

**ОСВОЄННЯ ВИРОБНИЦТВА ГАРЯЧЕКАТАНИХ РУЛОНІВ ЗІ СТАЛІ МАРКИ Х52М
ДЛЯ ПОДАЛЬШОГО ВИРОБНИЦТВА ТРУБ ЗГІДНО З ВИМОГАМИ API-5L,
НА СТАНІ 1700 ПрАТ «ММК ІМЕНІ ІЛЛІЧА»**

О. Г. Курпе

ТОВ «МЕТІНВЕСТ ХОЛДІНГ»

просп. Нахімова, 116-А, м. Маріуполь, 87534, Україна. E-mail: aleksandr.kurpe@gmail.com

В. В. Кухар

ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет»

вул. Університетська, 7, м. Маріуполь, 87555, Україна. E-mail: kvv.mariupol@gmail.com

О. М. Шебаніц

ПАТ «ММК «ІМЕНІ ІЛЬИЧА», ТОВ «МЕТІНВЕСТ ХОЛДІНГ»

вул. Левченко, 1, м. Маріуполь, 87504, Україна. E-mail: oksana.shebanitc@metinvestholding.com

В умовах стану 1700 ПрАТ «ММК ІМЕНІ ІЛЛІЧА» вперше розроблено технологію та виготовлено способом термомеханічної контрольованої прокатки партію гарячекатаних рулонів розмірами 8x1260 мм зі сталі марки Х52М для подальшого виробництва електрозварних труб по стандарту API-5L. Технологія розроблена з використанням загальних вимог до виробництва прокату способом термомеханічної контрольованої прокатки з використанням математичної моделі технологічного процесу прокатки. При виробництві додатково застосовано контрольоване повітряне охолодження рулонів до температури 450 °С після змотування, що забезпечує зменшення товщини шару повітряної окалини та покращує якість поверхні, у тому числі при подальшому виготовленні електрозварних труб. Розроблена технологія дозволяє забезпечити виробництво рулонів, які відповідають сучасним світовим вимогам та задовольняють потреби вітчизняних та закордонних виробників електрозварних труб. Визначено наступні кроки досліджень з метою покращення якості та подальшого освоєння прокату для виробництва електрозварних труб по стандарту API-5L.

Ключові слова: термомеханічна контрольована прокатка, гарячекатані рулони, стандарт API-5L, сталь марки Х52М, технологія.

**ОСВОЕНИЕ ПРОИЗВОДСТВА ГОРЯЧЕКАТАНЫХ РУЛОНОВ ИЗ СТАЛИ МАРКИ Х52М
ДЛЯ ДАЛЬНЕЙШЕГО ПРОИЗВОДСТВА ТРУБ В СООТВЕТСТВИИ ТРЕБОВАНИЯМ API-5L,
НА СТАНЕ 1700 ЧАО «ММК ИМЕНИ ИЛЬИЧА»**

А. Г. Курпе

ООО «МЕТІНВЕСТ ХОЛДІНГ»

просп. Нахімова, 116-А, г. Маріуполь, 87534, Україна. E-mail: aleksandr.kurpe@gmail.com

В. В. Кухарь

ГВУЗ «Приазовский государственный технический университет»

ул. Университетская, 7, г. Маріуполь, 87555, Україна. E-mail: kvv.mariupol@gmail.com

О. Н. Шебаніц

ЧАО «ММК «ІМЕНІ ІЛЬИЧА», ООО «МЕТІНВЕСТ ХОЛДІНГ»

ул. Левченко, 1, г. Маріуполь, 87504, Україна. E-mail: oksana.shebanitc@metinvestholding.com

В условиях стана 1700 ЧАО «ММК ИМЕНИ ИЛЬИЧА» впервые разработана технология и изготовлена, способом термомеханической контролируемой прокатки, партия горячекатаных рулонов размерами 8x1260 мм из стали марки Х52М для дальнейшего производства электросварных труб по стандарту API-5L. Технология разработана с использованием общих требований к производству проката способом термомеханической контролируемой прокатки с использованием математической модели технологического процесса прокатки. При производстве дополнительно применено контролируемое воздушное охлаждение рулонов до температуры 450°С, после сматывания, что обеспечивает уменьшение толщины слоя воздушной окалины и улучшает качество поверхности, в том числе при дальнейшем изготовлении электросварных труб. Разработанная технология позволяет обеспечить производство рулонов, которые соответствуют современным мировым требованиям и удовлетворяют потребности отечественных и зарубежных производителей электросварных труб. Определены дальнейшие шаги исследований с целью улучшения качества и освоения проката для производства электросварных труб по стандарту API-5L.

Ключевые слова: термомеханическая контролируемая прокатка, горячекатаные рулоны, стандарт API-5L, сталь марки Х52М, технология.

АКТУАЛЬНІСТЬ РОБОТИ. Надвеликі ресурси витрачаються на видобуток вуглеводнів та їх транспортування. Це є великий сегмент світової економіки. Будівництво нафто- та газотранспортних систем становить значну частину загальних витрат. Ціла низка інститутів задіяна в процесах зниження металоемності транспортних систем, починаючи з їх проектування, забезпечення зварними трубами і

закінчуючи вивченням можливостей металургійних виробників забезпечити встановлені вимоги. Це безумовно є надважливим комплексним питанням.

Природне прагнення розробників проектів до зниження металоемності проектів призвело до всебічного поглибленого вивчення проблем, пов'язаних з цим. Всебічний розвиток отримало вивчення впливу різноманітних мікролегуючих елементів в сталі

(таких як Ti, Nb, V, Mo, останнім часом Cr, Cu, B) на властивості прокату та труб, також вплив різноманітних технологій прокатки (починаючи з термообробки нормалізацією і надалі нормалізуюча прокатка, контрольована прокатка, термомеханічна контрольована прокатка з прискореним охолодженням), що задіяло цілу низку наукових інститутів, металургійних виробництв та підприємств по видобутку та збагаченню руд, які містять перераховані мікролегуєчі елементи.

