

УДК 669.14.018.291.3:621.771.2.001.5

В. Г. Раздобреєв, к.т.н., с.н.с., ORCID 0000-0001-7402-7992**Д. Г. Паламар**, м.н.с., ORCID 0000-0002-9503-3248**К. Ю. Клочніков**, м.н.с., ORCID 0000-0003-2465-3244**О. І. Лещенко**, м.н.с., ORCID 0000-0003-1877-8358*Інститут чорної металургії ім. З. І. Некрасова НАН України*

ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ГАРЯЧОЇ СОРТОВОЇ ПРОКАТКИ ПРИ ВИРОБНИЦТВІ КОРОЗИЙНОСТІЙКОГО І ВОГНЕСТІЙКОГО АРМАТУРНОГО ПРОКАТУ

Анотація. Метою роботи є адаптування розробленої у Відділі Обробки Металів Тиском (ВОМТ) ІЧМ НАНУ комп'ютерної математичної моделі процесу безперервної сортової прокатки для дослідження та прогнозування механічних властивостей стійкого до корозійного руйнування і вогнестійкого арматурного прокату. В останній час у світі в якості матеріалу для такого виробництва арматурного прокату використовують нержавіючі марки сталі. Такий прокат, зазвичай, застосовують при будівництві відповідальних споруд спеціального призначення подібних об'єктів. На жаль, в Україні арматурний прокат з нержавіючих марок сталей не виробляють. Тому актуальним є визначення параметрів технології гарячої сортової прокатки та подальшої термічної обробки з прокатного нагріву при виробництві стійкого до корозійного руйнування і вогнестійкого арматурного прокату з нержавіючих марок сталі. Аналітичні дослідження проводили за допомогою розробленої в ІЧМ НАН України математичної моделі для прогнозування механічних властивостей, адаптованої до умов дрібносортового стану 250-1 ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг». Встановлено, що при виробництві термічно зміцненого арматурного прокату періодичного профілю діаметром 12 мм (температура початку прокатки 1150 °С та швидкості прокатки 12,5 м/с) діюча технологія не дозволяє отримати готовий прокат вище класу А500 за нормами ДСТУ 3760:2019. Це обумовлено високими значеннями температури кінця прокатки $T_{к.пр.}=1095-1109$ °С. Усі досліджувані нержавіючі марки сталі мають розрахункові значення температури кінця прокатки на 22-32 °С вище ніж для низьколегованих марок сталей. Аналіз результатів досліджень показав, що при зниженні початкової температури прокатки і подальшого термічного зміцнення арматурного прокату № 12 з нержавіючих марок сталей, наприклад, за режимом зміцнення для класу А600, дозволяє отримати готовий корозійно- і вогнестійкий арматурний прокат, який має умовну границю плинності вище 600 Н/мм². У той же час розрахункові значення пластичних характеристик у середньому в 2 рази вищі за нормовані значення цих властивостей ДСТУ 3760:2019.

Ключові слова: арматурний прокат, корозійна стійкість, нержавіюча сталь, гаряча сортова прокатка, математичне моделювання, температура, механічні властивості.

Посилання для цитування: Раздобрєєв В. Г., Паламар Д. Г., Ключніков К. Ю., Лещенко О. І. Дослідження технологічних параметрів гарячої сортової прокатки при виробництві корозійностійкого і вогнестійкого арматурного прокату. *Фундаментальні та прикладні проблеми чорної металургії*. 2022. Вип. 36. С. 265-284. DOI: 10.52150/2522-9117-2022-36-265-284.

Вступ. В даний час виникла тенденція і потреба застосування для залізобетонних конструкцій арматурного прокату з високими характеристиками міцності і пластичності, який володіє поліпшеним комплексом споживчих властивостей: гарна зварюваність для надійного з'єднання арматурного прокату та його елементів; вогнестійкість при будівництві висотних будівель; стійкість проти корозії в умовах водневої деполяризації для морських споруд; стійкість проти корозії під напругою для попередньо-напруженого залізобетонних конструкцій і гідротехнічних споруд; пластичність ($\delta_{\max} \geq 5\%$ і вище) і сейсмостійкість для будівель, які зводяться в сейсмічних районах, а також військового призначення; стійкість проти багатоциклової втоми; холодостійкий арматурний прокат підвищеної надійності і т.д.

Конструкційні сталі використовують в гарячекатаному стані, термічно зміцненому стані або піддані після гарячої прокатки деформуванню в холодному стані. Проведення операцій термічної обробки або деформування в холодному стані конструкційних сталей дозволяє істотно підвищити їх властивості міцності при задовільних значеннях пластичних характеристик. Легування і мікролегування гарячекатаних конструкційних сталей дозволяє також підвищити міцність і пластичні властивості готового металопродукату, але при цьому істотно здорожує вартість готового прокату [1].

