

Курпе О.Г.,***Кухар В.В.****

*МЕТІНВЕСТ ХОЛДІНГ,

**ДВНЗ «Приазовський державний

технічний університет»,

м. Маріуполь, Україна

E-mail: aleksandr.kurpe@gmail.com

**ОСВОЄННЯ ВИРОБНИЦТВА
ГАРЯЧЕКАТАНИХ РУЛОНІВ
ЗІ СТАЛІ МАРКИ S460MC НА
ШИРОКОСМУГОВОМУ СТАНІ 1700**

УДК 621.771.237

DOI:10.31891/2079-1372-2018-89-3-61-69

Розроблена технологія виробництва гарячекатаних рулонів зі сталі марки S460MC способом термомеханічної контрольованої прокатки (ТМСП) згідно до вимог стандарту EN 10149-2 в умовах стану 1700 ПрАТ «ММК ІМЕНІ ІЛЛІЧА». Виготовлена дослідна партія гарячекатаних рулонів розмірами $2,5 \times 1000$ мм зі сталі марки S460MC, виконано дослідження механічних властивостей. Вперше для умов стану 1700 розроблена комплексна технологія термомеханічної прокатки рулонів зі сталі марки S460MC згідно з вимогами стандарту EN 10149-2. В розробленій технології застосоване контрольоване повітряне охолодження рулонів до температури 450 °C, після змотування, що забезпечує зменшення товщини шару повітряної окалини та покращує якість поверхні, у тому числі для подальшої переробки. Технологія розроблена з використанням загальних вимог до виробництва прокату способом термомеханічної контрольованої прокатки з використанням математичної моделі технологічного процесу. Підтверджена можливість виробництва прокату зі сталі марки S460MC на існуючому устаткуванні стану 1700, без перевищення існуючих технічних обмежень при його експлуатації та без виконання модернізації. Визначена технічна можливість подальшого освоєння прокату, який виробляється по технології ТМСП.

Ключові слова: термомеханічна контрольована прокатка, гарячекатані рулони, сила прокатки, температурний режим, технологія, марка сталі S460MC

Вступ

Переваги способу виробництва прокату методом термомеханічної контрольованої прокатки (ТМСП) суттєво розширили межі його використання. Внаслідок цього, попит споживачів на продукцію, яка вироблена за цією технологією, постійно збільшується, що змушує вітчизняних виробників освоювати виробництво прокату за цією технологією. Клас міцності сортаменту, який може бути вироблений, має пряму залежність від характеристик та переліку існуючого устаткування у виробника. На цьому етапі дуже важливо виконати попередню технічну та технологічну оцінку існуючих можливостей. Важливим фактором для підвищення конкурентоспроможності металопродукції на європейських ринках є навіть вимоги до умов роботи на підприємствах виробників металопродукції [1]. Слід зазначити, що технологія термомеханічної прокатки була впроваджена набагато пізніше ніж збудовані вітчизняні стани для виробництва гарячекатаних рулонів. Тому технологія ТМСП не є проектною та потребує покрокового впровадження.

Аналіз останніх досліджень та публікацій

Розробка та подальше поширення технології термомеханічної контрольованої прокатки (ТМСП) у світі почалося з 60-х років минулого століття [2]. В нашій країні впровадження цієї технології почалося з виробництва товстолистового прокату на 10 років пізніше [3]. З того часу технологія ТМСП набула розвитку, суттєві зміни також відбулися і у відповідному устаткуванні [4, 5, 6]. 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 [4 - 19].

Процес ТМСП переважно був поширений для виробництва прокату з низьковуглецевих марок сталі [14, 15], але в останній час поширилось вивчення процесу з застосуванням сталей з вмістом вуглецю до 0,40 % [20]. Вивчення та впровадження сталей з вмістом вуглецю від 0,06 % та нижче отримало подальший розвиток з поглибленим дослідженням процесів зміцнення та отримання додаткових властивостей [9, 11, 16, 21, 22]. Дослідження впливу різноманітних швидкостей охолодження при реалізації процесу ТМСП на структуру та властивості прокату становлять окрему цікавість [12, 23] 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 [13, 16].

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 [7, 8].

Серед великої кількості наукових праць по впровадженню технології ТМСП, загальним питанням залишається комбінування цілей по рівню міцності сортаменту, який треба освоїти з технічними можливостями існуючого устаткування. Важливо врахувати оптимальне співвідношення між хімічним складом сталі, можливостями технології (устаткування) та отриманим рівнем характеристик міцності прокату та конкурентною собівартістю прокату.

