
KVL ₆₀	113/127/117	104/112/115
KVT ₆₀	80/72/81	77/96/86
Випробування на ударний вигін на зразках деформаційна зістарених, Дж		
KVL ₂₀	158/153	184/166
KVL ₄₀	107/113	140/116
KVL ₆₀	48/10	70/84
Волокно ₆₀ , %	40/0	90/100
Неметалеві включення середній / максимальний		
Силікати крихкі СХ, бал	2,1/2,5	0,8/1,5
Силікати недеформовані, СН, бал	2,0/2,5	1,5/2,0
Сірчані відбитки	В осевій зоні скупчення сірки у вигляді крапок та окремих коротких переривистих ліквацийних стежок	
Дослідження мікроструктури	Ферит-перлітна, зі збільшенням доли перлітної складової в осевій зоні	
Визначення розміру зерна	9; 10	9; 10
Випробування на розтягнення у напрямку товщини, Z, %	61/67	60/52

Невелике збільшення властивостей, отриманих при розтягувальних випробуваннях партії 7053, може бути пов'язано з використанням більш напруженого режиму прокатки у чорновій кліті.

Прокатка, здійснена по режимах термомеханічної прокатки, забезпечила отримання більш дрібного зерна фериту 10; 9 бал в порівнянні з нормалізацією 8; 9 бал для порівнянного сортаменту.

У порівнянні з результатами випробувань на розрив на порівнянному сортаменті, зробленому з нормалізацією, при термомеханічній прокатці отримано більш вищий рівень межі плинності та тимчасового опору, що дозволяє зробити висновок про можливість оптимізації технології та хімічного складу сталі.

ВИСНОВКИ

Підтверджена технічна можливість виробництва товстолистого прокату зі сталі марки ЕН36 для суднобудування способом термомеханічної прокатки, в умовах стану 3600 МК «АЗОВСТАЛЬ».

Вперше для умов стану 3600 МК «АЗОВСТАЛЬ» способом ТМСП вироблена дослідна партія прокату зі сталі марки ЕН36, згідно з вимогами Правил ВУ, проведено комплекс основних та додаткових випробувань, що підтверджує можливість подальшого засвоєння технології та сертифікації продукції.

Впровадження технології термомеханічної прокатки замість нормалізації дозволить знизити собівартість прокату за рахунок виключення витрат природного газу на термообробку (нормалізацію).