Конструкційна сталь масового виробництва і застосування при всіх її перевагах має і дуже серйозний недолік: вона схильна до корозійного руйнування в результаті впливу різних видів атмосферної, водної, морської, ґрунтової, щілинної, виразкової корозії, корозійного розтріскування під напругою, водневого, сольового, лужного окрихчування та ін. Корозійні процеси руйнування, поглиблюються в останні десятиліття стійким погіршенням екології навколишнього середовища практично у всіх промислово розвинених країнах, знищують за рік до 20 % щорічного світового виробництва заліза і сталі і завдають шкоди, що обчислюється в 3,5- 5 % річного національного доходу. За даними експертних оцінок в Україні збитки від корозії становить 10-15 % всієї продукції чорних металів. Вартість протикорозійного захисту в хімічній, нафтохімічній, металургійній промисловості досягає 10-15 % загальної вартості будівельних конструкцій. Кожні три роки необхідно перефарбовувати 75 % металопродукції і 10-20 % замінювати їх через корозійного зносу [2]. А у Великій Британії за оцінкою проф. Скаллі [3]

щорічні непрямі втрати від корозії і вартість заходів протикорозійного захисту складає 1365 млн. фунтів стерлінгів. У зв'язку з величезними як прямими (втрата сталевого металофонду), так і непрямі (ремонт і заміна будівельних конструкцій, трубопроводів, комунальних мереж міст, промислових підприємств, житлових масивів, обладнання, транспортних засобів і т.п.) збитками, боротьбі з корозією під усьому світі приділяється серйозна увага і виділяються великі кошти для проведення наукових досліджень і розробок в цьому напрямку [4].

Не менш гостро в усьому світі стоїть питання і вогнестійкості готового арматурного прокату. Під вогнестійкістю розуміють здатність будівельної конструкції чинити опір дії високої температури в умовах пожежі і виконувати при цьому звичайні експлуатаційні функції. За вогнезбереження залізобетонної конструкції приймається такий стан металу, при якому залишкова міцність або незворотні деформації забезпечують надійну роботу після пожежі. При будівництві високоповерхових будівель необхідно і доцільно розглядати застосування арматурного прокату з урахуванням його високотемпературної вогнестійкості [5].

За кордоном в останні роки велика увага приділяється проектуванню та будівництву будівель і споруд з поліпшеним комплексом споживчих властивостей, призначених, зокрема, для роботи в умовах корозійних і пожежонебезпечних середовищах [4, 5]. В Україні в даний час такі розробки не ведуться. У зв'язку з такими вимогами до експлуатаційних характеристик арматурного прокату в усі нормативно-технічні документації на виробництво готового прокату США, Великобританії, Німеччини, Франції, Японії та ін. країн внесені обов'язкові додаткові норми щодо визначення корозійної стійкості, вогнестійкості та ін. У Міждержавному стандарті ГОСТ 34028-2016 «Прокат арматурный для железобетонных конструкций», який набрав чинності 01.01.2019 р. на заміну ГОСТ 5781-82 та ГОСТ 10884-94 і розроблений на основі ГОСТ Р 52544-2006 також поряд з набором технічних вимог за механічними властивостями арматурного прокату відповідно до Розділу 6 додатково нормується стійкість до корозійного розтріскування, зварюваність, категорії пластичності, витривалість при багаторазово повторюваних циклічних навантаженнях, релаксації напружень. В Україні в чинному стандарті ДСТУ EN 10080 «Сталь для армування бетону. Зварювальний арматурна сталь. Загальні технічні умови» та ДСТУ 3760:2019 вимог щодо корозійної стійкості і вогнестійкості немає.

Таким чином, дослідження сучасних способів виробництва стійкого до корозії і високих температур експлуатації арматурного прокату, є питанням актуальним.

Мета роботи. З використанням розроблених у Відділі Обробки Металів Тиском (ВОМТ) ІЧМ НАНУ комп'ютерних програм дослідити

технологічні параметри гарячої сортової прокатки при виробництві стійкого до корозійного руйнування і вогнестійкого арматурного прокату.

Результати дослідження. Дослідження технологічних параметрів гарячої сортової прокатки при виробництві стійкого до корозійного руйнування і вогнестійкого арматурного прокату проводили за допомогою математичної моделі розрахунку безперервної сортової прокатки та комп'ютерної програми «ТермоLab», які розроблені в відділі процесів і машин обробки металів тиском (ВОМТ) Інституту чорної металургії НАН України і перевірені у промислових умовах діючих металургійних підприємств України, Республіки Білорусь, Республіки Молдова [6-11].

Виробництво арматурного прокату з легованих сталей має ряд специфічних особливостей, які ускладнюють технологічний процес. Багато легованих сталей мають підвищений опір деформації, низьку температуру початку деформації, вузький інтервал температур деформації, малу пластичність, високу чутливість до напруг.

У багатьох таких сталей спостерігається схильність до виникнення тріщин при охолодженні, до випадання надлишкових фаз (карбідів і інтерметалевих з'єднань), що погіршують якість готового металопрокату, до утворення великого розміру зерна, невиправного при подальшій термообробці (однофазні сталі), до зневуглицювання. Іншим сталям властиві висока температура рекристалізації і мала швидкість цього процесу. Є сталі, що володіють підвищеним розширенням і зниженим коефіцієнтом контактного тертя.

Особливості легованих сталей і сплавів [12-16]:

1. Багато легованих сталей мають підвищений опір деформації, обумовлене хімічним складом і структурою.

Підвищеним опором деформації мають багатофазні сталі, які при температурі деформації мають в структурі надлишкові складові у вигляді карбідів, силіцидів, інтерметалевих з'єднань і інших фаз. Опір деформації зростає зі збільшенням легування аустеніту.

Верхня межа температури деформації визначається температурою перепаду, яка на 100-200 °С нижче температури плавлення, при цьому $T_{пл}$ тим нижче, чим більше ступінь легування сталі.

Для багатьох легованих сталей встановлюють і нижню межу температури деформації. У всіх випадках, коли сталі мають високу температуру рекристалізації, температура кінця прокатки $T_{к.пр.}$ встановлюється трохи вище цієї температури. Прокатка при температурах нижче температури початку рекристалізації пов'язана зі зміцненням сталі і підвищенням σ_s .