Розробка технології термомеханічної контрольованої прокатки для виробництва гарячекатаних рулонів перерізом $2,5 \times 1000$ мм зі сталі марки S460MC для умов стану 1700 без здійснення модернізації є актуальним завданням, що дозволить забезпечити виробництво рулонів, які відповідають сучасним світовим вимогам та задовольняють потреби споживачів підприємства.

Мета роботи

Метою роботи є розробка технології виробництва гарячекатаних рулонів зі сталі марки S460MC згідно з вимогами EN 10149-2, розмірами $2,5 \times 1000$ мм, в умовах стану 1700 ПрАТ «ММК ІМЕНІ ІЛІЧА», без модернізації устаткування.

Викладення основного матеріалу

Існуюче устаткування стану 1700 на даний час складається з чотирьох методичних печей, три з яких штовхального типу були модернізовані з метою нагріву слябів розмірами до $250 \times 1550 \times 6200$ мм. Одна пічка виробництва фірми «Stein Heurtey», Франція, крокуючого типу з можливістю нагрівання слябів розмірами до $250 \times 1600 \times 10500$ мм. Сляб товщиною 250 мм застосовується для виробництва тільки в разі редукування на Слябінгу. Чорнова група клітей включає одну кліть «дуо» №01 (чорновий окаліноломатель) та 5 клітей «кварто» (1 - 4 та 4 а), чотири з яких є універсальними (2 - 4 та 4 а). Також встановлені теплозберігаючі екрани, летючі ножиці. Чистова група складається з 6 - х клітей «кварто» (5 - 10), установки прискореного охолодження, яка в свою чергу складається з 14 секцій та 3-х моталок, дві з яких можуть змотувати рулони вагою до 9 т, а одна, остання по ходу прокатки, може змотувати рулони вагою до 27 т. Слід зазначити, що на стані встановлено 7 гідрозмивів окалини з тиском в межах 80 - 140 атм.

Схема розміщення основного устаткування стану 1700 наведена на рис. 1.

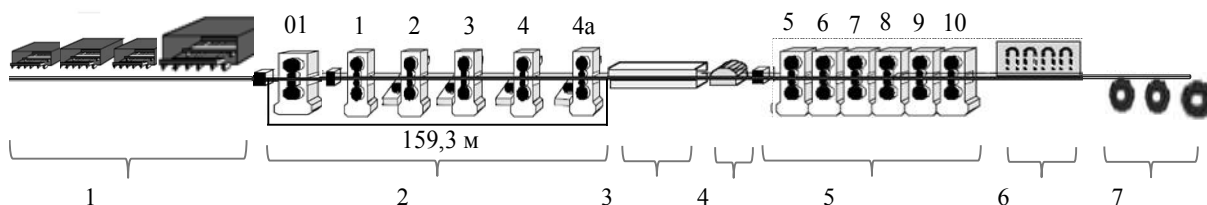


Рис. 1 – Існуюча схема розміщення основного устаткування стану 1700:

- 1 – ділянка методичних печей;
- 2 – чорнова група клітей;
- 3 – теплозберігаючі екрани;
- 4 – летючі ножиці;
- 5 – чистова група клітей;
- 6 – установка прискореного охолодження;
- 7 – моталки

Згідно з проектом та діючою технологією прокатний стан виробляє гарячекатані рулони вагою до 9 т, товщиною від 1,5 до 9 мм, шириною від 1000 до 1530 мм, в залежності від сортаменту, з марок від 08пс (відповідно до ГОСТ 1050) до 09Г2С (відповідно до ГОСТ 19281), S355 усіх категорій відповідно до EN 10025-2 та інший аналогічний сортамент, обмежений тимчасовим опором в холодному стані не більше ніж 590 МПа.

Відмінністю сортаменту, який виробляється по технології ТМСП, є низький рівень вуглецю та використання мікролегуючих елементів, завдяки яким при термомеханічній прокатці забезпечується необхідний рівень властивостей. В табл. 1 наведено вимоги до хімічного складу сталі марки S460MC, згідно з вимогами EN 10149-2.

Для виробництва дослідницької партії гарячекатаних рулонів зі сталі марки S460MC згідно з вимогами EN 10149-2, розмірами 2,5 × 1000 мм було розроблено хімічний склад та виготовлені сляби розмірами 150 × 1000 × 6200 мм, табл. 2.

