

ПРОЕКТУВАННЯ ТЕХНОЛОГІЇ ВИРОБНИЦТВА РУЛОННОГО ПРОКАТУ ДЛЯ ТРУБ НА СТАНІ СТЕККЕЛЯ ЗАВОДУ «FERRIERA VALSIDER» (ІТАЛІЯ)

В умовах стану Стеккеля, заводу «Ferriera Valsider» вперше розроблена технологія термомеханічної контрольованої прокатки гарячекатаних рулонів розмірами 12×1510 мм зі сталі марки Х65, для подальшого виробництва електрозварних труб за стандартом API-5L. Технологія розроблена з використанням загальних вимог до виробництва прокату способом термомеханічної контрольованої прокатки з прискореним охолодженням із застосуванням відомих наукових і практичних підходів, а також за допомогою спеціально розробленого комплексу математичного моделювання. Розроблена технологія передбачає виконання чорнової прокатки в дві стадії, що сприяє формуванню більш дрібного аустенітного зерна, а отже більш дисперсної та однорідної успадкованої феритної структури в готовому прокаті. Під час моделювання технології утримання температури на стані 1780 Стеккеля на потрібному рівні здійснено шляхом регулювання кількості пальників в пічних моталках. В розробленій технології вперше для умов стану Стеккеля заводу «Ferriera Valsider» застосована технологія контрольованого повітряного охолодження рулонів до температури 400 °С, після змотування, що забезпечує зменшення товщини шару повітряної окалини та покращує якість поверхні, у тому числі при подальшому виготовленні електрозварних труб. На підставі розрахунку розроблені рекомендації щодо необхідної потужності головних двигунів, що дозволить підвищити продуктивність, знизити питомі енерговитрати та підвищити якість продукції, що виробляється. Виконане дослідження дозволило оцінити технічні можливості діючого устаткування та встановити можливість виробництва рулонів, що відповідають сучасним світовим вимогам та задовольняють потреби європейських виробників електрозварних труб.

Ключові слова: термомеханічна контрольована прокатка, гарячекатані рулони, стан Стеккеля, стандарт API-5L, сталь марки Х65, технологія.

О.Н. KURPE
METINVEST HOLDING, LLC, Mariupol, Ukraine

PROCESS DEVELOPMENT FOR PRODUCTION OF HOT ROLLED COILS FOR FURTHER PRODUCTION OF PIPE AT STECKEL ROLLING MILL, FARRIERA VALSIER SPA

At Steckel rolling mill facilities, Ferriera Valsider the technology of thermomechanical controlled rolling of hot-rolled coils (dimensions 12x1510mm, steel grade X65) has been developed at the first time; coils will be used for further manufacturing of electric-welded pipes in accordance with API-5L. The technology has been developed applying general requirements for rolled products produced under the method of thermomechanical controlled rolling with accelerated cooling and with the application of well-known scientific and practical approaches and also by using the purposely designed complex of the mathematical modelling. The developed technology provides carrying out of the roughing-down in two stages that facilitates the forming of a smaller austenite grain and therefore more dispersed and more homogeneous inherited ferrite structure in the finished rolled product. When modelling the technology, the holddown of the temperature at the desired level at 1780 Steckel rolling mill has been carried out by adjusting the number of burners in furnace coilers. At the first time in the developed technology for Steckel rolling mill, Ferriera Valsider the technology of controlled air-cooling of coils to the temperature of 400 °C after coiling has been applied that ensures the decrease of air scale layer thickness and improves the surface quality including that during the further manufacturing of electric-welded pipes. Based upon the calculation the recommendations as for the required main motors power has been worked out that allows to increase the productivity, decrease the specific energy consumption and increase the quality of the produced products. The research that has been performed allowed to evaluate the feasibility of the operating equipment and to determine the possibility to produce coils that meet the nowadays world requirements and satisfy demands of European producers of electric-welded pipes.

Keywords: thermomechanical controlled rolling, hot-rolled coils, Steckel rolling mill, API-5L standard, steel grade X65, technology.