Для однофазних сталей нижню межу температури ОМТ для зменшення розмірів зерна встановлюють більш низькою. У цих сталей, наприклад, феритних, не відбувається перекристалізації при

термообробці. Структура сталі знаходиться в прямій залежності від температури і ступеня деформації і визначається процесом рекристалізації, при якому зі збільшенням $T_{к.пр}$ збільшується розмір зерен. При зменшенні $T_{к.пр}$ забезпечується отримання дрібної і рівномірної структури деформованої сталі [17-23].

У багатофазних сталях зниження температури прокатки $T_{к.пр}$ призводить до випадання в структурі надлишкових фаз, наприклад, цементитної сітки у високовуглецевих сталей, σ_s зростає, тому $T_{к.пр}$ намагаються підтримувати більш високою, ніж температура, при якій випадають надлишкові фази.

2. Є багато легованих сталей і сплавів які мають знижену пластичність, їх деформація часто супроводжується порушенням суцільності. Ці сплави відносять до важкодеформованих.

Великий вплив на пластичність надають ті легуючі елементи, які при температурах деформації утворюють надлишкові фази різного складу, що може призводити до розривів при деформації.

Великий вплив на пластичність надає схема напруженого стану. Крайшою є схема всебічного стиснення, яка при прокатці реалізується в багатовалкових калібрах. Наявність напруг, що розтягують, наприклад, натягу різко знижує пластичність.

При відносно низькій верхній межі температур деформації і високій нижній межі температурний інтервал пластичності звужується до 80-50 °С. Для цих сталей і сплавів дуже важливо строго витримувати режим нагріву і застосовувати спеціальні заходи для підтримки температури металу уздовж лінії стану.

3. Режим нагріву заготовок визначає знеуглецьованість готового прокату і втрати металу в окалину, багато сталей вимагають повільного нагріву в зв'язку з високою чутливістю до термічних напруг.

4. Особливе значення має підтримання температури кінця прокатки в заданих межах. Це необхідно для запобігання утворення випадання небажаних надлишкових фаз або формування дуже великого зерна, не виправного при подальшій термообробці. У цих випадках $T_{к.пр}$ повинна бути по можливості більш низькою, для чого на безперервних швидкісних станах слід застосовувати спеціальні пристрої для охолодження розкату в процесі прокатки, особливо перед останніми проходами.

5. Висока чутливість до напруг, схильність до виникнення тріщин при охолодженні є особливістю багатьох легованих сталей. Для отримання якісної продукції з заданими структурою і властивостями в залежності від хімічного складу сталі і призначення готової продукції після прокатки з необхідною $T_{пр}$ і $T_{к.пр}$ арматурний прокат піддається охолодженню за спеціальними режимами: уповільнене і прискорене охолодження прокату, загартування з подальшим самовідпуском [17, 18, 21, 23].

При виконанні цього розділу розрахунки температурних-

деформаційних, та енергосилових параметрів гарячої прокатки та моделювання механічних властивостей готового арматурного прокату були адаптовані до промислових умов роботи дрібносортового ДС 250-1 ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг», як провідного підприємства по виробництву арматурного прокату в Україні. Розрахунок енергосилових параметрів гарячої прокатки арматурного прокату періодичного профілю №12, як найбільш представницькі виконували згідно з діючими таблицями калібровок при виробництві вказаних профілерозмірів. Безперервний дрібносортний стан 250-1 (ДС 250-1) – двонитковий, має в своєму складі 23 робочі кліті (15 горизонтальних і 8 вертикальних), які об'єднані в чорнову групу, що складається з 7 горизонтальних клітей і дві чистові групи, що складаються з 8 вертикальних і горизонтальних клітей, які чергуються між собою. Максимально допустимі значення енергосилових параметрів процесу прокатки, виходячи з особливостей технологічного обладнання лінії стану 250-1, наведені в табл. 1.

Таблиця 1 – Максимально допустимі значення параметрів обладнання і енергосилових параметрів процесу прокатки сортових профілів в умовах стану ДС 250-1.

Номер і тип кліті	Момент прокатки по шпинделю, кН×м	Потужність двигуна, кВт	Струмове навантаження, А	Зусилля по клітям, кН
1г	71,5	75	145	1500
2г	71,5	430	800	1500
3г	71,5	560	1060	1500
4г	71,5	680	1260	1500
5г	71,5	680	1260	1100
6г	71,5	870	1580	1100
7г	71,5	870	1580	1100
8в	31,7	200	735	600
9г	31,7	435	800	660
10в	31,7	200	735	660
11г	31,7	580	1060	600
12в	31,7	200	735	600
13г	31,7	580	1060	600
14в	31,7	200	735	600
15г	19,3	580	1060	460

З метою забезпечення певного «запасу міцності», як правило, номінальні значення параметрів становлять близько 70- 80 % від максимально допустимих значень. У табл. 2 наведені номінальні значення енергосилових параметрів, що становлять 75 % від максимально допустимих значень (див. табл. 1), які на практиці використовуються та

дотримуються при виробництві сортових профілів в умовах дрібносортового стану ДС 250-1 ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг».

Для проведення обчислювальних експериментів до бази даних про хімічний склад, базовий опір деформації σ_0 , теплофізичних властивостей і т.д. сталей, які досліджуються, було додано дані найпоширеніших у світі при виробництві арматурного прокату з корозійностійких і вогнестійких сталей таких марок: AISI304, 1.4301, 1.4362, 1.4462, 08X18H10T, 03X18H11 та інш. [4, 5]. Нержавіючі сталі марок 1.4301, AISI304, 08X18H10T, 03X18H11 – належать до сталей аустенітного класу, а нержавіючі сталі марок 1.4362 і 1.4462 – належать до сталей аустеніто-феритного класу (дуплекс-сталі).