Таблиця 1

Вимоги до хімічного складу сталі марки S460MC

Вимоги	Технологія	Марка сталі	Хімічний склад, %					
			C	Mn	Nb	V	Ti	Nb + V + Ti
EN 10149-2	TMCP	S460MC	≤ 0,12	≤ 1,60	≤ 0,09	≤ 0,20	≤ 0,15	≤ 0,22

Таблиця 2

Хімічний склад дослідної плавки марки S460MC

Плавка	Масова частка хімічних елементів, %											
	C	Mn	Si	S	P	Cr	Ni	Cu	V	Al	Ti	Nb
162955-3	0,10	1,38	0,03	0,009	0,021	0,020	0,01	0,01	0,002	0,052	0,016	0,025

Вказаний рівень вмісту Nb та Ti створено для забезпечення контролю розмірів зерна при аустенізації та прокатці, а також зміння властивостей за рахунок карбо-нітридного зміцнення.

На підставі хімічного складу, табл. 2, розраховано цільові термомеханічні показники процесу прокатки [2, 17, 24, 25], дотримання яких, надалі забезпечить необхідний комплекс механічних властивостей сталі марки S460MC згідно з EN 10149-2, табл. 3.

Таблиця 3

Термомеханічні показники процесу прокатки

Параметр	Одиниця виміру	Значення параметру
Температура нагрівання слябів	°C	1260 - 1280
Час нагрівання	Годин - хвилин	≤ 2 - 10
Температура прокатки після кліті 4a	°C	≥ 1040
Температура прокатки після кліті 10	°C	820 - 880
Температура змотування рулонів	°C	580 - 630
Кількість секцій які використовуються для прискореного охолодження	шт	8 - 14
Швидкість охолодження	°C/c	95 - 105

З метою перевірки технічної можливості виробництва, а також отримання технологічних параметрів, необхідних для здійснення термомеханічного процесу прокатки, попередньо було розраховано цільовий температурно - деформаційний режим, табл. 4 [26 - 30].

Згідно з виконаним розрахунком, встановлені експлуатаційні обмеження устаткування чорнової та чистої груп клітей не були перевищені. Таким чином, дослідна партія прокату може бути вироблена на наявному устаткуванні із застосуванням цього температурно - деформаційного режиму. Різниця між встановленими обмеженнями та розрахованими рівнями сили прокатки та потужності головних двигунів наведені на рис. 2, 3.

По розрахованих режимах була вироблена дослідницька партія гарячекатаних рулонів перерізом 2,5 × 1000 мм з марки сталі S460MC, плавка 162955-3, згідно з вимогами EN 10149-2 та EN 10051.

При передачі з чорнової до чистої групи клітей, з метою зниження температурних втрат відносно тонкого розкату (товщина розкату 22 мм), використовувались теплозберігаючі екрани, рис. 1. Після прокатки рулони були оброблені на установці прискореного охолодження. Фактичні термомеханічні параметри виробництва дослідницької партії наведені в табл. 5.

З метою зменшення товщини шару повітряної окалини змотані на моталках рулони були відправлені на додаткове контрольоване повітряне охолодження до температури 450 °C, яке здійснювали за допомогою промислових аераторів [31, 32]. Після цієї технологічної операції рулони були відправлені на склад для остаточного природнього охолодження.

Аналіз якості отриманих результатів виконувався на підставі комплексу механічних випробувань.

Проби для оцінки механічних властивостей від рулонів дослідницької партії було відібрано після остаточного охолодження. Результати механічних випробувань наведені в табл. 6.

Таблиця 4

**Температурно - деформаційний режим
прокатки рулонів з марки сталі S460MC
розмірами 2,5 × 1000 мм на стані 1700**

№ кліті	Показчики					
	товщина*, мм	температура, °C	розрахована сила прокатки, МНх100	максимально допустима сила прокатки, МНх100	швидкість прокатки, м/с	потужність двигуна, кВт
0**	150	-	-	-	-	-
01	130	1260	446,0	800	0,85	847,2
1	95	1237	845,9	2500	1,26	2817,1
2	58	1216	1070,2	2500	1,36	3967,2
3	41	1177	768,0	2000	1,78	2772,6
4	30	1124	750,1	2000	1,78	2196,4
4a	22	1048	918,5	2000	2,89	3754,2
5	15	952	1153,6	2400	2,21	3899,0
6	9,5	938	1248,6	2400	3,23	5508,6
7	6	927	1210,9	2000	4,98	6519,3
8	4	917	1046,0	1800	7,30	6394,7
9	3	903	783,1	1700	9,79	4735,4
10	2,5	880	561,7	1500	11,75	3049,4

Примітка: * товщина після проходу; ** початкові дані.