Вступ

Найбільш поширеним способом виготовлення плоского прокату для труб великого діаметру є прокатка на товстолістових реверсивних станах, а також на станах безперервної прокатки. Особливе місце займає виробництво трубного сортаменту на станах Стеккеля. Цей спосіб є менш поширеним, але вдало застосовується світовими виробниками. Слід зазначити, що аналога реалізації виробництва трубного сортаменту великого діаметру на станах Стеккеля на території колишнього Радянського Союзу немає. При цьому в Канаді, Америці, Південній Кореї, Китаї такий спосіб виробництва є поширеним.

Отримання необхідних властивостей прокату у всіх випадках досягається переважно методом термомеханічного процесу з використанням або без використання прискореного охолодженням.

Застосування для виготовлення труб великого діаметру листового прокату або рулонного, а отже і виготовлення їх в прямо-шовному виконанні або спіральньо-шовному, багато в чому залежить від політичних, а також від історично сформованих технічних та технологічних аспектів конкретного регіону, країни. У той час як при реалізації великих проектів у східно-європейських та азійських країнах переважають трубопроводи у прямо-шовному виконанні, в низці Європейських держав, а також Канаді, Америці широко застосовуються спіральньо-шовні труби.

Безсумнівно, переваги і недоліки мають обидва варіанти виготовлення, починаючи від листового прокату і труб, та закінчуючи безпосередньо трубопроводом.

В останні роки отримав розвиток процес виробництва гарячого прокату на станах Стеккеля. Якщо базовим сортаментом, який вироблявся на таких станах, був гарячекатаний міцний прокат, при виробництві якого потрібно підтримувати температуру металу в аустенітній області. Сучасні стани Стеккеля та технології дозволяють виробляти прокат різноманітними способами шляхом керування необхідним рівнем температур для отримання бажаного комплексу механічних властивостей готового прокату [1–6].

Функціонуючі стани за своєю конструкцією поділяються на декілька типів: одноклітьові, двоклітьові, з чорновою кліттю, з додатковими чистовими клітьями [2, 6].

Відомо багато робіт авторів по дослідженню процесів виробництва на станах Стеккеля, серед яких роботи авторів [7–11]. В роботах [12–17] наведені дослідження окремих технологічних процесів, які також можна використати для проектування технології на стані Стеккеля.

Прикладну цікавість становлять технології, запропоновані авторами робіт [7, 8], що до виробництва прокату для труб великого діаметру, категорії міцності X80. Слід зазначити, що ці технології впроваджені на устаткуванні, яке збудоване у 90-х роках, що дозволяє зробити окремий аналіз технічних можливостей та відмінностей устаткування з устаткуванням, побудованим раніше.

В роботі [9] авторами наведено дослідження впливу температури на формування структурних складових вздовж смуги при виробництві аустенітних сталей, результати якого можуть бути частково застосовані при розробці технології або її корегуванні.

Окрему цікавість становлять результати дослідження авторів з лабораторного моделювання стану Стеккеля, які наведені в роботі [10].

Слід зазначити, що обмежена кількість досліджень залишає відкритим питання з оцінки технічних можливостей існуючого устаткування станів Стеккеля по освоєнню нового сортаменту підвищених категорій міцності.

Проектування технології виробництва рулонного прокату для труб на стані Стеккеля заводу «Ferriera Valsider» категорії міцності X65 є актуальним завданням, що дозволить оцінити технічні можливості діючого устаткування та встановити євровісність виробництва рулонів, що відповідають сучасним світовим вимогам та задовольняють потреби європейських виробників електрозварних труб.

Мета

Метою роботи є розробка технології виробництва рулонного прокату трубного сортаменту категорії міцності X65 на стані Стеккеля заводу «Ferriera Valsider» (Італія) з урахуванням технічних особливостей наявного нагрівального та прокатного устаткування.

Основна частина

Основне устаткування лінії стану Стеккеля заводу «Ferriera Valsider» SpA складає методична штовхальна піч, що має шість зон для нагрівання слябів, виробництва фірми Dendotti, яка опалюється природним газом продуктивністю 120 т/год, стан 3170 для прокатування плит та підкату для стану Стеккеля, який включає реверсивну кліть дуо з силою прокатки до 25 МН, та кліть з вертикальними валками, прохідну семи зонна роликову піч для проміжного підігріву підкату, яка опалюється природним газом. Стан Стеккеля включає реверсивну кліть кварто 1780 з силою прокатки до 24 МН та пічки камерного типу з барабаними моталками, які опалюються природним газом, які розташовані з обох сторін прокатного стану 1780. Установка для ламінарного охолодження полоси після прокатки довжиною 41 м, яка дозволяє охолодити метал зі швидкістю до 40 °С/с. Моталки для змотування полоси товщиною до 20 мм.