Для підготовки сертифікації, згідно з Правилами ВУ, необхідно додатково провести низку досліджень прокату зі сталі марки ЕН36 різних товщин.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Militzer M. *Thermomechanical Processed Steels Reference Module in Materials Science and Materials Engineering Comprehensive // Materials Processing. – Vol. 1. – 2014. – pp. 191–216. – DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-096532-1.00115-1>.*
2. Zinchenko Yu. A. *Prospects of the technology used to make skelp at the Azovstal metallurgical combine / Yu. A. Zinchenko, A. G. Kurpe, O. A. Bagmet // Metallurgist. – Vol. 52. Nos. 7–8. – 2008. – Pp. 461–463. – DOI: <https://doi.org/10.1007/s11015-008-9065-4>.*
3. LI Hai-jun. *Development of New Generation Cooling Control System After Rolling in Hot Rolled Strip Based on UFC / LI Hai-jun, LI Zhen-lei, YUAN Guo, WANG Zhao-dong, WANG Guo-dong // Journal of Iron and Steel Research, International. – 2013. 20(7). – Pp. 29–34.*
4. LIU En-yang. *Algorithm Design and Application of Laminar Cooling Feedback Control in Hot Strip Mill / LIU En-yang, ZHANG Dian-hua, SUN Jie, PENG Liang-gui, GAO Bai-hong, SU Li-tao // Journal of Iron and Steel Research, International. – 2012. – 19(4). – pp. 39–42. – DOI: [https://doi.org/10.1016/S1006-706X\(12\)60085-5](https://doi.org/10.1016/S1006-706X(12)60085-5).*
5. Volodymyr Kukhar. *Designing of induction heaters for the edges of pre-rolled wide ultrafine sheets and strips correlated with the chilling end-effect / Volodymyr Kukhar, Andrii Prysiaznyi, Elena Balalayeva, Oleksandr Anishchenko // Modern Electrical and Energy System MEES'2017. IEEE, Kremenchuk, Ukraine, Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University, November 15–17. – 2017. – Pp. 404–407. – DOI: <https://doi.org/10.1109/MEES.2017.8248945>.*
6. Yunbo Xu. *Modeling of microstructure evolution and mechanical properties during hot-strip rolling of Nb steels / Yunbo Xu, Yongmei Yu, Xianghua Liu, and Guodong Wang // Journal of University of Science and Technology. Beijing. – Vol. 15. – 2008. – Pp. 396–401. – DOI: [https://doi.org/10.1016/S1005-8850\(08\)60075-4](https://doi.org/10.1016/S1005-8850(08)60075-4).*
7. Korczak P. *Investigation of microstructure prediction during experimental thermo-mechanical plate rolling / P. Korczak, H. Dyja // Journal of Materials Processing Technology, 109. – 2001. – Pp. 112–119. – PII: S 0924–0136(00)00784-6.*
8. Xiangwei Kong. *Optimization of mechanical properties of low carbon bainitic steel using TMCP and accelerated cooling / Xiangwei Kong, Liangyun Lan // Nagoya Congress Center, Nagoya, Japan, Procedia Engineering 81. – 2014. – Pp. 114–119. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2014.09.136>.*
9. Sir Harshad Bhadeshia. *Thermomechanical Treatment of Steels / Microstructure and Properties (Fourth edition). – 2017. – Pp. 271–301. – DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100270-4.00010-X>.*
10. V. Carretero Olalla. *Analysis of the strengthening mechanisms in pipeline steels as a function of the hot rolling parameters / V. Carretero Olalla, V. Bliznuk, N. Sanchez, P. Thibaux, L. A. I. Kestens, R.H. Petrov // Materials Science & Engineering A 604. – 2014. – Pp. 46–56. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.msea.2014.02.066>.*