Таблиця 5

**Фактичні термомеханічні
показчики процесу прокатки**

Параметр	Одиниця виміру	Значення параметру
Температура нагрівання слябів	°C	1260
Час нагрівання	Годин - хвилин	2 - 35
Температура прокатки після кліті 4 а	°C	1052 - 1078
Температура прокатки після кліті 10	°C	872 - 875
Температура змотування рулонів	°C	600 - 605
Кількість секцій для прискороного охолодження	шт	13
Швидкість охолодження	°C/с	114

Таблиця 6

**Результати механічних випробувань
дослідницької партії рулонів**

№ плавки	№ рулону	Механічні властивості			
		межа плинності, МПа	тимчасовий опір, МПа	відносне подовження, %	вигін по оправці
162955-3	1	465	540	25	Без розтріскування
	2	495	550	28	Без розтріскування
	3	495	550	28	Без розтріскування
Вимоги EN10149-2 S460MC		≥ 460	520 - 670	17	Без розтріскування

Отримані результати механічних випробувань повністю відповідають вимогам EN10149-2 до сталі марки S460MC. При цьому, отримані результати випробувань знаходяться ближче до нижнього рівню вимог стандарту EN10149-2. Для забезпечення стабільних результатів механічних властивостей прокатку необхідно продовжити вдосконалення технології.

З урахуванням фактичних параметрів охолодження прокатки (використано 13 з 14 секцій), та отриманих термомеханічних показників (температура змотування не опускалася нижче 600 °C) можна

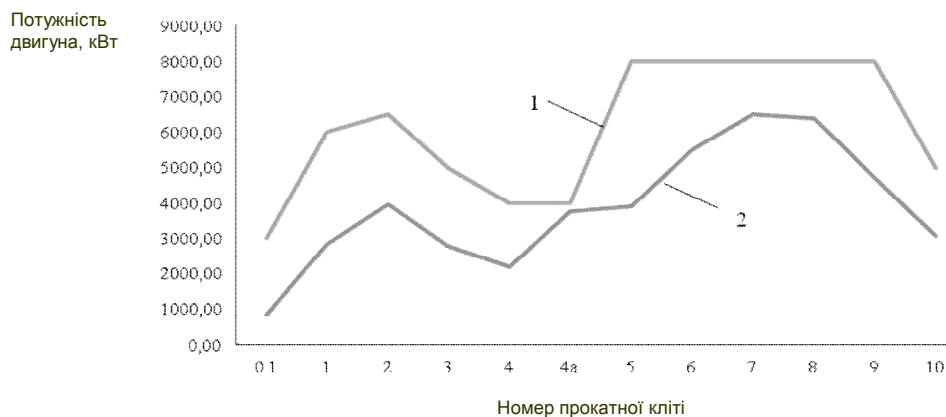


Рис. 2 – Порівняння встановленої (1) та розрахованої (2) потужності двигунів по клітях