На сьогодні продукт у вигляді рулонів та товстого листа, який використовується для подальшого виробництва електрозварних труб, є мабуть найбільш наукоємним, а здобути на їх підставі технології дають розвиток для впровадження нових та вдосконалення існуючих технологій та продукції іншого призначення (як, наприклад, будівництва, машинобудування, суднобудування).

Розвиток технології виробництва прокату з мікролегованих марок сталі для подальшого виготовлення електрозварних труб у світі почався в 70-х роках минулого століття. Йому передували дослідження впливу мікролегованих елементів, які почалися на 30 років раніше. Але в ті роки стан та рівень існуючого обладнання не дозволяли отримати бажаного ефекту, тому більшість розроблених марок сталі так і залишилась не дослідженою [1, 2]. З розвитком устаткування промислове впровадження прогресивних технологій стало можливим.

Сучасний рівень устаткування та технології, завдяки застосуванню комплексу мікролегуєчих елементів, дозволяє отримувати різноманітні комплекси механічних властивостей [3–12].

Зростання світових потреб по збільшенню об'ємів транспортування вуглеводню спровокували появу відповідних технічних вимоги, які змушували виробників поспішно засвоювати виробництво прокату з більш високими рівнями властивостей [13–15]. Існуюча класифікація американського інституту нафти API, в залежності від вимог, пропонує наступний перелік марок сталі: від B, X42 до X120, які поширено застосовуються для виробництва труб. Також відомі і поширені аналоги, наприклад, по стандартам ISO.

Сучасні дослідження авторів у більшості спрямовані на поглиблене вивчення та поширене впровадження таких марок сталі як X70, X80, X100, X120 [14–22].

Але потреба в менш міцних марках також залишається. Ці марки потрібні для виконання ремонтів газо- та нафтотранспортних об'єктів, які були побудовані раніше, будування невеликих ділянок для транспортування відносно малих об'ємів продуктів. Тому і на сьогодні питання виробництва марок сталі з рівнем властивостей нижче за X70 є актуальним.

Розробка технології термомеханічної контрольованої прокатки для виробництва гарячекатаних рулонів перерізом 8x1260 мм зі сталі марки X52M для подальшого виробництва електрозварних труб по стандарту API-5L для умов стану 1700 є актуальним завданням, що дозволить забезпечити виробництво рулонів, які відповідають сучасним світовим вимогам та задовольняють потреби вітчизняних та закордонних виробників електрозварних труб.

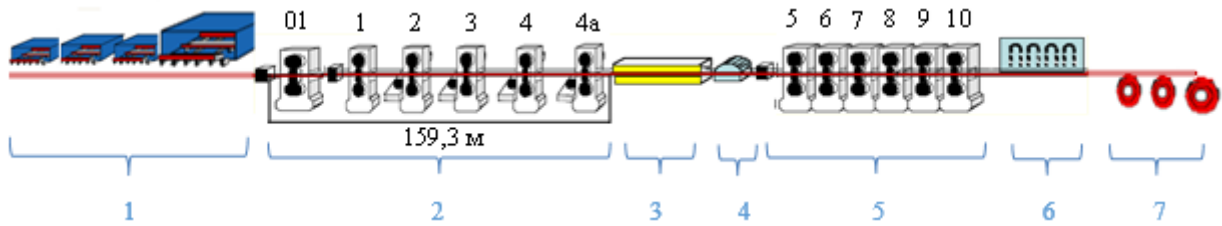
Метою роботи є розробка технології виробництва гарячекатаних рулонів зі сталі марки X52M для подальшого виробництва електрозварних труб згідно зі стандартом API-5L, розмірами 8x1260 мм в умовах стану 1700 ПрАТ «ММК ІМЕНІ ІЛЛІЧА».

МАТЕРІАЛ І РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ. 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 250x1550x6200 мм. Одна пічка виробництва фірми «Stein Heurtey», Франція, крокуючого типу з можливістю нагрівання слябів розмірами до 250x1600x10500 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 4а), чотири з яких є універсальними (2-4 та 4а). 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 гідрозбівів окалини з тиском в межах 80-140 атм.

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

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.

Вимоги до хімічного складу згідно зі стандартом API-5L, здебільшого, лімітують тільки верхню межу вмісту хімічних елементів та дають широке поле діяльності виробникам у забезпеченні необхідного рівня властивостей, та поділяють на два рівні: базовий – PSL-1 та з додатковими вимогами – PSL-2, табл. 1.



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

Рисунок 1 – Існуюча схема розміщення основного устаткування стану 1700

Таблиця 1 – Вимоги до хімічного складу сталі марки В згідно зі стандартом API-5L

Вимоги	Марка сталі	Хімічний склад, %						
		C	Si	Mn	P	S	Nb+V+Ti	CE P _{cm}
API-5L PSL-1	X52	≤0,28	-	≤1,40	≤0,030	≤0,030	≤0,15	-
API-5L PSL-2	X52M	≤0,22	≤0,45	≤1,40	≤0,025	≤0,015	≤0,15	≤0,25

Додаткові вимоги PSL-1: Cu ≤ 0,50 %; Ni ≤ 0,50 %; Cr ≤ 0,50 %; Mo ≤ 0,15 %.
 Додаткові вимоги PSL-2: Cu ≤ 0,50%; Ni ≤ 0,30%; Cr ≤ 0,30%; Mo ≤ 0,15 %
 Вуглецевий еквівалент розраховується по формулі: $CE P_{cm} = C + \frac{Si}{30} + \frac{Mn}{20} + \frac{Cu}{20} + \frac{Ni}{60} + \frac{Cr}{20} + \frac{Mo}{15} + \frac{V}{10} + 5B$
 Формула застосовується при вмісті вуглецю ≤0,12%.