Таблиця 2 – Номінальні значення параметрів обладнання і енергосилових параметрів процесу прокатки сортових профілів в умовах стану 250-1.

Номер і тип кліті	Момент прокатки по шпindelю, кН×м	Потужність двигуна, кВт	Струмове навантаження, А	Зусилля по клітям, кН
1г	53,6	56	109	1125
2г	53,6	323	600	1125
3г	53,6	420	795	1125
4г	53,6	510	945	1125
5г	53,6	510	945	825
6г	53,6	653	1185	825
7г	53,6	653	1185	825
8в	23,8	150	551	450
9г	23,8	326	600	495
10в	23,8	150	551	495
11г	23,8	435	795	450
12в	23,8	150	551	450
13г	23,8	435	795	450
14в	23,8	150	551	450
15г	14,6	435	795	345

Аустенітні нержавіючі сталі зберігають високі механічні властивості при підвищених температурах: границя плинності і тимчасовий опір знижуються лише поступово при підвищенні температури, тоді як у вуглецевих сталей ці властивості різко падають при температурах вище 500 °С. Крім того будівельні конструкції, армовані нержавіючою сталлю, менш схильні до розтріскування бетону завдяки мінімальному утворенню оксидів на поверхні арматури при високих температурах. Обидва ці фактори сприяють кращому збереженню цілісності конструкції в разі пожежі. Однак гарячекатані прутки з аустенітної сталі зазвичай мають більш низьку границю плинності через процес рекристалізації, який протікає при гарячій обробці тиском. Для підвищення міцності в

гарячекатаному стані потрібна модифікація хімічного складу або регулювання режиму гарячої прокатки з метою зменшення розміру зерна (ефект Холла-Петча) або навіть гальмування рекристалізації. Зниження температури кінця прокатки дозволяє отримати частково рекристалізовану мікроструктуру зі збереженням деякої деформації в структурі і підвищений рівень границі плинності. Границя плинності двофазних (дуплекс) сталей приблизно вдвічі вище, ніж у аустенітних в стані відпалу. Термомеханічна обробка в потоці прокатки (гартування від 950-1050 °С з подальшим самовідпуском) з контрольованою гарячою прокаткою, яка може бути застосована до двофазних нержавіючих сталей, також дозволяє досягти високої міцності [17, 18, 21, 23]. Зі зниженням температури кінця прокатки підвищується твердість фази аустеніту.

Для порівняння виконали аналітичні дослідження технологічних параметрів гарячої сортової прокатки з відомих економнолегованих сталей стійких до корозійного руйнування та пожежної небезпеки [4, 5]. В табл. 3 і 4 наведено розрахункові значення зусиль та температурні параметри по клітям при гарячій прокатці арматурного прокату.

Таблиця 3 – Розрахункові значення зусиль по клітям ДС 250-1 в процесі гарячої безперервної сортової прокатки арматурного прокату № 12 за діючим технологічним режимом прокатки ($T_{n,пр.}=1150$ °С – температура початку прокатки).

№ кліті	Зусилля прокатки, кН								
	Марка сталі								
	1.4301	AISI304	08X18H10T	03X18H11	1.4362	1.4462	20Г2СФБА	10ГС2	20ХГС2
1Г	604	387	602	603	623	640	429	422	437
2Г	769	475	767	768	791	812	544	534	556
3Г	796	521	794	795	814	830	604	593	617
4Г	786	543	785	785	799	813	629	619	641
5Г	439	302	438	439	447	454	349	343	356
6Г	494	343	492	492	503	511	392	386	398
7Г	292	213	291	291	297	301	241	238	245
8В	412	335	411	412	415	419	373	369	377
9Г	217	179	216	216	219	221	196	195	198
10В	188	154	187	187	190	193	165	164	166
11Г	129	115	129	129	130	132	122	121	122
12В	118	100	118	118	120	122	104	103	104
13Г	78	74	78	78	79	80	76	76	76
14В	130	119	130	130	131	133	122	122	122
15Г	97	93	97	97	97	98	95	95	95

Таблиця 4 – Розрахункові значення розподілу температури уздовж лінії стану ДС 250-1 в процесі гарячої безперервної сортової прокатки арматурного прокату №12 за діючим технологічним режимом прокатки ($T_{n,пр.}=1150$ °С – температура початку прокатки).

№ кліті	Температура по клітям, °С								
	Марка сталі								
	1.4301	AISI304	08X18H10T	03X18H11	1.4362	1.4462	20Г2СФБА	10ГС2	20ХГС2
1Г	1146	1146	1148	1147	1148	1148	1146	1146	1146
2Г	1133	1127	1129	1121	1130	1130	1128	1128	1128
3Г	1109	1095	1106	1101	1107	1107	1098	1097	1098
4Г	1101	1076	1092	1088	1094	1095	1081	1081	1082
5Г	1090	1066	1087	1085	1089	1090	1073	1072	1074
6Г	1087	1055	1081	1081	1083	1085	1063	1062	1064
7Г	1081	1049	1079	1078	1087	1089	1059	1057	1060
8В	1082	1051	1091	1090	1093	1095	1062	1061	1064
9Г	1077	1054	1090	1088	1090	1094	1067	1060	1064
10В	1082	1048	1087	1084	1093	1095	1065	1063	1064
11Г	1091	1051	1090	1090	1090	1096	1061	1059	1062
12В	1088	1046	1087	1087	1087	1091	1058	1058	1060
13Г	1085	1043	1084	1083	1087	1092	1058	1056	1059
14В	1089	1047	1089	1086	1092	1095	1062	1060	1064
15Г	1095	1060	1102	1100	1105	1109	1075	1073	1077