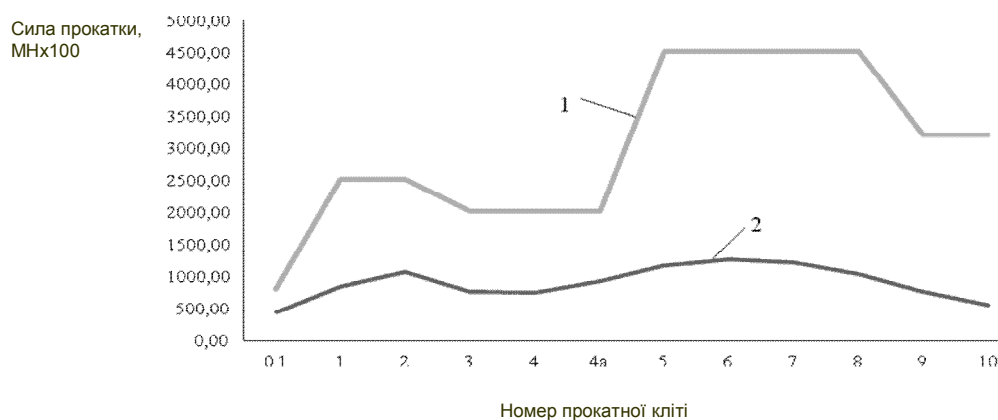


Рис. 3 – Порівняння встановленої (1) та розрахованої (2) сили прокатки по клітях

зробити висновок про наближення до верхньої межі у категорії міцності прокату, який може бути освоєний способом термомеханічної прокатки на наявному устаткуванні, при використанні аналогічного хімічного складу. Подальше освоєння виробництва більш міцного сортаменту можливо здійснювати за допомогою підвищення складу мікролегуючих елементів в сталі.

Висновки

1. Вперше для умов стану 1700 ПрАТ «ММК Імєні Ілліча» розроблена технологія термомеханічної контрольованої прокатки рулонів перерізом $2,5 \times 1000$ мм зі сталі марки S460MC згідно з вимогами EN 10149-2.
2. Вперше в умовах стану 1700 ПрАТ «ММК Імєні Ілліча» вироблена дослідницька партія прокату з сталі марки S460MC, яка повністю відповідає вимогам європейського стандарту EN 10149-2.
3. Визначено наближення до верхньої межі у категорії міцності прокату, який може бути освоєний способом термомеханічної прокатки на наявному устаткуванні без змінєння хімічного складу.
4. Встановлена можливість подальшого освоєння прокату більш міцних категорій (вище за S460MC) за рахунок підвищення складу мікролегуючих елементів в сталі.

Література

1. Volodymyr Kukhar. Estimation of Occupation Safety Risks at Energetic Sector of Iron and Steel Works / Nelly Yelistratova, Vadym Burko, Yulia Nizhelska, Olga Aksionova // International Journal of Engineering & Technology (UAE), – 2018. – Vol. 7 (2.23). – pp. 216–220. DOI: <https://doi.org/10.14419/ijet.v7i2.23.11922>.

2. 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>.
3. 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>.
4. 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.
5. 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).
6. Kukhar Volodymyr. 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>.
7. Yunbo Xu. Modeling of microstructure evolution and mechanical properties during hot-strip rolling of Nb steels / Yunbo Xu, Yongmei Yu, Xianghua Liu, 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).
8. Korczak P. Investigation of microstructure prediction during experimental thermo-mechanical plate rolling / P. Korczak, H. Dya // Journal of Materials Processing Technology. – 109. – 2001. – pp. 112–119. PII: S 0924-0136(00)00784-6.
9. Xiangwei Kong. Optimization of mechanical properties of low carbon bainitic steel using TMCP and accelerated cooling / Xiangwei Kong, Liangyun Lan // 11th International Conference on Technology of Plasticity. ICTP. – 2014. – pp. 19–24. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2014.09.136>.
10. 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>.
11. 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>.
12. Zhao J. 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>.
13. Zhao J. 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>.
14. 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).
15. 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).
16. Gervasyev Alexey. An approach to microstructure quantification in terms of impact properties of HSLA pipeline steels / Alexey Gervasyev, Victor Carretero Olalla, Jurij Sidor, Nuria Sanchez Mourifo, 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>.
17. Багмет О.А. Формирование оптимальных структур и свойств при проведении контролируемой прокатки трубных сталей, содержащих ниобий // Автореферат дис. М. «Графикс В». – 2007. – 23 С.
18. Пат. 98214 Україна, МПК В21С 37/08, В21В 1/32, С22С 38/00, С21D 8/02, С21D 8/10, В23К 9/025. Спосіб виробництва сталевих високоміцних електрозварних одношовних труб великого діаметра для магістральних трубопроводів / Лівшиц Д.А., Зінченко Ю.А., Шахпазов Є.Х., Матросов Ю.І., Ганошенко І.В., Гоман С.В., Шалімов С.Я., Кумуржи Є.В., Володарський В.В., Лоскутов О.Ю., Койфман О.А., Курпе О.Г.; власник ПУБЛІЧНЕ АКЦІОНЕРНЕ ТОВАРИСТВО "МЕТАЛУРГІЙНИЙ КОМБІНАТ "АЗОВСТАЛЬ", ПУБЛІЧНЕ АКЦІОНЕРНЕ ТОВАРИСТВО "ХАРЦИЗЬКИЙ ТРУБНИЙ ЗАВОД". – № а 2010 11473; заява 27.09.2010; публ. 25.04.2012, Бюл.№ 8. 7 с.