Також згідно з вимогами PSL-1 API-5L марка В може вироблятися у будь-який наступний спосіб: гаряча прокатка, прокатка з нормалізацією, термо-механічна прокатка. Згідно з вимогами PSL-2 API-5L марка ВМ може вироблятися тільки способом термомеханічної прокатки. В вимогах також зазначені способи поставки після різноманітних способів термічної обробки, але в даній роботі ми їх не розглядаємо.

Для виробництва дослідної партії гарячекатаних рулонів зі сталі марки X52M, розмірами 8x1260 мм було розроблено два варіанти хімічного складу та виготовлено дві різноманітні плавки, табл. 2. Слід зазначити, що при освоєнні даного сортаменту у

якості вимог до прокату застосовувались базові вимоги API-5L, додаткові вимоги з урахуванням трубного переділу замовником не виставлялися.

У якості мікролегуючих елементів використано Nb з різним вмістом по плавках та Ti. Розроблений хімічний склад відповідає вимогам PSL-1 та PSL-2 та може бути застосований до марки сталі X52 та X52M.

На підставі хімічного складу обох плавок, табл. 2, розраховано цільові термомеханічні показники процесу прокатки [2] з метою забезпечення необхідного комплексу механічних властивостей готового прокату зі сталі марки X52 та оцінки впливу різного рівня мікролегуючих елементів, табл. 3.

Таблиця 2 – Хімічний склад плавки марки X52

Плавка	Масова частка хімічних елементів, %													
	C	Mn	Si	S	P	Cr	Ni	Cu	V	Mo	Nb	Ti	Al	CE
254077-2	0,10	1,40	0,21	0,009	0,020	0,03	0,02	0,02	0,003	0,004	0,040	0,017	0,032	0,18
164022-3	0,12	1,36	0,03	0,009	0,019	0,02	0,01	0,01	0,003	0,002	0,026	0,019	0,043	0,19

Таблиця 3 – Термомеханічні показники процесу прокатки

Параметр	Одиниця виміру	Значення параметру
Температура прокатки після кліті 10	°C	820-880
Температура змотування рулонів	°C	580-630
Кількість секцій, які використовуються для прискореного охолодження	шт	10-14
Швидкість охолодження	°C/c	45-55

З метою перевірки технічної можливості виробництва, а також отримання технологічних параметрів, необхідних для здійснення термомеханічного процесу прокатки, попередньо, для двох плавок було розраховано цільовий температурно-деформаційний режим, табл. 4, 5 [23–27].

Слід зазначити, що плавка 164022-3 була розлита у сляби розмірами 150x1620x6200 мм, плавка 254077-2 була розлита у сляби 250x1550x6200, які після редукування до розмірів 150x1260x5800 (з одного сляба 250x1550x6200 мм після редукування отримано два сляба з вказаними розмірами) було використано для подальшої прокатки.

Таблиця 4 – Температурно-деформаційний режим прокатки рулонів плавки 254077-2, марки сталі X52 розмірами 8x1260 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	551,4	800	0,85	1047,3
1	95	1238	1036,6	2500	1,26	3452,1
2	58	1215	1315,0	2500	1,36	4874,9
3	41	1177	936,1	2000	1,78	3380,0
4	30	1131	891,0	2000	1,78	2608,9
4a	24	1056	856,4	2000	2,89	3054,5
5	19	934	1097,8	2400	2,21	3169,7
6	14	918	1340,0	2400	3,06	5357,0
7	11	906	1115,7	2000	3,92	4397,5
8	9,5	891	764,6	1800	4,63	2608,1
9	8,5	871	646,3	1700	5,16	2060,6
10	8	850	429,5	1500	5,70	1130,5

* товщина після проходу

** початкові дані

Таблиця 5 – Температурно-деформаційний режим прокатки рулонів плавки 164022-3, марки сталі X52 розмірами 8x1260 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	561,7	800	0,85	1067,0
1	95	1237	1061,7	2500	1,26	3535,6
2	58	1213	1352,4	2500	1,36	5013,3
3	41	1174	969,9	2000	1,78	3501,6
4	30	1127	926,7	2000	1,78	2713,6
4a	24	1050	900,9	2000	2,89	3213,2
5	19	934	1125,7	2400	2,21	3250,3
6	14	918	1377,7	2400	3,06	5508,1
7	11	907	1145,5	2000	3,92	4515,1
8	9,5	892	786,7	1800	4,63	2683,4
9	8,5	873	662,6	1700	5,16	2112,7
10	8	852	440,6	1500	5,70	1159,7

* товщина після проходу

** початкові дані

Слід зазначити, що цільові деформаційні параметри прокатки двох плавки є однаковими. Незначна відмінність у температурах, силі прокатки та потужності двигунів по проходах пов'язана з різним хімічним складом двох плавки, табл. 2, а також різною довжиною слябів, які використовувались. Відмінність у силі прокатки при виробництві рулонів з двох плавки по проходах наведена на рис. 2.

Таким чином, згідно з розрахунком при виробництві рулонів розмірами 8x1260 мм з однаковими режимами прокатки, плавка 164022-3 з більшим вмістом С та меншим вмістом Nb має більші властивості міцності, ніж плавка 254077-2.

Цей розрахунок підтверджує переваги термомеханічного способу прокатки та можливість його впровадження на устаткуванні, яке не було розраховане на виробництво прокатних продуктів з рівнями

міцності, які перевищують проектні. Сталь, яка застосовується для термомеханічної прокатки, зазвичай має нижчий рівень міцності в процесі прокатки, ніж сталі, які виробляються іншими способами, завдяки меншому вмісту хімічних елементів. Особливості цього способу є те, що формування кінцевих властивостей відбувається вже після процесу прокатки. Таким чином прокатне устаткування працює без перевищення експлуатаційних характеристик.

Згідно з виконаними розрахунками встановлені експлуатаційні обмеження устаткування чорнової та чистої груп клітей не були перевищені. Таким чином, дослідна партія прокату може бути вироблена на наявному устаткуванні з застосуванням розрахованих температурно-деформаційних режимів.