11. J. Zhao. *A Novel thermo-mechanical controlled processing for large-thickness microalloyed 560 MPa (X80) pipeline strip under ultra-fast cooling* / J. Zhao, W. Hu, X. Wang, J. Kang, Y. Cao, G. Yuan, H. Di, R. D. K. Misra // *Materials Science & Engineering A* 673. – 2016. – Pp. 373–377. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.msea.2016.07.089>.
12. J. Zhao. *Effect of microstructure on the crack propagation behavior of microalloyed 560 MPa (X80) strip during ultra-fast cooling* / J. Zhao, W. Hu, X. Wang, J. Kang, G. Yuan, H. Di, R.D.K. Misra // *Materials Science & Engineering A* 666. – 2016. – Pp. 214–224. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.msea.2016.04.073>.
13. TAN Wen. *Artificial Neural Network Modeling of Microstructure During C-Mn and HSLA Plate Rolling* / TAN Wen, LIU Zhen-yu, WU Di, WANG Guo-dong // *Journal of Iron and Steel Research, International*. – 2009. – 16(2). – Pp. 80–83. – DOI: [https://doi.org/10.1016/S1006-706X\(09\)60032-7](https://doi.org/10.1016/S1006-706X(09)60032-7).
14. DONG Rui-feng. *Microstructures and Properties of X60 Grade Pipeline Strip Steel in CSP Plant* / DONG Rui-feng, SUN Li-gang, LIU Zhe, WANG Xue-lian, LIU Qing-you // *Journal of Iron and Steel Research, International*. – 2008. – Pp. 71–75. – DOI: [https://doi.org/10.1016/S1006-706X\(08\)60035-7](https://doi.org/10.1016/S1006-706X(08)60035-7).
15. Alexey Gervasyev. *An approach to microstructure quantification in terms of impact properties of HSLA pipeline steels* / Alexey Gervasyev, Victor Carretero Olalla, Jurij Sidor, Nuria Sanchez Mourino, Leo A. I. Kestens, Roumen H. Petrov // *Materials Science & Engineering A* 677. – 2016. – Pp. 163–170. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.msea.2016.09.043>.
16. Багмет О. А. *Формирование оптимальных структур и свойств при проведении контролируемой прокатки трубных сталей, содержащих ниобий* : автореф. дис. / Багмет О. А. – М. : Графикс В, 2007. – 23 с.
17. Спосіб виробництва сталевих високоміцних електрозварних одношовних труб великого діаметра для магістральних трубопроводів: пат. 98214 Україна: МПК (2012.01), B21C 37/08 (2006.01) B21B 1/32 (2006.01) C22C 38/00 C21D 8/02 (2006.01) C21D 8/10 (2006.01) B23K 9/025 (2006.01). № а 2010 11473 ; заява 27.09.2010 ; публ. 25.04.2012, Бюл. № 8. – 7 с.
18. Спосіб виробництва сталевих високоміцних електрозварних двошовних труб великого діаметра для магістральних трубопроводів: пат. 96097 Україна: МПК (2011.01), B21C 37/08 (2006.01) C22C 38/00 C21D 1/00 B21B 1/22 (2006.01) B23K 9/00. № а201011469 ; заяв 27.09.2010 ; публ. 26.09.2011, Бюл. № 18. – 5 с.
19. Vahid Javaheria. *Effect of niobium and phase transformation temperature on the microstructure and texture of a novel 0.40% C thermomechanically processed steel* / Vahid Javaheria, Nasseh Khodaieab, Antti Kaijalainen, David Portera // *Materials Characterization*, 142. – 2018. – Pp. 295–308. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matchar.2018.05.056>.