19. Пат. 96097 Україна, МПК B21C 37/08, C22C 38/00, C21D 1/00, B21B 1/22, B23K 9/00. Спосіб виробництва сталевих високоміцних електрозварних двошовних труб великого діаметра для магістральних трубопроводів / Лівшиц Д.А., Зінченко Ю.А., Шахпазов С.Х., Матросов Ю.І., Ганошенко І.В., Гоман С.В., Шалімов С.Я., Кумуржи С.В., Володарський В.В., Лоскутов О.Ю., Койфман О.А., Курпе О.Г.; власник ПУБЛІЧНЕ АКЦІОНЕРНЕ ТОВАРИСТВО "МЕТАЛУРГІЙНИЙ КОМБІНАТ "АЗОВСТАЛЬ", ПУБЛІЧНЕ АКЦІОНЕРНЕ ТОВАРИСТВО "ХАРЦИЗЬКИЙ ТРУБНИЙ ЗАВОД". – № а201011469; зава 27.09.2010; публ. 26.09.2011, Бюл. № 18. 5 с.
20. 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>.
21. Bright G. W. 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>.
22. 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).
23. Tang S. 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>.
24. Пат. 110812 Україна, МПК B21B 1/46. Спосіб виробництва гарячекатаного прокату підвищеної міцності / Зінченко Ю.А., Пісмарьов К.Є., Курпе О.Г., Мурашкін О. В., Васильченко С.Є., Меркулова Н.О., Чаленко О.Г., Нерій С.Д., Куліш С.В.; власник ПРИВАТНЕ АКЦІОНЕРНЕ ТОВАРИСТВО "МАРИУПОЛЬСЬКИЙ МЕТАЛУРГІЙНИЙ КОМБІНАТ ІМ. ІЛЛІЧА". – № у 2016 03353; заява 31.03.2016; публ. 25.10.2016, Бюл.№ 20. 4 с.
25. Пат. 121374 Україна, МПК B21B 1/46. Спосіб виробництва гарячекатаного прокату підвищеної міцності / Зінченко Ю.А., Пісмарьов К.Є., Курпе О.Г., Васильченко С.Є., Меркулова Н.О., Чаленко О.Г., Нерій С.Д., Куліш С.В.; власник ПРИВАТНЕ АКЦІОНЕРНЕ ТОВАРИСТВО "МАРИУПОЛЬСЬКИЙ МЕТАЛУРГІЙНИЙ КОМБІНАТ ІМ. ІЛЛІЧА". – № у 2017 01785; заява 24.02.2017; публ. 11.12.2017, Бюл.№ 23. 4 с.
26. 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. / ДГМА. – Краматорск : ДГМА, 2017. – № 1 (44). – С. 199–203.*
27. 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.*
28. Курпе О. Г. Уточнення розрахунку теплових втрат металу на станах Стеккеля / О. Г. Курпе, В. В. Кухар, Є. В. Змазнева // *Проблеми трибології = Problems of Tribology*. – 2018. – № 1. – С. 78–84.
29. Кухар В. В., Курпе О. Г. Розробка технології виробництва листового прокату товщиною 4 мм на стані 3200 заводу Trameal SpA // *Металургическая и горнорудная промышленность*. – 2018. – N2. – С. 24-29.
30. Kukhar Volodymyr. 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 and Andrey Pustovgar // *E3S Web of Conference (HRC 2017)*. – Vol. 33, 02031. – 2018. DOI: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20183302031>.
31. Jiang Z.Y. Analysis of tribological feature of the oxide scale in hot strip rolling / Z.Y. Jiang, J. Tang, W. Sun, A.K. Tieu, D. Wei // *Tribology International*. – 43. – 2010. – pp. 1339–1345. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2009.12.070>.
32. Jae-min Lee. Spallation analysis of oxide scale on low carbon steel / Jae-min Lee, Wooram Noh, Deuk-Jung Kim, Myoung-Gyu Lee // *Materials Science & Engineering A* 676. – 2016. – pp. 385–394. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.msea.2016.09.012>.

Надійшла в редакцію 08.10.2018

Kurpe O.G., Kukhar V.V. **Process development for production of hot rolling coils of steel grade S460MC at wide-strip rolling mill "1700"**.