Основним сортаментом стану є товстолистовий та рулонний прокат конструкційного призначення, у тому числі стійкого до атмосферної корозії, прокат для суднобудування та вироблення деталей для машинобудування.

Сортамент, що виробляється, обумовлює існуючий технологічний регламент роботи всього основного устаткування, тобто високі температури нагрівання слябів під прокатку, порядку 1230 °С, високу температуру пічки при проміжному підігріванні підкату від 1100 °С до 1250 °С, високі температури пічних моталок порядку 1070 °С. Слід зазначити, що при вказаних температурах є суттєвий резерв енергосилових параметрів. Фактична сила прокатки в чорновій і чистовій клітьях знаходиться у межах 12–14 МН, при відносній ступені деформації за прохід від 15% до 50% відповідно до сортаменту, що дає змогу до подальшого розвитку технології та розширенню сортаменту.

Схема основної технологічної лінії по виробництву гарячекатаних рулонів на заводі «Ferriera Valsider» наведена на рис. 1.

Оцінка можливостей заводу з освоєння технології виробництва рулонів трубного сортаменту базувалася на аналізі технічних характеристик існуючого устаткування.

В результаті аналізу та виконання попередніх розрахунків гранично допустимих технологічних навантажень на основне устаткування клітей, за допомогою комплексу математичного моделювання відзначена недостатня потужність двигунів головного приводу стану 3170 та стану 1780 Стеккеля при досить високих силових характеристиках обох клітей, що не дозволяє експлуатувати їх на повну потужність. Виходячи з розрахунку отримані наступні результати, табл. 1.

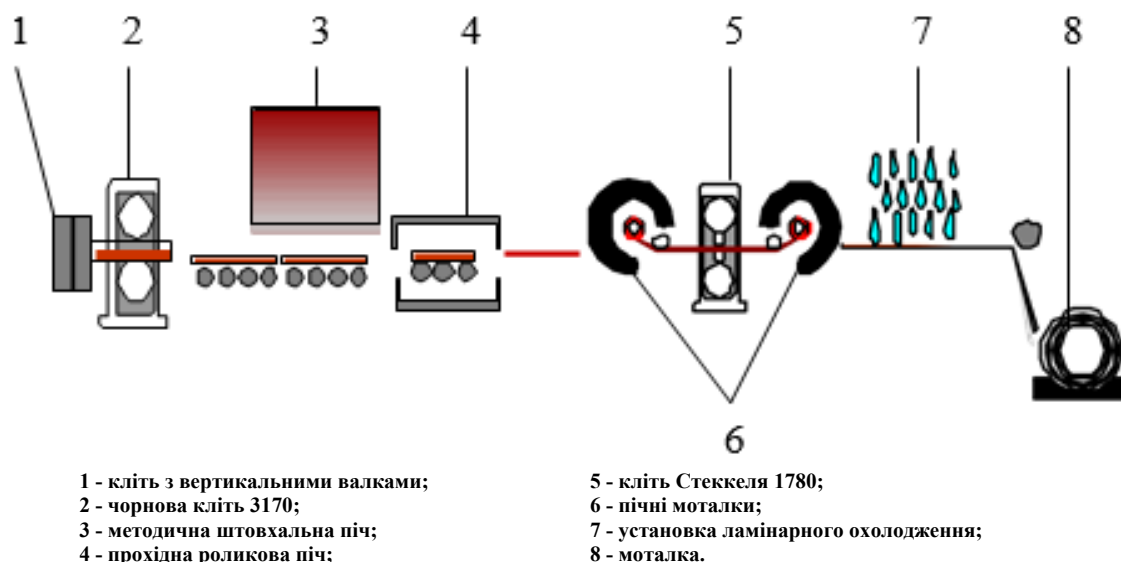


Рис. 1. Схема технологічної лінії з виробництва гарячекатаних рулонів на заводі «Ferriera Valsider»