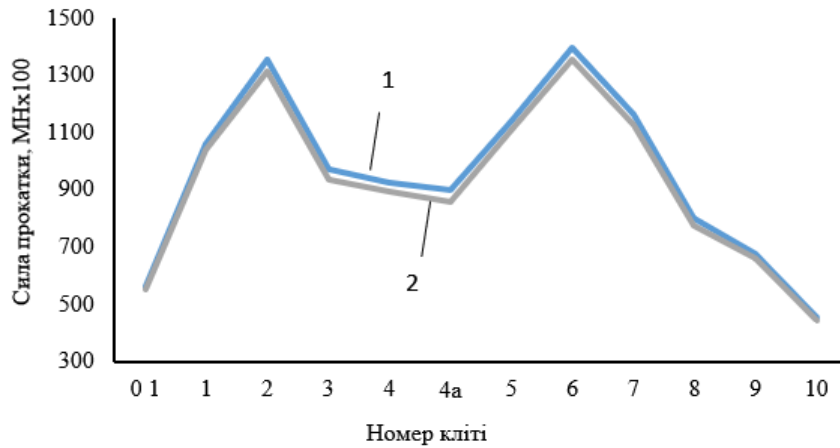


Рисунок 2 – Порівняння сили прокатки по клітях при виробництві рулонів з плавки 164022-3 (1) та плавки 254077-2 (2)

Виробництво дослідної партії гарячекатаних рулонів перерізом 8x1260 мм, з марки сталі X52 згідно з базовими вимогами API-5L здійснювалось зі слябів двох плавок 164022-3 та 254077-2 з різним хімічним складом.

Після прокатки рулони були оброблені на установці прискореного охолодження. Фактичні термомеханічні параметри виробництва дослідницької партії наведені в табл. 6

Таблиця 6 – Фактичні термомеханічні показники процесу прокатки

Параметр	Одиниця виміру	Значення параметру
Температура прокатки після кліті 10	°C	865-885
Температура змотування рулонів	°C	622-644
Кількість секцій для прискореного охолодження	шт	10-11
Швидкість охолодження	°C/c	49

Слід зазначити, що всі температури після кліті 10 та температури змотування знаходились в горі діапазону та на деяких рулонах перевищили верхній рівень.

Після змотування рулони були відправлені на додаткове контрольоване повітряне охолодження до температури 450 °C, яке здійснювали за допомогою промислових аераторів з метою зменшення товщини шару повітряної окалини. Після контрольованого

охолодження рулони були відправлені на склад для остаточного природнього охолодження.

Аналіз якості отриманих результатів виконувався на підставі механічних випробувань та металографічного дослідження.

Проби для оцінки механічних властивостей від рулонів дослідницької партії було відібрано після остаточного охолодження. Результати механічних випробувань наведені в табл. 7.

Таблиця 7 – Результати механічних випробувань дослідницької партії рулонів

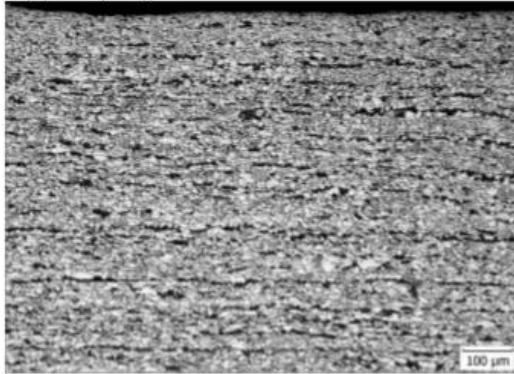
№ плавки	Механічні властивості					Ударна в'язкість, KV, Дж, при температурі випробувань, °C			
	Межа плинності, σ_T , МПа	Тимчасовий опір, σ_B , МПа	Відносне подовження, δ , %	Вигін по оправці 180°	σ_T/σ_B	0	-20	-40	-60
254077-2	425	520	24	Без розтріскування	0,82	-	41	37	34
	430	520	24		0,83		37	38	33
164022-3	380	500	24	Без розтріскування	0,76	-	32	30	30
	390	500	27		0,78		34	32	32
Вимоги API-5L PSL-1	≥ 360	≥ 460	16	Без розтріскування	-	-	-	-	-
Вимоги API-5L PSL-2	360-530	460-760	16	Без розтріскування	0,93	27	-	-	-

Отримані результати механічних випробувань відповідають вимогам рівня PSL-1 та PSL-2 API-5L для сталі марки X52 та X52M.

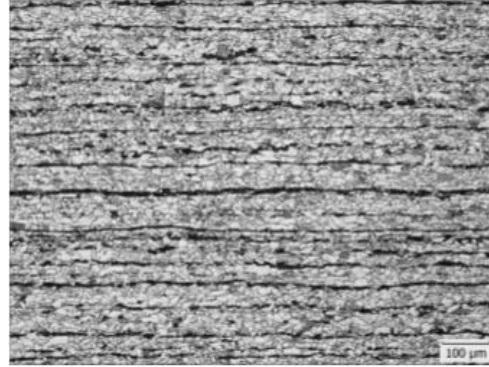
Однак, слід зазначити, що отриманий низький рівень відносного подовження та ударної в'язкості не є типовим для дослідної марки сталі. Низькі результати по цим показникам отримані внаслідок

недостатнього прискореного охолодження та підвищених температур кінця прокатки в кліті 10 та температури змотування.

Для аналізу внутрішньої якості прокатки проведені металографічні дослідження зразків від рулонів плавки 254077-2 та плавки 164022-3. Мікроструктура зразків наведена на рис. 3, 4.