Process development for production of hot-rolled coils of steel grade S460MC by means of thermomechanical controlled rolling (TMCP) in accordance with EN 10149-2 at the rolling mill 1700 PJSC "ILYICH IRON AND STEEL WORKS" has been made. The pilot lot of hot-rolled coils of S460MC steel grade with dimensions $2,5 \times 1000$ mm has been produced and the research of the mechanical properties has been completed. For the first time, the integrated technology for coils thermomechanical rolling of steel grade S460MC in accordance with EN 10149-2 has been developed for rolling at 1700 rolling mill. The controlled air-cooling of coils up to 450 °C after coiling has been implemented in the developed technology. This allows the reduction of air scale layer thickness and improves the surface quality including that for the further processing. The technology has been developed with implementation of the general requirements for the rolled products production by means of thermomechanical controlled rolling by applying the mathematical model of the technological process. The manufacturing possibility of rolled products of steel grade S460MC has been proved utilizing the existing 1700 rolling mill facilities, with no exceeding of the designed capability when utilizing the equipment and without any modernization procedures involved.

Key words: thermomechanical controlled rolling, hot-rolled coils, rolling force, temperature conditions, technology, steel grade S460MC.

References

1. Volodymyr Kukhar. Estimation of Occupation Safety Risks at Energetic Sector of Iron and Steel Works. Nelly Yelistratova, Vadym Burko, Yulia Nizhelska, Olga Aksionova. *International Journal of Engineering & Technology (UAE)*, 2018. Vol. 7 (2.23). pp. 216–220. DOI: <https://doi.org/10.14419/ijet.v7i2.23.11922>.
2. Militzer M. Thermomechanical Processed Steels Reference Module in Materials Science and Materials Engineering Comprehensive, Materials Processing. Vol. 1. 2014. pp. 191–216.
3. 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.
4. 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.
5. 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.
6. Kukhar Volodymyr. Designing of induction heaters for the edges of pre-rolled wide ultrafine sheets and strips correlated with the chilling end-effect. Volodymyr Kukhar, Andrii Prysiazhnyi, 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.
7. Yunbo Xu. Modeling of microstructure evolution and mechanical properties during hot-strip rolling of Nb steels. Yunbo Xu, Yongmei Yu, Xianghua Liu, 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).
8. 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.
9. Xiangwei Kong. Optimization of mechanical properties of low carbon bainitic steel using TMCP and accelerated cooling. Xiangwei Kong, Liangyun Lan. 11th International Conference on Technology of Plasticity. ICTP. 2014. pp. 19–24. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2014.09.136>.
10. 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>.
11. 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>.
12. Zhao J. 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.
13. Zhao J. 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>.
14. 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).
15. 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).