Таблиця 1

Порівняння існуючої потужності двигунів і розрахованої

Кліть/тип	Кількість двигунів головного приводу, шт.	Максимальна сила прокатки, МН	Фактична потужність двигуна, кВт	Розрахована, необхідна потужність двигуна, кВт
3170/дуо	2	25	2x2240	2x4430
1780/кварто	2	24	2x4480	2x5770

Таким чином, підвищення ефективності експлуатації клітей на заводі «Ferriera Valsider» шляхом підвищення продуктивності, зниження питомих енерговитрат, підвищення якості виробленої продукції можливо шляхом встановлення нових, більш потужних двигунів головного приводу.

Недостатня потужність двигунів вносить певні труднощі в розробку і реалізацію технології термомеханічної прокатки на існуючому устаткуванні.

Розробка технології виробництва рулонів трубного сортаменту можлива в двох наступних варіантах.

Реалізація на стані технології ТМСП без прискореного охолодження з необхідністю завершення деформації в феритній області, що призведе до значної (до 30%) втрати продуктивності за рахунок вимушеного збільшення кількості проходів. Крім цього, при виконанні чистої прокатки досить складним буде планування і реалізація роботи пічних моталок як в частині силових характеристик при змотуванні, так і безпосередньо підтримання необхідного температурного режиму прокатки, який буде змінюватися в широкому діапазоні.

Застосування технології ТМСП з прискореним охолодженням є більш прийнятним варіантом. Безумовною перевагою цієї технології є більш високі споживчі властивості одержуваної продукції, що неодноразово підкреслювалося багатьма дослідженнями, менші витрати на виробництво, в тому числі за рахунок зниження рівня мікролегуєчих елементів, які додаються в сталь, зниження енерговитрат на нагрівання та прокатку. Крім цього, і що особливо важливо для цього стану Стеккеля, це зниження навантажень на двигуни головного приводу і пічних моталок за рахунок проведення деформації в більш високій температурній області.

Розробка технології контрольованої прокатки з прискореним охолодженням виконувалася із застосуванням відомих наукових і практичних підходів, а також за допомогою спеціально розробленого комплексу математичного моделювання.

У якості заготовки для виробництва рулонів розмірами 12x1510мм, категорії міцності Х65 було розглянуто використання слябів МК «АЗОВСТАЛЬ» поточного виробництва, перерізом 220x1510 мм. Хімічний склад дослідних слябів наведено в табл. 2.

Таблиця 2

Хімічний склад дослідної сталі категорії міцності Х65

№ плавки	Переріз слябів, мм	Хімічний склад, %														
		C	Mn	Si	S	P	Al	Nb	V	Cu	Ni	Cr	Mo	Ti	N	B
1002129	220x1510	0,09	1,40	0,23	0,002	0,011	0,036	0,030	0,066	0,02	0,02	0,03	0,01	0,015	0,0070	0,0005

Нагрівання слябів виконується в шестизонній методичній печі. Температура нагрівання слябів для прокатування повинна становити $1170 \pm 10^\circ\text{C}$. Визначення необхідної температури аустенізації здійснювалося на підставі даних по температурах розчинності частинок NbC та Nb (C, N) в структурі безперервно литого слябу.

Нагріті сляби надходять до чорнової кліті дуо стану 3170, попередньо проходячи камеру гідрозмиву для видалення пічної окалини з поверхні. Температура слябів після гідрозмиву повинна становити $1130 \pm 10^\circ\text{C}$.

Прокатку в чорновій кліті необхідно здійснювати по поздовжній схемі в дві стадії. Перша стадія прокатки здійснюється у верхній частині аустенітної області в діапазоні температур від 1130 до 1020°C , де протікає інтенсивна рекристалізація деформованого аустеніту, зі ступенем деформації більш ніж 10% за прохід, за винятком перших двох-трьох проходів, ступінь деформації в яких обмежена максимальним кутом захоплення, потужністю та обертаючим моментом двигуна. Після виконання першої стадії підкат охолоджується шляхом поступального переміщення на рольгангу до температури 920°C . Відсутність деформації в даній температурній області дозволяє зберігати частину ніобію в розчиненому вигляді для подальшого дисперсійного зміцнення металу, так як на даному етапі некогерентні частки Nb (C, N), а також Ti (C, N) що виділяються, не вносять істотних змін в зміцнення сталі. Останні 2–4 пропуски виконуються в області гальмування рекристалізації в інтервалі температур $920\text{--}880^\circ\text{C}$, при ступені деформації $\geq 10\%$.