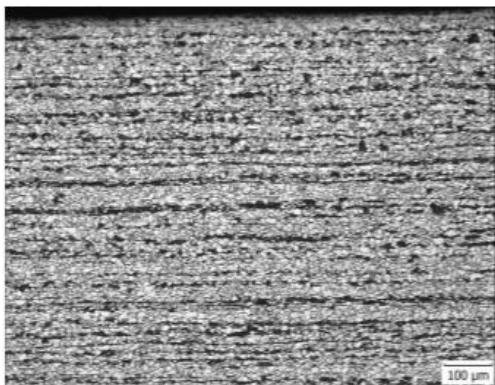


поверхня

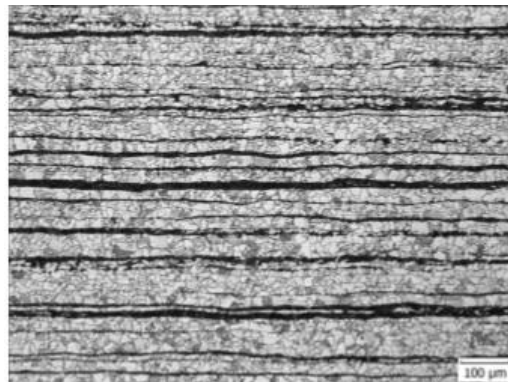


вісь

Рисунок 3 – Мікроструктура поперечних зразків від рулонів товщиною 8 мм, плавки 254077-2 після травлення, x100



поверхня



вісь

Рисунок 4 – Мікроструктура поперечних зразків від рулонів товщиною 8 мм, плавки 164022-3 після травлення, x100

Мікроструктура зразків від рулонів плавки 254077-2 мм є ферит-перлітною з зерном фериту на поверхні 9-10 номеру, в осі 8-9 номеру. Смугастість на поверхні зразків 1 бал, в осі 2 бал. Мікроструктура зразків від рулону плавки 164022-3 є ферит-перлітною з зерном фериту 10 номеру. Смугастість на поверхні зразків 2 бал, в осі 3-4 бал.

Отримані показники мікроструктури свідчать про недостатнє здійснене прискорене охолодження прокату та перевищення цільових термомеханічних температур на обох плавках, що також підтверджується результатами механічних випробувань.

Краща мікроструктура та механічні властивості отримані на плавці 254077-2 за рахунок більшого вмісту Nb-0,040% в порівнянні з плавкою 164022-3 (Nb-0,026%) при однакових температурно-деформаційних параметрах. Таким чином, підтверджено позитивний вплив Nb на формування мікро-

структури та властивостей прокату при термомеханічному способі обробки.

З метою подальшого покращення мікроструктури та механічних властивостей рулонів товщиною 8 мм зі сталі марки X52 необхідно виконати додаткове дослідження з корегуванням технології в частині зниження температур змотування, збільшення кількості охолоджувальних секцій. Також, слід зазначити важливість цього дослідження, тому що виробництво товщини 8 мм знаходиться на межі технічних можливостей стану 1700.

ВИСНОВКИ. Вперше для умов стану 1700 ПрАТ «ММК Імєні Ілліча» розроблена технологія термомеханічної контрольованої прокатки рулонів перерізом 8x1260 мм зі сталі марки X52 для подальшого виробництва електрозварних труб згідно з вимогами API-5L, рівень PSL-1.

Вперше в умовах стану 1700 ПрАТ «ММК Імені Ілліча» вироблена дослідницька партія прокату зі сталі марки X52 (X52M) для подальшого виробництва електрозварних труб, яка повністю відповідає вимогам американського стандарту API-5L, рівень PSL-1 та PSL-2.

В роботі підтверджено переваги термомеханічного способу прокатки завдяки особливостям хімічного складу та нижчого рівня міцності в процесі виробництва в порівнянні з іншими способами прокатки, та можливість його впровадження на устаткування, яке не було розраховане на виробництво продуктів таких рівнів міцності.

Підтверджено позитивний вплив Nb на формування мікроструктури та властивості прокату при термомеханічному способі обробки.

Встановлено, що для покращення мікроструктури прокату граничної для стану 1700 товщини 8 мм необхідне додаткове дослідження з корегуванням технології в частині зниження температур змотування та збільшення кількості охолоджувальних секцій.