З аналізу даних табл. 3 видно, що розрахункові значення зусиль прокатки при температурі початку гарячої безперервної сортової прокатки $T_{n,пр.}=1150$ °С з нержавіючих марок сталей, окрім нержавіючої сталі марки AISI304, більші ніж при прокатці економноколегованих марок сталей. В результаті розрахунків встановлено, що значення зусиль гарячої прокатки нержавіючих і економноколегованих марок сталі при температурі початку прокатки $T_{n,пр.}=1150$ °С не перевищують номінальних значень зусиль для усіх робочих клітей стану ДС 250-1. Підвищення розрахункових зусиль при переході від кліті № 7 до клітей № 8 пояснюється охолодженням розкату у міжклітьовому проміжку клітей 7–8, довжина якої значно більше (13 м) в порівнянні з іншими міжклітьовими проміжками в лінії стану (3 м).

Температурний режим прокатки безперервних сортових станів має характерні особливості. Так з аналізу розрахункових значень середньомасових температур (див. табл. 4) бачимо, що спочатку, у чорнових і часті робочих клітей чистових груп відбувається зниження температури металу, що прокатується, а потім температура розкату

починає зростати. При цьому, за винятком нержавіючої сталі марки AISI304, усі досліджувані нержавіючі марки сталей мають розрахункові значення температури кінця прокатки на 22-32 °С вище ніж для економнолегованих марок сталей. Однак температура кінця прокатки для нержавіючих марок сталей доволі велика ($T_{к.пр.}=1095-1109$ °С), щоб проводити термічне зміцнення в потоці прокатки з прокатного нагрівання ($T_{к.пр.}=950-1050$ °С). В табл. 5 наведено розрахункові значення механічних властивостей гарячекатаного (чисельник) і термічно зміцненого (знаменник) за режимами термічного зміцнення, які діють при виробництві арматурного прокату №12 класу А500, А600, А800 і А1000 в потоці прокатки в умовах ДС 250-1 ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг» з нержавіючих та економнолегованих марок сталей.

Таблиця 5 – Розрахункові значення механічних властивостей гарячекатаного (чисельник) і термічно зміцненого (знаменник) арматурного прокату №12 з нержавіючих та економнолегованих марок сталей з початковою температурою прокатки $T_{н.пр.}=1150$ °С в умовах ДС 250-1.

Показник	Марка сталі								
	1.4301	AISI304	08X18H10T	1.4362	1.4462	03X18H11	20Г2СФБА	10ГС2	20ХГС2
σ_B , Н/мм ²	$\frac{505}{541}$	$\frac{515}{522}$	$\frac{512}{544}$	$\frac{635}{674}$	$\frac{677}{719}$	$\frac{508}{534}$	$\frac{628}{862}$	$\frac{490}{1010}$	$\frac{825}{1420}$
$\sigma_T(0,2)$, Н/мм ²	$\frac{197}{232}$	$\frac{205}{221}$	$\frac{194}{241}$	$\frac{445}{511}$	$\frac{486}{562}$	$\frac{204}{225}$	$\frac{463}{752}$	$\frac{345}{806}$	$\frac{483}{1210}$
δ_5 , %	$\frac{46,7}{45,1}$	$\frac{45}{45,6}$	$\frac{46,1}{45,3}$	$\frac{41,1}{38,2}$	$\frac{38,6}{35,5}$	$\frac{44,2}{40,1}$	$\frac{24,7}{15,7}$	$\frac{21,0}{15,8}$	$\frac{20,1}{12,75}$
$\sigma_B/\sigma_T(0,2)$	$\frac{2,56}{2,33}$	$\frac{2,5}{2,36}$	$\frac{2,64}{2,26}$	$\frac{1,43}{1,32}$	$\frac{1,39}{1,28}$	$\frac{2,49}{2,4}$	$\frac{1,36}{1,15}$	$\frac{1,42}{1,25}$	$\frac{1,7}{1,17}$

Аналіз даних табл. 5 показує, що в гарячекатаному стані нержавіючі та економнолеговані сталі не досягають рівень розрахункових значень механічних властивостей, які гарантують отримання арматурного прокату (за мінімальним значенням границі плинності $\sigma_T \geq 500$ Н/мм²) класу А500. Однак, треба відзначити, що пластичні властивості (δ_5 та σ_B/σ_T) арматурного прокату з нержавіючих марок сталей в 1,89-1,94 рази вище ніж такого ж прокату з економнолегованих марок сталей. Термічне зміцнення з прокатного нагріву дозволяє отримати арматурний прокат з економнолегованих марок сталей класу А600К (сталь 20Г2СФБА та 10ГС2) і А800К (сталь марки 20ХГС2). Термічне зміцнення арматурного прокату з нержавіючих марок сталей, за виключенням аусенітоферитних марок (дуплекс сталі) 1.4362 і 1.4462, з початковою

температурою прокатки $T_{n,пр.}=1150\text{ }^{\circ}\text{C}$ не дозволяє отримувати прокат класу А500. При цьому пластичні властивості термічно зміцненого арматурного прокату з цих сталей мають дуже високий рівень. Такий низький розрахований рівень характеристик міцності пов'язано з високою температурою кінця прокатки (див. табл. 4).