Виконання чорнової прокатки в дві стадії сприяє формуванню більш дрібного аустенітного зерна, а отже більш дисперсної та однорідної успадкованої феритної структури в готовому прокаті. Товщина підкату повинна бути не менше, ніж трьох кратної від кінцевої товщини.

Рекомендований температурно-деформаційний режим прокатки по проходах в кліті 3170 наведено в табл. 3.

Таблиця 3

Рекомендований температурно-деформаційний режим прокатки в чорновій кліті 3170.

№ проходу	Товщина перед проходом, мм	Товщина після проходу, мм	Ступінь деформації, %	Температура перед проходом, $^\circ\text{C}$	Сила прокатки, МН
1	222	202	9,0	1130	14,07
2	202	183	9,4	1122	14,22
3	183	165	9,8	1117	14,25
4	165	148	10,3	1113	14,24
5	148	132	10,8	1107	14,28
6	132	117	11,4	1102	14,28
7	117	103	12,0	1094	14,38
8	103	90	12,6	1087	14,43
9	90	78	13,3	1076	14,61
10	78	67,5	13,5	1066	14,26
11	67,5	58	14,1	1051	14,46
12	58	49,5	14,7	1037	14,54
Охолодження на рольгангу					
13	49,5	44,5	10,1	917	14,42
14	44,5	40	10,1	902	14,40

Після прокатки в чорновій кліті підкат товщиною 40 мм охолоджується на рольгангу до температури $830\text{--}820^\circ\text{C}$.

Далі підкат надходить до прохідної роликівної пічки, де відбувається вирівнювання температури по перерізу та довжині, а також підігріву бічних кромки.

Температура металу після вирівнювання в роликівній печі повинна становити $835 \pm 5^\circ\text{C}$.

Остаточна прокатка здійснюється в кліті кварто стану Стеккеля.

Прокатка в кліті Стеккеля повинна починатися при температурі $825\text{--}835^\circ\text{C}$, тобто нижче температури повного гальмування рекристалізації аустеніту, і закінчуватися при температурі не менш ніж 810°C . Ступінь деформації по всіх пропусках повинна становити не менше 10%.

В ході реалізації описаних температурно-деформаційних параметрів при чистовій прокатці відбувається витягування аустенітних зерен, межі яких закріплені за допомогою фаз Nb (C, N), що виділяються в процесі прокатки та дозволяють істотно подрібнити успадковане зерно фериту.

Рекомендований температурно-деформаційний режим прокатки по пропусках в кліті 1780, наведений в табл. 4.

Режим деформації розрахований таким чином, щоб останній пропуск виконувався по ходу процесу прокатки.

Змінення температури та сили прокатки по проходах в кліті Стеккеля наведені на рис. 2.

З метою виконання умов термомеханічного процесу прокатки необхідне утримання температури металу по проходах в кліті Стеккеля. Під час моделювання технології утримання температури на потрібному рівні, який є низьким відносно діючої технології, здійснено шляхом регулювання кількості пальників в пічних моталках.

Таблиця 4

Рекомендований режим прокатки в кліті 1780 стану Стеккель

№ проходу	Товщина перед проходом, мм	Товщина після проходу, мм	Ступінь деформації, %	Температура перед проходом, °С	Сила прокатки, МН
1	40	35,5	11,25	830	14,60
2	35,5	31,5	11,27	829	13,97
3	31,5	28	11,11	828	13,22
4	28	24,5	12,50	827	13,75
5	24,5	21,5	12,24	826	12,89
6	21,5	18,5	13,95	825	13,50
7	18,5	16	13,51	824	12,49
8	16	14	12,50	822	11,23
9	14	12	14,29	819	11,87