ЛІТЕРАТУРА

1. Gray J. Malcolm. Technology of microalloyed steel for large diameter pipe. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*. Vol. 2. 1974. P. 95–122. DOI: [https://doi.org/10.1016/0308-0161\(74\)90019-2](https://doi.org/10.1016/0308-0161(74)90019-2).
2. Zinchenko Yu. A., Kurpe A. G., Bagmet O. A. Prospects of the technology used to make skelp at the Azovstal metallurgical combine, *Metallurgist*. Vol. 52. Nos. 7–8. 2008. P. 461–463. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11015-008-9065-4>.
3. Militzer M. Thermomechanical Processed Steels Reference Module in *Materials Science and Materials Engineering Comprehensive. Materials Processing*. Vol. 1. 2014. P. 191–216. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-096532-1.00115-1>.
4. Li Hai-jun, Li Zhen-lei, Yuan Guo, Wang Zhao-dong, Wang Guo-dong. Development of new generation cooling control system after rolling in hot rolled strip based on UFC. *Journal of Iron and Steel Research, International*. 2013. 20(7). P. 29–34.
5. Liu En-yang, Zhang Dian-hua, Sun Jie, Peng Liang-gui, Gao Bai-hong, Su Li-tao. Algorithm design and application of laminar cooling feedback control in hot strip mill. *Journal of Iron and Steel Research, International*. 2012. 19(4). P. 39–42. DOI: [https://doi.org/10.1016/S1006-706X\(12\)60085-5](https://doi.org/10.1016/S1006-706X(12)60085-5).
6. Volodymyr Kukhar, Andrii Prysiaznyi, Elena Balalayeva, Oleksandr Anishchenko. Designing of induction heaters for the edges of pre-rolled wide ultrafine sheets and strips correlated with the chilling end-effect. *Modern Electrical and Energy System MEES'2017*. IEEE. Kremenchuk. Ukraine. Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University, November 15–17. 2017. P. 404–407. DOI: <https://doi.org/10.1109/MEES.2017.8248945>.
7. Yunbo Xu, Yongmei Yu, Xianghua Liu, Guodong Wang. Modeling of microstructure evolution and mechanical properties during hot-strip rolling of Nb steels. *Journal of University of Science and Technology*. Beijing. Vol. 15. 2008. P. 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., Dyja H. Investigation of microstructure prediction during experimental thermomechanical plate rolling. *Journal of Materials Processing Technology*. 109. 2001. P. 112–119. PII: S 0924-0136(00)00784-6.
9. Xiangwei Kong, Liangyun Lan. Optimization of mechanical properties of low carbon bainitic steel using TMCP and accelerated cooling. 11th International Conference on Technology of Plasticity, ICTP. 2014. P. 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. P. 271–301. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100270-4.00010-X>.
11. V. Carretero Olalla, V. Bliznuk, N. Sanchez, P. Thibaux, L.A.I. Kestens, R.H. Petrov. Analysis of the strengthening mechanisms in pipeline steels as a function of the hot rolling parameters. *Materials Science & Engineering A* 604. 2014. P. 46–56. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.msea.2014.02.066>.
12. Sumit Ghosh, Suhrit Mula. Thermomechanical processing of low carbon Nb–Ti stabilized microalloyed steel: microstructure and mechanical properties. *Materials Science and Engineering*. Vol. 646. 2015. P. 218–233. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.msea.2015.08.072>.
13. Dong Rui-feng, Sun Li-gang, Liu Zhe, Wang Xue-lian, Liu Qing-you. Microstructures and properties of X60 grade pipeline strip steel in CSP plant. *Journal of Iron and Steel Research, International*. 2008. P. 71–75. DOI: [https://doi.org/10.1016/S1006-706X\(08\)60035-7](https://doi.org/10.1016/S1006-706X(08)60035-7).
14. J. Zhao, W. Hu, X. Wang, J. Kang, Y. Cao, G. Yuan, H. Di, R.D.K. Misra. A Novel thermomechanical controlled processing for large-thickness microalloyed 560 MPa (X80) pipeline strip under ultra-fast cooling. *Materials Science & Engineering A* 673. 2016. P. 373–377. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.msea.2016.07.089>.
15. J. Zhao, W. Hu, X. Wang, J. Kang, G. Yuan, H. Di, R.D.K. Misra. Effect of microstructure on the crack propagation behavior of microalloyed 560 MPa (X80) strip during ultra-fast cooling. *Materials Science & Engineering A* 666. 2016. P. 214–224. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.msea.2016.04.073>.
16. Lan Liang-yun, Qiu Chun-lin, Zhao De-wen, Gao Xiu-hua, Du Lin-xiu. Dynamic and static recrystallization behavior of low carbon high niobium microalloyed steel. *Journal of Iron and Steel Research, International*. 18(1). 2011. P. 55–60. DOI: [https://doi.org/10.1016/S1006-706X\(11\)60011-3](https://doi.org/10.1016/S1006-706X(11)60011-3).
17. V.V. Natarajan, V.S.A. Challa, R.D.K. Misra. The Determining Impact of Coiling Temperature on the Microstructure and Mechanical Properties of a Titanium-Niobium Ultrahigh Strength Microalloyed Steel: Competing Effects of Precipitation and Bainite. *Materials Science and Engineering*. Vol. 665. 2016. P. 1–9. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.msea.2016.04.007>.

18. P.K.C. Venkatsurya, Z. Jia, R.D.K. Misra, M.D. Mulholland, M. Manohar, J.E. Hartmann Jr. Understanding mechanical property anisotropy in high strength niobium-microalloyed linepipe steels. *Materials Science and Engineering*. Vol. 556. 2012. P. 194–210. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.msea.2012.06.078>.

19. Zhang Ji-ming, Sun Wei-hua, Sun Hao. Mechanical properties and microstructure of X120 grade high strength pipeline steel. *Journal of Iron and Steel Research. International*. 2010. 17(10). P. 63–67. DOI: [https://doi.org/10.1016/S1006-706X\(10\)60185-9](https://doi.org/10.1016/S1006-706X(10)60185-9).

20. Wengui Zhao, Meng Chen, Shaohui Chen, Jinbo Qu. Static strain aging behavior of an X100 pipeline steel. *Materials Science and Engineering A* 550. 2012. P. 418–422. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.msea.2012.04.095>.

21. Dr. Ing. Hans-Georg Hillenbrand, Dr. Ing. Michael Grdf, Dr. Ing. Christoph Kalwa. Development and production of high strength pipeline steels. Niobium 2001. EUROPIPE GmbH. 2001. P.1–29.

22. Michael Grdf, Jens Schröder, Volker Schwinn, Klaus Hulka. Production of Large Diameter Pipes Grade X 70 with High Toughness using Acicular Ferrite Microstructures. *International Conference on Application and Evaluation of High Grade Linepipes in Hostile Environments*. Yokohama. Japan. 2002. P.1–14.

23. Максименко О. П., Присяжный А. Г., Кухарь В. В., Кузьмин Е. В. Теоретический анализ момента при прокатке с натяжением полосы. *Обработка материалов давлением: сб. науч. тр. ДГМА. Краматорск. ДГМА. 2017. № 1 (44). С. 199–203.*

24. Кухарь В. В., Курпе А. Г. Уточнение методики расчета тепловых потерь металла на непрерывных станах горячей прокатки. *Обработка материалов давлением: сб. науч. тр. ДГМА. Краматорск. ДГМА. 2018. № 1 (46). С. 159–166.*

25. Курпе О. Г. Кухарь В. В., Змазнева С. В. Уточнения розрахунку теплових втрат металу на станах Стеккеля. *Проблеми трибології*. 2018. № 1. С. 78–84.

26. Кухарь В. В., Курпе О. Г. Розробка технології виробництва листового прокату товщиною 4 мм на стані 3200 заводу Trametel SpA. *Металлургическая и горнорудная промышленность*. 2018. N2. С. 24–29.