З метою оцінки можливості отримання температури кінця прокатки в діапазоні $950\text{-}1050\text{ }^{\circ}\text{C}$ при прокатці нержавіючих марок сталей для подальшої термічної обробки в потоці дрібносортового стану провели аналітичні дослідження по впливу зміни температури початку прокатування на зміну температури кінця прокатки. При виконанні досліджень моделювали умови прокатки нержавіючих марок сталей з початковою температурою $1050\text{ та }950\text{ }^{\circ}\text{C}$ при швидкості прокатки $12,5\text{ м/с}$ при виробництві термічно зміцненого арматурного прокату №12 класу А600. В табл. 6 і 7 наведено розрахункові значення зусиль та температурні параметри по клітям при гарячій прокатці арматурного прокату №12 з початковою температурою прокатці $1050\text{ }^{\circ}\text{C}$ та швидкості прокатки $12,5\text{ м/с}$, а табл. 8 і 9 наведено розрахункові значення тих же параметрів з початковою температурою прокатці $950\text{ }^{\circ}\text{C}$ та швидкості прокатки $12,5\text{ м/с}$. Так при зниженні значення початкової температури з $1150\text{ до }1050\text{ }^{\circ}\text{C}$ (зменшення значення початкової температури прокатки на $100\text{ }^{\circ}\text{C}$) для усіх нержавіючих марок сталей, окрім сталі марки.

Таблиця 6 – Розрахункові значення зусиль по клітям ДС 250-1 в процесі гарячої безперервної сортової прокатки арматурного прокату №12 з нержавіючих марок сталей при температурі початку прокатки $T_{n,пр.}=1050\text{ }^{\circ}\text{C}$.

№ кліті	Зусилля прокатки, кН					
	Марка сталі					
	1.4301	AISI304	08X18H10T	03X18H11	1.4362	1.4462
1Г	833	440	830	831	861	886
2Г	1027	545	1023	1024	1060	1091
3Г	1035	590	1032	1034	1062	1085
4Г	983	614	981	982	1003	1022
5Г	533	343	532	533	545	556
6Г	586	391	583	584	598	610
7Г	339	242	339	339	346	352
8В	468	374	467	468	473	478
9Г	240	200	240	240	243	246
10В	205	173	204	204	208	211
11Г	139	127	139	139	141	142
12В	127	112	126	126	129	131
13Г	82	81	82	83	83	84
14В	137	131	137	137	139	141
15Г	101	101	101	100	102	102

Таблиця 7 – Розрахункові значення розподілу температури уздовж лінії стану ДС 250-1 в процесі гарячої безперервної сортової прокатки арматурного прокату №12 з нержавіючих марок сталей при температурі початку прокатки $T_{н.пр.}=1050$ °С.

№ кліті	Температура по клітям, °С					
	Марка сталі					
	1.4301	AISI304	08X18H10T	03X18H11	1.4362	1.4462
1Г	1050	1050	1050	1050	1050	1050
2Г	1028	1025	1028	1028	1029	1029
3Г	1020	1001	1020	1020	1021	1022
4Г	1015	989	1015	1015	1017	1018
5Г	1016	984	1016	1016	1018	1020
6Г	1016	977	1016	1016	1018	1020
7Г	1019	975	1018	1018	1021	1024
8В	1030	981	1030	1030	1033	1036
9Г	1040	988	1040	1040	1043	1046
10В	1040	987	1040	1040	1044	1047
11Г	1045	991	1045	1045	1049	1052
12В	1043	989	1042	1043	1045	1049
13Г	1042	987	1041	1042	1046	1050
14В	1049	996	1049	1049	1053	1057
15Г	1065	1012	1064	1064	1069	1073

Таблиця 8 – Розрахункові значення зусиль по клітям ДС 250-1 в процесі гарячої безперервної сортової прокатки арматурного прокату №12 з нержавіючих марок сталей при температурі початку прокатки $T_{н.пр.}=950$ °С.

№ кліті	Зусилля прокатки, кН					
	Марка сталі					
	1.4301	AISI304	08X18H10T	03X18H11	1.4362	1.4462
1Г	1133	518	1128	1129	1176	1214
2Г	1354	641	1347	1349	1402	1449
3Г	1329	687	1324	1325	1367	1401
4Г	1218	708	1214	1214	1246	1272
5Г	643	394	642	642	658	673
6Г	689	449	687	687	705	720
7Г	392	275	392	392	400	408
8В	530	420	530	529	536	543
9Г	267	223	267	267	270	274
10В	224	194	223	224	228	231
11Г	151	141	151	151	153	154
12В	136	124	136	136	139	141
13Г	88	90	88	88	89	90
14В	146	144	146	145	148	149
15Г	106	110	106	105	107	107

Таблиця 9 – Розрахункові значення розподілу температури уздовж лінії стану ДС 250-1 в процесі гарячої безперервної сортової прокатки арматурного прокату №12 з нержавіючих марок сталей при температурі початку прокатки $T_{н.пр.}=950$ °С.