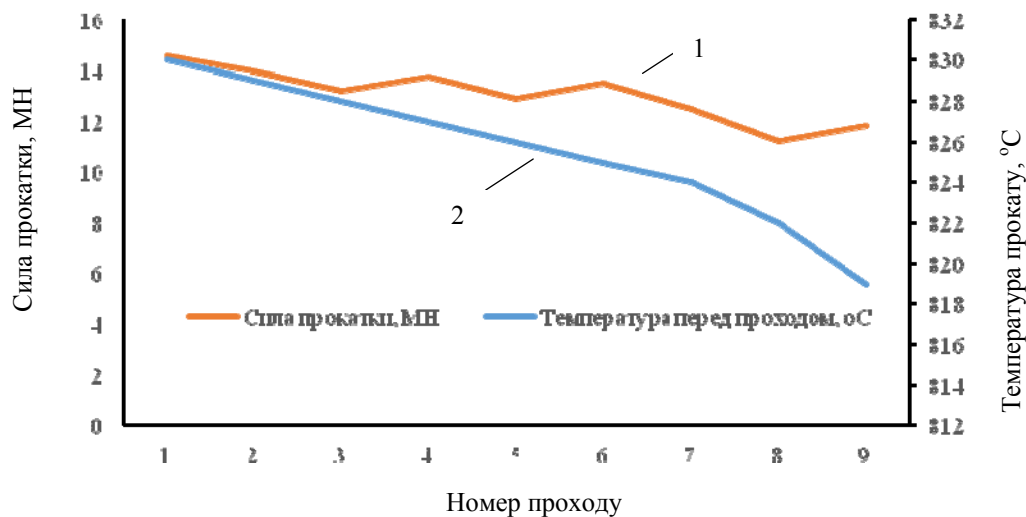


Рис. 2. Динаміка змінення сили прокатки (1) та температури (2) по проходах в кліті Стеккеля

Після прокатки смуга без затримок передається на установку ламінарного охолодження.

Послідовність проходження технологічних агрегатів перед ламінарним охолодженням повинна бути наступною:



З огляду на малу відстань розкочувальних полів, робота всього технологічного обладнання повинна бути синхронізованою.

Охолодження рулонів на установці прискореного охолодження повинно вироблятися зі швидкістю 12–14 °С/сек до температури 560–580 °С.

Прискорене охолодження з нижнього діапазону аустенітної області дозволить сформувати остаточну дисперсну феріто-бейнітну структуру в готовому прокаті. Виділення на даній стадії частинок Nb (С, N) з твердого розчину дозволить значно підвищити міцність металу.

Після прискореного охолодження, смуга змотується в рулон на фінішній моталці.

З метою зменшення товщини шару повітряної окалини, змотані рулони необхідно піддати додатковому контрольованому повітряному охолодженню до температури 400 °С, за допомогою промислових аераторів. Остаточне сповільнене охолодження рулонів виконується на складі протягом 48 годин.

Висновки

1. Вперше для умов стану Стеккеля заводу «Ferriera Valsider» SpA виконано оцінку технічних можливостей та розроблено комплексну технологію для виробництва рулонів категорії міцності Х65 для подальшого вироблення електрозварювальних труб великого діаметру нафто-газового призначення.

2. Вперше для заводу «Ferriera Valsider» SpA виконано розрахунок та встановлена необхідна потужність головних двигунів прокатних станів 3170 та 1780, що дозволить підвищити продуктивність, знизити питомі енерговитрати та підвищити якість продукції, що виробляється.

3. З метою покращення якості поверхні рулонів, вперше для стану Стеккеля запропоновано застосування технології контрольованого повітряного охолодження рулонів після змотування.