20. G. W. Bright. *Variability in the mechanical properties and processing conditions of a High Strength Low Alloy steel* / G. W. Bright, J. I. Kennedy, F. Robinson, M. Evans, M. T. Whittaker, J. Sullivan, Y. Gao // *Procedia Engineering*, 10. – 2011. – Pp. 106–111. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2011.04.020>.
21. TAN Wen. *Effects of TMCP Parameters on Microstructure and Mechanical Properties of Hot Rolled Economical Dual Phase Steel in CSP* / TAN Wen, HAN Bin, WANG Shui-ze, YANG Yi, ZHANG Chao, ZHANG Yong-kun // *Journal of Iron and Steel Research, International*. – 2012. – 19(6). – Pp. 37–41. – DOI: [https://doi.org/10.1016/S1006-706X\(12\)60124-1](https://doi.org/10.1016/S1006-706X(12)60124-1).
22. S. Tang. *Microstructural evolution and mechanical properties of high strength microalloyed steels: Ultra Fast Cooling (UFC) versus Accelerated Cooling (ACC)* / S. Tang, Z.Y. Liu, G.D. Wang, R.D.K. Misra // *Materials Science & Engineering A* 580. – 2013. – Pp. 257–265. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.msea.2013.05.016>.
23. Спосіб виробництва гарячекатаного прокату підвищеної міцності: пат. 110812 Україна: МПК B21B 1/46 (2006.01). № u 2016 03353 ; заява 31.03.2016 ; опубл. 25.10.2016, Бюл. № 20. – 4 с.
24. Спосіб виробництва гарячекатаного прокату підвищеної міцності: пат 121374 Україна: МПК B21B 1/46 (2006.01). – № u 2017 01785 ; заява 24.02.2017 ; публ. 11.12.2017, Бюл. № 23. – 4 с.
25. Максименко О. П. *Теоретический анализ момента при прокатке с натяжением полосы* / О. П. Максименко, А. Г. Присяжный, В. В. Кухарь, Е. В. Кузьмин // *Обработка материалов давлением* : сб. науч. тр. – Краматорск : ДГМА, 2017. – № 1 (44). – С. 199–203.
26. Кухарь В. В. *Уточнение методики расчета тепловых потерь металла на непрерывных станах горячей прокатки* / В. В. Кухарь, А. Г. Курпе // *Обработка материалов давлением* : сб. науч. тр. / ДГМА. – Краматорск : ДГМА, 2018. – № 1 (46). – С. 159–166.
27. Курпе О. Г. *Уточнения розрахунку теплових втрат металу на станах Стеккеля* / О. Г. Курпе, В. В. Кухар, С. В. Змазнева // *Проблеми трибології = Problems of Tribology*. – 2018. – № 1. – С. 78–84.
28. Кухар В. В. *Розробка технології виробництва листового прокату товщиною 4 мм на стані 3200 заводу Tramatel SpA* / В. В. Кухар, О. Г. Курпе // *Металлургическая и горнорудная промышленность*. – 2018. – № 2. – С. 24–29.
29. Volodymyr Kukhar. *Experimental Research and Method for Calculation of 'Upsetting-with-Buckling' Load at the Impression-Free (Dieless) Preforming of Workpiece* / Volodymyr Kukhar, Viktor Artiukh, Andrii Prysiaznyi, Andrey Pustovgar // *E3S Web of Conference (HRC 2017)*. – Vol. 33. 02031. – 2018. – <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20183302031>.
30. Rule Note NR 216 DT R09 E. *Rules on Materials and Welding for the Classification of Marine Units*. – Bureau Veritas, January 2017. – P. 260.