№ кліті	Температура по клітям, °С					
	Марка сталі					
	1.4301	AISI304	08X18H10T	03X18H11	1.4362	1.4462
1Г	950	950	950	950	950	950
2Г	936	931	936	936	937	937
3Г	944	916	943	943	945	947
4Г	947	909	947	947	950	952
5Г	955	909	955	955	958	961
6Г	961	906	960	960	964	967
7Г	968	908	968	968	972	975
8в	985	920	985	985	972	993
9Г	999	931	999	999	1004	1008
10в	1002	932	1002	1002	1007	1011
11Г	1010	940	1009	1009	1014	1019
12в	1008	939	1007	1008	1013	1017
13Г	1010	942	1010	1010	1015	1020
14в	1019	952	1019	1019	1024	1029
15Г	1036	972	1036	1036	1042	1047

Результати спільного аналізу даних табл. 2, 3, 6 і 8 показали, що при зниженні значення початкової температури прокатки з 1150 до 1050 та 950 °С (зменшення значення початкової температури прокатки на 100 і 200 °С відповідно) розрахункові значення зусиль по клітям ДС 250-1 в процесі гарячої безперервної сортової прокатки арматурного прокату №12 з нержавіючих марок сталей зростають, окрім нержавіючої сталі марки AISI304.

Розрахункові значення зусиль для робочої кліті №8 (див. табл. 6 виділено напівжирним шрифтом) перевищують номінальні значення зусиль для цієї робочої кліті (див. табл. 2).

При зниженні значення початкової температури з 1150 до 950 °С (зменшення значення початкової температури прокатки на 200 °С) для усіх нержавіючих марок сталей, окрім сталі марки AISI304, розрахункові значення зусиль для робочих клітей №№1-4 та №8 (див. табл. 8 виділено напівжирним шрифтом) перевищують номінальні значення зусиль для цих робочих клітей (див. табл. 2).

З спільного аналізу даних табл. 4 і 7 встановлено, що при зниженні початкової температури прокатки з 1150 до 1050 °С (зменшення значення початкової температури прокатки на 100 °С) змінюється характер зміни температури розкату з нержавіючих марок сталей уздовж лінії стану, окрім сталі марки AISI304: по мірі зниження початкової температури

прокатці збільшується розігрів металу при переході до кожній послідуєчій робочій кліті. Так, вже при початковій температурі прокатки 1050 °С розрахункова температура прокатці на виході зі стану перевищує початкову температуру розкату на 14-23 °С відповідно для різних нержавіючих марок сталей.

З спільного аналізу даних табл. 4 і 9 встановлено, що при зниженні початкової температури прокатки з 1150 до 950 °С (зменшення значення початкової температури прокатки на 200 °С) характер зміни температури розкату з нержавіючих марок сталей уздовж лінії стану зберігається, як і при зниженні початкової температури прокатки з 1150 до 1050 °С. По мірі зниження початкової температури збільшується розігрів металу при переході до кожній послідуєчій робочій кліті при початковій температурі прокатці 950 °С розрахункова температура на виході зі стану перевищує її на 22 °С для сталі марки AISI304 та на 86-97 °С для інших дослідних нержавіючих марок сталей. При цьому, при початковій температурі прокатки 950 °С йде більший процес розігріву розкату на виході зі стану (підвищення температури прокатки нержавіючих сталей на 86-97 °С) в порівнянні з початковою температурою прокатки 1050 °С (підвищення температури прокатки нержавіючих сталей на 14-23 °С). В той же час розрахована кінцева температура прокатки (при початковій температурі прокатки 950 °С) нижче ніж розрахована кінцева температура прокатки (при початковій температурі прокатки 1050 °С) на 26-28 °С.

В табл. 10 наведено розрахункові значення механічних властивостей термічно зміцненого арматурного прокату №12 від початкової температури прокатки $T_{n, np.}=1050$ °С (чисельник) та початковою температурою прокатки $T_{n, np.}=950$ °С (знаменник) в потоці прокатки в умовах ДС 250-1 ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг» з нержавіючих марок сталей.

Таблиця 10 – Розрахункові значення механічних властивостей термічно зміцненого арматурного прокату з нержавіючих марок сталей з початковою температурою прокатки $T_{n, np.}=1050$ °С (чисельник) та початковою температурою прокатки $T_{n, np.}=950$ °С (знаменник) в умовах ДС 250-1.

Показник	Марка сталі					
	1.4301	AISI304	08X18H10T	03X18H11	1.4362	1.4462
σ_B , Н/мм ²	<u>637</u> 693	<u>574</u> 618	<u>645</u> 773	<u>555</u> 590	<u>680</u> 810	<u>784</u> 938
$\sigma_{0,2}$, Н/мм ²	<u>379</u> 457	<u>358</u> 399	<u>340</u> 530	<u>205</u> 250	<u>488</u> 620	<u>610</u> 762
δ_5 , %	<u>42,3</u> 40,4	<u>43,6</u> 41,9	<u>50,3</u> 39,5	<u>60,0</u> 56,0	<u>48,2</u> 32,0	<u>26,1</u> 22,3
$\sigma_B/\sigma_{0,2}$	<u>1,68</u> 1,51	<u>1,6</u> 1,54	<u>1,9</u> 1,46	<u>2,7</u> 2,36	<u>1,39</u> 1,31	<u>1,29</u> 1,23

Аналіз даних табл. 10 показує, що зменшення початкової температури прокатки від 1150 до 1050 °С та подальше термічне зміцнення арматурного прокату за режимом класу А600 дозволяє лише для нержавіючої аустеніто-феритної сталі (дуплекс-сталь) марки 1.4462 досягти характеристики міцності $\sigma_{0,2}=610$ Н/мм² та $\sigma_B=784$ Н/мм². При цьому розраховані пластичні властивості мають дуже високий рівень ($\delta_5=26,1$ % та $\sigma_B/\sigma_{0,2}=1,29$) проти норм цих характеристик за ДСТУ 3760:2019 для класу А600 ($\delta_5\geq 12,0$ % та $\sigma_B/\sigma_{0,2}\geq 1,08$). Арматурний прокат з інших нержавіючих марок сталей можна віднести до прокату класу А240 ($\sigma_T\geq 240$ Н/мм²; $\sigma_B\geq 370$ Н/мм²; $\delta_5\geq 25,0$ % та $\sigma_B/\sigma_{0,2}\geq 1,25$) за виключення сталі марки 03X18N11. Розраховані значення пластичних характеристик при цьому в 1,7-2,4 рази вище ніж нормовані значення цих властивостей за ДСТУ 3760:2019.