16. Gervasyev Alexey. An approach to microstructure quantification in terms of impact properties of HSLA pipeline steels. Alexey Gervasyev, Victor Carretero Olalla, Jurij Sidor, Nuria Sanchez Mouriño, Leo A.I. Kestens, Roumen H. Petrov. *Materials Science & Engineering A* 677. 2016. pp. 163–170.
17. Bagmet O.A. Formirovanie optimal'nyh struktur i svojstv pri provedenii kontroliruemoy prokatki trubnyh stalej, sodержashhiih niobij. Avtoreferat dis. M. «Grafiks V». 2007. 23 S.
18. Pat. 98214 Ukraїna, MPK B21C 37/08, B21B 1/32, C22C 38/00, C21D 8/02, C21D 8/10, B23K 9/025. Sposib vyrobnyctva stalevyh vysokomicnyh elektrozvarnyh odnoshovnyh trub velykogo diametra dlja magistral'nyh truboprovodiv. Livshyc D.A., Zinchenko Ju.A., Shahpazov Je.H., Matrosov Ju.I., Ganoshenko I.V., Goman S.V., Shalimov S.Ja., Kumurzhy Je.V., Volodars'kyj V.V., Loskutov O.Ju., Kojfman O.A., Kurpe O.G.; vlasnyk PUBLICHNE AKCIONERNE TOVARYSTVO "METALURGIJNYJ KOMBINAT "AZOVSTAL"", PUBLICHNE AKCIONERNE TOVARYSTVO "HARCYZ"KYJ TRUBNYJ ZAVOD". № a 2010 11473; zajava 27.09.2010; publ. 25.04.2012, Bjul.№ 8. 7 s.
19. Pat. 96097 Ukraїna, MPK B21C 37/08, C22C 38/00, C21D 1/00, B21B 1/22, B23K 9/00. Sposib vyrobnyctva stalevyh vysokomicnyh elektrozvarnyh dvoshovnyh trub velykogo diametra dlja magistral'nyh truboprovodiv. Livshyc D.A., Zinchenko Ju.A., Shahpazov Je.H., Matrosov Ju.I., Ganoshenko I.V., Goman S.V., Shalimov S.Ja., Kumurzhy Je.V., Volodars'kyj V.V., Loskutov O.Ju., Kojfman O.A., Kurpe O.G.; vlasnyk PUBLICHNE AKCIONERNE TOVARYSTVO "METALURGIJNYJ KOMBINAT "AZOVSTAL"", PUBLICHNE AKCIONERNE TOVARYSTVO "HARCYZ"KYJ TRUBNYJ ZAVOD". № a201011469; zava 27.09.2010; publ. 26.09.2011, Bjul. № 18. 5 s.
20. 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.
21. Bright G. W. 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>.
22. 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.
23. Tang S. 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>.
24. Pat. 110812 Ukraїna, MPK B21B 1/46. Sposib vyrobnyctva garjachekatanogo prokatu pidvyshhenoi' micnosti. Zinchenko Ju.A., Pismar'ov K.Je., Kurpe O.G., Murashkin O. V., Vasy'l'chenko S.Je., Merkulova N.O., Chalenko O.G., Negrij S.D., Kulish S.V.; vlasnyk PRYVATNE AKCIONERNE TOVARYSTVO "MARIUPOL"S"KYJ METALURGIJNYJ KOMBINAT IM. ILLICHa". № u 2016 03353; zajava 31.03.2016; publ. 25.10.2016, Bjul.№ 20. 4 s.
25. Pat. 121374 Ukraїna, MPK B21B 1/46. Sposib vyrobnyctva garjachekatanogo prokatu pidvyshhenoi' micnosti. Zinchenko Ju.A., Pismar'ov K.Je., Kurpe O.G., Vasy'l'chenko S.Je., Merkulova N.O., Chalenko O.G., Negrij S.D., Kulish S.V.; vlasnyk PRYVATNE AKCIONERNE TOVARYSTVO "MARIUPOL"S"KYJ METALURGIJNYJ KOMBINAT IM. ILLICHa". № u 2017 01785; zajava 24.02.2017; publ. 11.12.2017, Bjul.№ 23. 4 s.0
26. Maksymenko O. P. Teoretycheskyj analiz momenta pry prokatke s natjazhenyem polos. O. P. Maksymenko, A. G. Prysyzhnyj, V. V. Kuhar', E. V. Kuz'myn. *Obrabotka materyalov davlenyem : sb. nauch. tr. DGMA. – Kramatorsk. DGMA, 2017. № 1 (44). S. 199–203.*
27. Kuhar' V. V. Utochnenye metodyky rascheta teplovh poter' metalla na neprerывnyh stanah gorjachej prokatky. V. V. Kuhar', A. G. Kurpe. *Obrabotka materyalov davlenyem sb. nauch. tr. DGMA. Kramatorsk DGMA, 2018. № 1 (46). S. 159–166.*
28. Kurpe O. G. Utochnennja rozrahunku teplovyh vtrat metalu na stanah Stekkelja. O. G. Kurpe, V. V. Kuhar, Je. V. Zmaznjeva. *Problemy trybologii' Problems of Tribology*. 2018. № 1. S. 78–84.
29. Kuhar V. V., Kurpe O. G. Rozrobka tehnologii' vyrobnyctva lystovogo prokatu tovshhynuju 4 mm na stani 3200 zavodu Trametal SpA. *Metallurgycheskaja y gornorudnaja promyshlennost'*. 2018. N2. C. 24–29.
30. Kukhar Volodymyr. 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 and Andrey Pustovgar. *E3S Web of Conference (HRC 2017)*. Vol. 33, 02031. 2018.
31. Jiang Z.Y. Analysis of tribological feature of the oxide scale in hot strip rolling. Z.Y. Jiang, J. Tang, W. Sun, A.K. Tieu, D. Wei. *Tribology International*. 43. 2010. pp. 1339–1345.
32. Jae-min Lee. Spallation analysis of oxide scale on low carbon steel. Jae-min Lee, Wooram Noh, Deuk-Jung Kim, Myoung-Gyu Lee. *Materials Science & Engineering A* 676. 2016. pp. 385–394.