REFERENCES

1. Militzer M. *Thermomechanical Processed Steels Reference Module in Materials Science and Materials Engineering Comprehensive // Materials Processing*. – Vol. 1. – 2014. – pp. 191–216. – DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-096532-1.00115-1>.
2. Zinchenko Yu. A. *Prospects of the technology used to make skelp at the Azovstal metallurgical combine / Yu. A. Zinchenko, A. G. Kurpe, O. A. Bagmet // Metallurgist*. – Vol. 52. Nos. 7–8. – 2008. – Pp. 461–463. – DOI: <https://doi.org/10.1007/s11015-008-9065-4>.
3. LI Hai-jun. *Development of New Generation Cooling Control System After Rolling in Hot Rolled Strip Based on UFC / LI Hai-jun, LI Zhen-lei, YUAN Guo, WANG Zhao-dong, WANG Guo-dong // Journal of Iron and Steel Research, International*. – 2013. 20(7). – Pp. 29–34.
4. LIU En-yang. *Algorithm Design and Application of Laminar Cooling Feedback Control in Hot Strip Mill / LIU En-yang, ZHANG Dian-hua, SUN Jie, PENG Liang-gui, GAO Bai-hong, SU Li-tao // Journal of Iron and Steel Research, International*. – 2012. – 19(4). – pp. 39–42. – DOI: [https://doi.org/10.1016/S1006-706X\(12\)60085-5](https://doi.org/10.1016/S1006-706X(12)60085-5).
5. Volodymyr Kukhar. *Designing of induction heaters for the edges of pre-rolled wide ultrafine sheets and strips correlated with the chilling end-effect / Volodymyr Kukhar, Andrii Prysiashnyi, Elena Balalayeva, Oleksandr Anishchenko // Modern Electrical and Energy System MEES'2017. IEEE, Kremenchuk, Ukraine, Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University, November 15–17. – 2017. – Pp. 404–407. – DOI: <https://doi.org/10.1109/MEES.2017.8248945>.*
6. Yunbo Xu. *Modeling of microstructure evolution and mechanical properties during hot-strip rolling of Nb steels / Yunbo Xu, Yongmei Yu, Xianghua Liu, and Guodong Wang // Journal of University of Science and Technology. Beijing*. – Vol. 15. – 2008. – Pp. 396–401. – DOI: [https://doi.org/10.1016/S1005-8850\(08\)60075-4](https://doi.org/10.1016/S1005-8850(08)60075-4).
7. Korczak P. *Investigation of microstructure prediction during experimental thermo-mechanical plate rolling / P. Korczak, H. Dycja // Journal of Materials Processing Technology, 109*. – 2001. – Pp. 112–119. – PII: S 0924-0136(00)00784-6.
8. Xiangwei Kong. *Optimization of mechanical properties of low carbon bainitic steel using TMCP and accelerated cooling / Xiangwei Kong, Liangyun Lan // Nagoya Congress Center, Nagoya, Japan, Procedia Engineering 81*. – 2014. – Pp. 114–119. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2014.09.136>.
9. Sir Harshad Bhadeshia. *Thermomechanical Treatment of Steels / Microstructure and Properties (Fourth edition)*. – 2017. – Pp. 271–301. – DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100270-4.00010-X>.
10. V. Carretero Olalla. *Analysis of the strengthening mechanisms in pipeline steels as a function of the hot rolling parameters / V. Carretero Olalla, V. Bliznuk, N. Sanchez, P. Thibaux, L. A. I. Kestens, R.H. Petrov // Materials Science & Engineering A 604*. – 2014. – Pp. 46–56. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.msea.2014.02.066>.
11. J. Zhao. *A Novel thermo-mechanical controlled processing for large-thickness microalloyed 560 MPa (X80) pipeline strip under ultra-fast cooling / J. Zhao, W. Hu, X. Wang, J. Kang, Y. Cao, G. Yuan, H. Di, R. D. K. Misra // Materials Science & Engineering A 673*. – 2016. – Pp. 373–377. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.msea.2016.07.089>.
12. J. Zhao. *Effect of microstructure on the crack propagation behavior of microalloyed 560 MPa (X80) strip during ultra-fast cooling / J. Zhao, W. Hu, X. Wang, J. Kang, G. Yuan, H. Di, R.D.K. Misra // Materials Science & Engineering A 666*. – 2016. – Pp. 214–224. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.msea.2016.04.073>.
13. TAN Wen. *Artificial Neural Network Modeling of Microstructure During C-Mn and HSLA Plate Rolling / TAN Wen, LIU Zhen-yu, WU Di, WANG Guo-dong // Journal of Iron and Steel Research, International*. – 2009. – 16(2). – Pp. 80–83. – DOI: [https://doi.org/10.1016/S1006-706X\(09\)60032-7](https://doi.org/10.1016/S1006-706X(09)60032-7).
14. DONG Rui-feng. *Microstructures and Properties of X60 Grade Pipeline Strip Steel in CSP Plant / DONG Rui-feng, SUN Li-gang, LIU Zhe, WANG Xue-lian, LIU Qing-you // Journal of Iron and Steel Research, International*. – 2008. – Pp. 71–75. – DOI: [https://doi.org/10.1016/S1006-706X\(08\)60035-7](https://doi.org/10.1016/S1006-706X(08)60035-7).
15. Alexey Gervasyev. *An approach to microstructure quantification in terms of impact properties of HSLA pipeline steels / Alexey Gervasyev, Victor Carretero Olalla, Jurij Sidor, Nuria Sanchez Mourinho, Leo A. I. Kestens, Roumen H. Petrov // Materials Science & Engineering A 677*. – 2016. – Pp. 163–170. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.msea.2016.09.043>.
16. Bagmet O. A. *Formirovanie optimal'nyh struktur i svoystv pri provedenii kontroliruemoy prokatki trubnyh stalej, sodержashchih niobij : avtoref. dis. / Bagmet O. A. – M. : Grafiks V, 2007. – 23 S.*
17. *Sposib virobництва stalevih visokomicnih elektrozvarnih odnoshovnih trub velikogo diametra dlja magistral'nih truboprovodiv: pat. 98214 Ukraïna: MPK (2012.01), B21C 37/08 (2006.01) B21B 1/32 (2006.01) C22C 38/00 C21D 8/02 (2006.01) C21D 8/10 (2006.01) B23K 9/025 (2006.01). № a 2010 11473 ; zajava 27.09.2010 ; publ. 25.04.2012, Bjul. № 8. – 7 s.*
18. *Sposib virobництва stalevih visokomicnih elektrozvarnih dvoshovnih trub velikogo diametra dlja magistral'nih truboprovodiv: pat. 96097 Ukraïna: MPK (2011.01), B21C 37/08 (2006.01) C22C 38/00 C21D 1/00 B21B 1/22 (2006.01) B23K 9/00. № a201011469 ; zava 27.09.2010 ; publ. 26.09.2011, Bjul. № 18. – 5 s.*