27. Volodymyr Kukhar, Viktor Artiukh, Andrii Prysiashnyi, Andrey Pustovgar. Experimental Research and Method for Calculation of ‘Upsetting-with-Buckling’ Load at the Impression-Free (Dieless) Preforming of Workpiece. *E3S Web of Conference (HRC 2017)*. Vol. 33. 02031. 2018. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20183302031>.

PRODUCTION DEVELOPMENT OF HOT-ROLLED COILS OF STEEL GRADE X52M FOR FURTHER MANUFACTURING OF PIPES IN ACCORDANCE WITH API-5L AT ROLLING "1700" PJSC "ILYICH IRON AND STEEL WORKS"

O. Kurpe

METINVEST HOLDING, LLC

prosp. Nahimova, 116-A, Mariupol, 87534, Ukraine. E-mail: aleksandr.kurpe@gmail.com

V. Kukhar

Pryazovskyi State Technical University

vul. Universytets'ka, 7, Mariupol, 87555, Ukraine. E-mail: kvv.mariupol@gmail.com

O. Shebanits

PJSC "Ilyich Iron and Steel Works", METINVEST HOLDING, LLC

vul. Levchenko 1, Mariupol, 87504, Ukraine. E-mail: oksana.shebanitc@metinvestholding.com

Purpose. The article aims to develop the manufacturing process and production of hot-rolled coils of steel grade X52M by the method of thermomechanical controlled rolling at rolling mill 1700 facilities for further manufacturing of electric-welded pipes in accordance with API-5L. **Methodology.** The technology has been developed applying the general requirements for rolled products production by the method of thermomechanical controlled rolling applying the mathematical model of the rolling technological process. **Findings.** At rolling mill 1700 facilities, PJSC “Ilyich Iron and Steel Works”, for the first time the technology has been developed and the batch of hot-rolled coils (8x1260mm) of steel grade X52M has been produced by the method of thermomechanical controlled rolling for further manufacturing of electric-welded pipes in accordance with API-5L. This paper confirms the advantages of the thermomechanical rolling method due to special features of the chemical composition and lower strength level during the production in comparison to other rolling methods, and the possibility to apply this method at the equipment that was not designed for manufacturing of products of such strength categories. The positive influence of Nb on microstructure forming and rolling products properties has been confirmed with thermomechanical rolling method. **Originality.** Additionally, during the production, the controlled air cooling of coils has been applied up to 450 oC after coiling. This ensures the reduction of air scale layer thickness and improves the surface quality, including the surface quality during further manufacturing of electric-welded pipes. **Practical value.** The developed technology makes it possible to ensure the production of coils which meet the present-day world requirements and meet the demands of domestic and foreign producers of electric-welded pipes. **Conclusions.** There have been determined next stages of the research to improve the quality and for further development of rolled products production for manufacturing of electric-welded pipes in accordance with API-5L.

Key words: thermomechanical controlled rolling, hot-rolled coils, standard API-5L, steel grade X52M, technology.