Література

1. John G. Lenard. Primer on flat rolling: Second edition / John G. Lenard // Department of Mechanical and Mechatronics Engineering University of Waterloo. Elsevier Ltd. – Ontario, Canada. – 2014. – 404 p.
2. Коновалов Ю.В. Справочник прокатчика. Производство горячекатаных листов и полос : справочное издание в 2-х книгах. Книга 1 / Ю.В. Коновалов. – М. : Теплотехник, 2008. – 640 с.
3. Кнеппе Г. Экономическое производство полос из коррозионной стали на станах Стеккеля / Г. Кнеппе, В. Роде ; пер. с нем. – М. : Metallurgiya, декабрь 1993. – С. 33–43.
4. Bohlin A. New technologies on Avesta Polarit's Steckel rolling mill / A. Bohlin, H. Nygren, O. Jepsen et al. // MPT International. – 2002. – № 6. – P. 56–62.
5. Otavio L. Continuous Steckel mill improvements at ACESITA SA Brazil / L. Otavio, D. Berger, G. Djumljija, F. Reiter, A. Marples, K. Berger // La Revue de Métallurgie. – 2005. – P. 583–588. – DOI: <https://doi.org/10.1051/metal:2005175>.
6. Stalheim D. G. Optimisation considerations for new or revamped plate / D. G. Stalheim // Steckel mills. Institute of Materials, Minerals and Mining Published by Maney on behalf of the Institute. Ironmaking and Steelmaking. – 2009. – VOL 36. NO. 4. – P. 259–264. – DOI 10.1179/174328109X439252.
7. Collins L. E. Production of High Strength Line Pipe Steel by Steckel Mill Rolling and Spiral Forming / L. E. Collins, F. Hamad, M. Kostic, T. Lawrence // Frontier Pipe Research Unit, IPSCO, P. O. Box 1670, 100 Armour Rd, Regina, SK S4P 3C7, Canada. – 2013. – P. 17.
8. Collins L.E. Processing of Niobium-Containing Steels by Steckel Mill Rolling / L.E. Collins // Niobium Science and Technology, Niobium. – Bridgeville. PA. – 2001. – P. 527–542.
9. Robert D. Knutsen. Analysis of Microstructure Evolution during Steckel Mill Rolling of AISI304 Stainless Steel / Robert D. Knutsen, Sa-Aadat Parker // ISIJ International. – 2008. – Vol. 48, No. 2. – P. 200–207. – DOI: <https://doi.org/10.2355/isijinternational.48.200>.
10. John S. Hinton. A Laboratory Steckel Mill Simulation / John S. Hinton, John H. Beynon // Steel research int. 79. – 2008. – NO. 4. – P. 278–286. – DOI: <https://doi.org/10.1002/srin.200806352>.
11. 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.
12. Kukhar V. 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 Mykhailo Ostrohradskyi National University. – 2017. – P. 404–407. – DOI: <https://doi.org/10.1109/MEES.2017.8248945>.
13. 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.
14. 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.
15. Кухар В. В. Розробка технології виробництва листового прокату товщиною 4 мм на стані 3200 заводу Trametall SpA / В. В. Кухар, О. Г. Курпе // Metallurgicheskaya i gornorudnaya promyshlennost'. – 2018. – № 2. – С. 24–29.
16. Kukhar V. Improvement of the Method for Calculating the Metal Temperature Loss on a Coilbox Unit at The Rolling on Hot Strip Mills / Volodymyr Kukhar, Oleksandr Kurpe, Eduard Klimov, Elena Balalayeva, Vladimir Dragobetskii // International Journal of Engineering & Technology. – 2018. – 7 (4.3). – P. 35–39.
17. Курпе О.Г. Освоєння виробництва прокату товщиною 1,2 мм на стані 1700 ПрАТ «ММК ІМЕНІ ІЛЛІЧА» / О.Г. Курпе, В.В. // Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки. – 2018. – № 5 (265). – С. 171–175.

References

1. John G. Lenard. Primer on flat rolling: Second edition / John G. Lenard // Department of Mechanical and Mechatronics Engineering University of Waterloo. Elsevier Ltd. – Ontario, Canada. – 2014. – 404 p.
2. Kononov YU.V. Spravochnik prokatchika. Proizvodstvo goryachekatanykh listov i polos : spravochnoe izdanie v 2-h knigah. Kniga 1 / YU.V. Kononov. – M. : Teplotehnik, 2008. – 640 s.
3. Kneppе G. Ekonomicheskoe proizvodstvo polos iz korrozionnoy stali na stanah Stekkelya / G. Kneppе, V. Rode ; per. s nem. – M. : Metallurgiya, dekabr 1993. – S. 33–43.
4. Bohlin A. New technologies on Avesta Polarit's Steckel rolling mill / A. Bohlin, H. Nygren, O. Jepsen et al. // MPT International. – 2002. – № 6. – P. 56–62.
5. Otavio L. Continuous Steckel mill improvements at ACESITA SA Brazil / L. Otavio, D. Berger, G. Djumljija, F. Reiter, A. Marples, K. Berger // La Revue de Métallurgie. – 2005. – P. 583–588. – DOI: <https://doi.org/10.1051/metal:2005175>.