19. Vahid Javaheria. *Effect of niobium and phase transformation temperature on the microstructure and texture of a novel 0.40% C thermomechanically processed steel* / Vahid Javaheria, Nasseh Khodaieb, Antti Kaijalainen, David Portera // *Materials Characterization*, 142. – 2018. – Pp. 295–308. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matchar.2018.05.056>.
20. G. W. Bright. *Variability in the mechanical properties and processing conditions of a High Strength Low Alloy steel* / G. W. Bright, J. I. Kennedy, F. Robinson, M. Evans, M. T. Whittaker, J. Sullivan, Y. Gao // *Procedia Engineering*, 10. – 2011. – Pp. 106–111. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2011.04.020>.
21. TAN Wen. *Effects of TMCP Parameters on Microstructure and Mechanical Properties of Hot Rolled Economical Dual Phase Steel in CSP* / TAN Wen, HAN Bin, WANG Shui-ze, YANG Yi, ZHANG Chao, ZHANG Yong-kun // *Journal of Iron and Steel Research, International*. – 2012. – 19(6). – Pp. 37–41. – DOI: [https://doi.org/10.1016/S1006-706X\(12\)60124-1](https://doi.org/10.1016/S1006-706X(12)60124-1).
22. S. Tang. *Microstructural evolution and mechanical properties of high strength microalloyed steels: Ultra Fast Cooling (UFC) versus Accelerated Cooling (ACC)* / S. Tang, Z.Y. Liu, G.D. Wang, R.D.K. Misra // *Materials Science & Engineering A* 580. – 2013. – Pp. 257–265. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.msea.2013.05.016>.
23. *Sposib virobництва garjachekatanogo prokatu pidvishhenoi micnosti: pat. 110812 Ukraïna: MPK B21B 1/46 (2006.01). № u 2016 03353 ; zajava 31.03.2016 ; opubl. 25.10.2016, Bjul. № 20. – 4 s.*
24. *Sposib virobництва garjachekatanogo prokatu pidvishhenoi micnosti: pat 121374 Ukraïna: MPK B21B 1/46 (2006.01). – № u 2017 01785 ; zajava 24.02.2017 ; publ. 11.12.2017, Bjul. № 23. – 4 s.*
25. Maksimenko O. P. *Teoreticheskij analiz momenta pri prokatke s natjazheniem polosy* / O. P. Maksimenko, A. G. Prisjazhnyj, V. V. Kuhar', E. V. Kuz'min // *Obrabotka materialov davleniem : sb. nauch. tr. – Kramatorsk : DGMA, 2017. – № 1 (44). – S. 199–203.*
26. Kuhar' V. V. *Utochnenie metodiki rascheta teplovyh poter' metalla na nepreryvnyh stanah gorjachej prokatki* / V. V. Kuhar', A. G. Kurpe // *Obrabotka materialov davleniem : sb. nauch. tr. / DGMA. – Kra-matorsk : DGMA, 2018. – № 1 (46). – S. 159–166.*
27. Kurpe O. G. *Utochnennja rozrahunku teplovyh vtrat metalu na stanah Stekkelja* / O. G. Kurpe, V. V. Kuhar, E. V. Zmazneva // *Problemi tribologii = Problems of Tribology*. – 2018. – № 1. – S. 78–84.
28. Kuhar V. V. *Rozrobka tehnologii virobництва listovogo prokatu tovshhinoju 4 mm na stani 3200 zavodu Trametal SpA* / V. V. Kuhar, O. G. Kurpe // *Metallurgicheskaja i gornorudnaja promyshlennost'*. – 2018. – № 2. – S. 24–29.
29. Volodymyr Kukhar. *Experimental Research and Method for Calculation of 'Upsetting-with-Buckling' Load at the Impression-Free (Dieless) Preforming of Workpiece* / Volodymyr Kukhar, Viktor Artiukh, Andrii Prysiazhnyi, Andrey Pustovgar // *E3S Web of Conference (HRC 2017)*. – Vol. 33. 02031. – 2018. – <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20183302031>.
30. Rule Note NR 216 DT R09 E. *Rules on Materials and Welding for the Classification of Marine Units*. – Breau Veritas, January 2017. – P. 260.

Курпе О. Г. – канд. техн. наук, головний експерт ООО «МЕТІНВЕСТ ХОЛДІНГ».

ООО «МЕТІНВЕСТ ХОЛДІНГ» – міжнародна вертикально інтегрована гірничо-металургійна група компаній, м. Маріуполь.

E-mail: aleksandr.kurpe@gmail.com

Стаття надійшла до редакції 21.09.2018 р.