REFERENCES

1. Gray, J, Malcolm (1974), "Technology of microalloyed steel for large diameter pipe", *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, Vol. 2, pp. 95–122. DOI: [https://doi.org/10.1016/0308-0161\(74\)90019-2](https://doi.org/10.1016/0308-0161(74)90019-2).
2. Zinchenko, Yu. A., Kurpe, A. G., Bagmet, O. A. (2008), "Prospects of the technology used to make skelp at the Azovstal metallurgical combine", *Metallurgist*, Vol. 52, Nos. 7–8, pp. 461–463. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11015-008-9065-4>.
3. Militzer, M. (2014), "Thermomechanical Processed Steels Reference Module in Materials Science and Materials Engineering Comprehensive", *Materials Processing*, Vol. 1, pp. 191–216. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-096532-1.00115-1>.
4. Li, H., Li, Z., Yuan, G., Wang, Z., Wang, G. (2013), "Development of new generation cooling control system after rolling in hot rolled strip based on ufc", *Journal of Iron and Steel Research*, International, 20(7), pp. 29–34.
5. Liu, E., Zhang, D., Sun, J., Peng, L., Gao, B., Su, L. (2012), "Algorithm design and application of laminar cooling feedback control in hot strip mill", *Journal of Iron and Steel Research*, International, 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, V., Prysiashnyi, A., Balalayeve, E., Anishchenko, O. (2017), "Designing of induction heaters for the edges of pre-rolled wide ultrafine sheets and strips correlated with the chilling end-effect", *Modern Electrical and Energy System MEES'2017*, IEEE, Kremenchuk, Ukraine, Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University, November 15–17, pp. 404–407. DOI: <https://doi.org/10.1109/MEES.2017.8248945>.
7. Yunbo, Xu, Yongmei, Yu, Xianghua, Liu, Guodong, Wang. (2008), "Modeling of microstructure evolution and mechanical properties during hot-strip rolling of Nb steels", *Journal of University of Science and Technology*, Beijing, Vol. 15, 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., Dyja, H. (2001), "Investigation of microstructure prediction during experimental thermomechanical plate rolling", *Journal of Materials Processing Technology*, 109, pp. 112–119. PII: S 0924-0136(00)00784-6.
9. Xiangwei, Kong, Liangyun, Lan (2014), "Optimization of mechanical properties of low carbon bainitic steel using TMCP and accelerated cooling", *11th International Conference on Technology of Plasticity*, ICTP, pp. 19–24. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2014.09.136>.
10. Bhadeshia, Sir Harshad (2017), "Thermomechanical Treatment of Steels", *Microstructure and Properties* (Fourth edition), pp. 271–301. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100270-4.00010-X>.
11. Carretero Olalla, V., Bliznuk, V., Sanchez, N., Thibaux, P., Kestens, L.A.I., Petrov, R.H. (2014), "Analysis of the strengthening mechanisms in pipeline steels as a function of the hot rolling parameters", *Materials Science & Engineering A* 604, pp. 46–56. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.msea.2014.02.066>.
12. Sumit, Ghosh, Suhrit, Mula. (2015), "Thermomechanical processing of low carbon Nb–Ti stabilized microalloyed steel: microstructure and mechanical properties", *Materials Science and Engineering*, Vol. 646, pp. 218–233. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.msea.2015.08.072>.
13. Dong, R., Sun, L., Liu, Z., Wang, X., Liu, Q. (2008), "Microstructures and Properties of X60 Grade Pipeline Strip Steel in CSP Plant", *Journal of Iron and Steel Research*, International, pp. 71–75. DOI: [https://doi.org/10.1016/S1006-706X\(08\)60035-7](https://doi.org/10.1016/S1006-706X(08)60035-7).
14. Zhao, J., Hu, W., Wang, X., Kang, J., Cao, Y., Yuan, G., Di, H., Misra, R.D.K. (2016), "A Novel thermo-mechanical controlled processing for large-thickness microalloyed 560 MPa (X80) pipeline strip under ultra-fast cooling" *Materials Science & Engineering A* 673, pp. 373–377. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.msea.2016.07.089>.
15. Zhao, J., Hu, W., Wang, X., Kang, J., Yuan, G., Di, H., Misra, R.D.K. (2016), Effect of microstructure on the crack propagation behavior of microalloyed 560 MPa (X80) strip during ultra-fast cooling", *Materials Science & Engineering A* 666, pp. 214–224. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.msea.2016.04.073>.
16. Lan, L., Qiu, Ch., Zhao, D., Gao, X., Du, L. (2011), "Dynamic and Static Recrystallization Behavior of Low Carbon High Niobium Microalloyed Steel", *Journal of Iron and Steel Research*, International, 18(1), pp. 55–60. DOI: [https://doi.org/10.1016/S1006-706X\(11\)60011-3](https://doi.org/10.1016/S1006-706X(11)60011-3).
17. Natarajan, V. V., Challa, V.S.A., Misra, R.D.K. (2016), "The Determining Impact of Coiling Temperature on the Microstructure and Mechanical Properties of a Titanium-Niobium Ultrahigh Strength Microalloyed Steel: Competing Effects of Precipitation and Bainite", *Materials Science and Engineering*, Vol. 665, pp. 1–9. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.msea.2016.04.007>.
18. Venkatsurya, P.K.C., Jia, Z., Misra, R.D.K., Mulholland, M.D., Manohar, M., Hartmann, J.E. Jr. (2012), "Understanding mechanical property anisotropy in high strength niobium-microalloyed linepipe steels", *Materials Science and Engineering*, Vol. 556, pp. 194–210. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.msea.2012.06.078>.
19. Zhang, J., Sun, W., Sun, H. (2010), "Mechanical Properties and Microstructure of X120 Grade High Strength Pipeline Steel", *Journal of Iron and Steel Research*, International, 17(10), pp. 63–67. DOI: [https://doi.org/10.1016/S1006-706X\(10\)60185-9](https://doi.org/10.1016/S1006-706X(10)60185-9).
20. Wengui, Zh., Meng, Ch., Shaohui, Ch., Jinbo, Q. (2012), "Static strain aging behavior of an X100 pipeline steel", *Materials Science and Engineering A* 550, pp. 418–422. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.msea.2012.04.095>.
21. Hillenbrand, Dr. Ing. Hans-Georg, Grdf, Dr. Ing. Michael, Kalwa, Dr. Ing. Christoph (2001), "Development and production of high strength pipeline steels", *Niobium 2001, EUROPIPE GmbH*, pp. 1–29.

22. Grdf, Michael, Schröder, Jens, Schwinn, Volker, Hulka, Klaus (2002), "Production of Large Diameter Pipes Grade X 70 with High Toughness using Acicular Ferrite Microstructures", *International Conference on Application and Evaluation of High Grade Linepipes in Hostile Environments*, Yokohama, Japan, pp. 1–14.

23. Maksymenko, O. P., Prysazhnyj, A. G., Kuhar', V. V., Kuz'myn, E. V. (2017), *Teoretycheskyj analiz momenta pry prokatke s natjazhenyem polosi* [Theoretical analysis of rolling torque with strep tension], *Obrabotka materyalov davlenyem: sb. nauch. tr. DGMA, Kramatorsk. DGMA, № 1 (44)*, pp. 199–203.

24. Kuhar', V. V., Kurpe, A. G. (2018), *Utochnenye metodyky rascheta teplovyh poter' metalla na neprerivnih stanah gorjachej prokatky* [Calculation methodic refinement of of metal heat losses at continuous hot rolling mills], *Obrabotka materyalov davlenyem: sb. nauch. tr. DGMA, Kramatorsk, DGMA, № 1 (46)*, pp. 159–166.

25. Kurpe, O. G. Kuhar, V. V., Zmaznjeva, Je. V. (2018), *Utochnennja rozrahunku teplovyh vtrat metalu na stanah Stekkelja* [Calculation refinement of metal heat loses on the Steckel rolling mills], *Problemy trybologii' = Problems of Tribology, № 1*, pp. 78–84.

26. Kuhar, V. V., Kurpe, O. G. (2018), *Rozrobka tehnologii' vyrobnyctva lystovogo prokatu tovshhynuju 4 mm na stani 3200 zavodu Trametal SpA* [Process development for production of plate products of 4 mm thickness at rolling mill 3200, Trametal SpA], *Metallurgycheskaja y gornorudnaja promishlennost', №2*, pp. 24–29.

27. Kukhar, V., Artiukh, V., Prysiazhnyi, A., Pustovgar, A. (2018), "Experimental Research and Method for Calculation of 'Upsetting-with-Buckling' Load at the Impression-Free (Dieless) Preforming of Workpiece", *E3S Web of Conference (HRC 2017)*, Vol. 33, 02031, 2018.

<https://doi.org/10.1051/e3sconf/20183302031>.

Стаття надійшла 05.10.2018.