6. Stalheim D. G. Optimisation considerations for new or revamped plate / D. G. Stalheim // *Steckel mills*. Institute of Materials, Minerals and Mining Published by Maney on behalf of the Institute. Ironmaking and Steelmaking. – 2009. – VOL 36. NO. 4. – P. 259–264. – DOI 10.1179/174328109X439252.
7. Collins L. E. Production of High Strength Line Pipe Steel by Steckel Mill Rolling and Spiral Forming / L. E. Collins, F. Hamad, M. Kostic, T. Lawrence // *Frontier Pipe Research Unit, IPSCO, P. O. Box 1670, 100 Armour Rd, Regina, SK S4P 3C7, Canada*. – 2013. – P. 17.
8. Collins L.E. Processing of Niobium-Containing Steels by Steckel Mill Rolling / L.E. Collins // *Niobium Science and Technology, Niobium*. – Bridgeville. PA. – 2001. – P. 527–542.
9. Robert D. Knutsen. Analysis of Microstructure Evolution during Steckel Mill Rolling of AISI304 Stainless Steel / Robert D. Knutsen, Sa-Aadat Parker // *ISI International*. – 2008. – Vol. 48, No. 2. – P. 200–207. – DOI: <https://doi.org/10.2355/isijinternational.48.200>.
10. John S. Hinton. A Laboratory Steckel Mill Simulation / John S. Hinton, John H. Beynon // *Steel research int*. 79. – 2008. – NO. 4. – P. 278–286. – DOI: <https://doi.org/10.1002/srin.200806352>.
11. Kurpe O. H. Utochnennia rozrakhunku teplovykh vtrat metalu na stanakh Stekkelia / O. H. Kurpe, V. V. Kukhar, Ye. V. Zmaznieva // *Problemy trybolohii = Problems of Tribology*. – 2018. – № 1. – S. 78–84.
12. Kukhar V. 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 MEES2017 / IEEE Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University*. – 2017. – P. 404–407. – DOI: <https://doi.org/10.1109/MEES.2017.8248945>.
13. Maksimenko O. P. Teoreticheskyy analiz momenta pri prokatke s natyajeniem polosy / O. P. Maksimenko, A. G. Prisyajnyiy, V. V. Kukhar, E. V. Kuzmin // *Obrabotka materialov davleniem : sb. nauch. tr. / DGMA. – Kramatorsk : DGMA. – 2017. – № 1 (44). – S. 199–203.*
14. Kukhar V. V. Utochnenie metodiki rascheta teplovykh poter metalla na nepreryivnykh stanah goryachey prokatki / V. V. Kukhar, A. G. Kurpe // *Obrabotka materialov davleniem : sb. nauch. tr. / DGMA. – Kramatorsk : DGMA. – 2018. – № 1 (46). – S. 159–166.*
15. Kukhar V. V. Rozrobka tekhnolohii vyrobnytstva lystovoho prokatu tovshchynoiu 4 mm na stani 3200 zavodu Trametel SpA / V. V. Kukhar, O. H. Kurpe // *Metallurhycheskaia y hornorudnaia promyshlennost*. – 2018. – № 2. – S. 24–29.
16. Kukhar V. Improvement of the Method for Calculating the Metal Temperature Loss on a Coilbox Unit at The Rolling on Hot Strip Mills / Volodymyr Kukhar, Oleksandr Kurpe, Eduard Klimov, Elena Balalayeva, Vladimir Dragobetskii // *International Journal of Engineering & Technology*. – 2018. – 7 (4.3). – P. 35–39.
17. Kurpe O.H. Osvoiennia vyrobnytstva prokatu tovshchynoiu 1,2 mm na stani 1700 PrAT «MMK IMENI ILLICHa» / O.H. Kurpe, V.V. // *Visnyk Khmelnytskoho natsionalnoho universytetu. Tekhnichni nauky*. – 2018. – № 5 (265). – S. 171–175.

Рецензія/Peer review : 15.11.2018 р.

Надрукована/Printed : 18.12.2018 р.
Рецензент: д.т.н., проф. Кухар В.В.