При зниженні початкової температури прокатки до 950 °С та подальше термічне зміцнення арматурного прокату з прокатного нагріву з нержавіючих марок сталей за режимом класу А600 дозволяє отримати готовий прокат з марок сталей: 1.4362 і 1.4462 клас А600; 08X18N10Т клас А500; 1.4301 клас А400; AISI304 та 03X18N11 клас А240. При цьому розраховані значення пластичних властивостей арматурного прокату з цих сталей знаходяться на дуже високому рівні ніж нормовані показники такого прокату для різних класів міцності за ДСТУ 3760:2019.

Висновки

На підставі виконаних аналітичних досліджень технологічних параметрів гарячої сортової прокатки та подальшого термічного зміцнення при виробництві стійкого до корозійного руйнування і вогнестійкого арматурного прокату з використанням розробленої в Інституті чорної металургії ім. З. І. Некрасова НАН України математичної моделі процесу безперервної сортової прокатки та прогнозування механічних властивостей, адаптованої до умов дрібносортового стану 250-1 ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг»:

1. Показано, що значення зусиль гарячої прокатки нержавіючих і економнолегованих марок сталі за діючою технологією виробництва термічно зміцненого арматурного прокату №12 (температура початку прокатки $T_{n,пр.}=1150$ °С) і швидкості 12,5 м/с не перевищують номінальних значень зусиль для усіх робочих клітей стану ДС 250-1. При цьому розрахункові значення зусиль прокатки при температурі початку гарячої безперервної сортової прокатки $T_{n,пр.}=1150$ °С з нержавіючих марок сталей, окрім нержавіючої сталі марки AISI304, більші ніж при прокатці економнолегованих марок сталей.

2. Встановлено, що, за винятком нержавіючої сталі марки AISI304, усі досліджувані нержавіючі марки сталі мають розрахункові значення температури кінця прокатки на 22-32 °С вище ніж для економнолегованих

марок сталей. Розрахунки значень механічних властивостей показали, що використання термічного зміцнення з прокатного нагріву арматурного прокату з нержавіючих марок сталей не дозволяє отримати готовий прокат не вище класу А500 за нормами ДСТУ 3760:2019. Це обумовлено високими значеннями температури кінця прокатки $T_{к.пр.}=1095-1109$ °С. Температура кінця прокатки для нержавіючих сталей повинна знаходитися у межах $T_{к.пр.}=950-1050$ °С.

3. Визначено, що застосування термічного зміцнення з прокатного нагріву арматурного прокату з економнолегованих марок сталей дозволяє гарантовано отримати за ДСТУ 3760:2019 готовий корозійностійкий і вогнестійкий прокат класу А600К (сталі марок 20Г2СФБА і 10ГС) та класу А800К (сталь марки 20ХГС2) в умовах ДС 250-1 за діючою технологічною інструкцією на такий вид металопродукату.

4. Встановлено, що при зниженні температури початку прокатки арматурного профілю №12 з нержавіючих марок сталей до 1050 і 950 °С відповідно та швидкості прокатки 12,5 м/с розрахункові значення зусиль у робочих клітках №№1-4 та №8 перевищують номінальні значення.

5. Показано, що при зниженні початкової температури прокатки до 1050 і 950°С відповідно і подальшого термічного зміцнення арматурного прокату №12 з нержавіючих марок сталей, наприклад, за режимом зміцнення для класу А600, дозволяє отримати готовий корозійно- і вогнестійкий арматурний прокат, який має умовну границю плинності вище 600 Н/мм². У той же час розрахункові значення пластичних характеристик у середньому в 2 рази вищі за нормовані значення цих властивостей ДСТУ 3760:2019.

Перелік посилань

1. Одесский П. Д. Современные стали для строительных металлических конструкций и вопросы экономической эффективности. *Сталь*. 2018. № 12. С. 57-61.
2. Коновалов О. Ф., Риженков О. А., Корольов В. П. Системный підхід до моніторингу корозії та захисту металевих конструкцій. *Фізико-хімічна механіка матеріалів*. 2004. № 5. С. 99-103.
3. Scully J. C. *The Fundamentals of Corrosion*. N-Y. : Pergamon Press, 1975. 234 p.
4. Раздобрев В. Г., Паламар Д. Г. Сучасні тенденції виробництва корозійностійкого і вогнестійкого напруженого арматурного прокату. *Фундаментальні і прикладні проблеми чорної металургії: Зб. наук. праць Інституту чорної металургії ім. З.І. Некрасова НАН України*. 2020. Вип. 34. Дніпро: ВІЗІОН. С. 190-201.
5. Раздобрев В. Г., Паламар Д. Г., Лещенко О. І., Ключніков К. Ю. Сучасні тенденції виробництва корозійностійкого і вогнестійкого напруженого арматурного прокату. *Фундаментальні і прикладні проблеми чорної металургії: Зб. наук. праць Інституту чорної металургії ім. З.І. Некрасова НАН України*. 2021. Вип. 35. Дніпро: ВІЗІОН. С. 108-133.
6. Жучков С. М., Кулаков Л. В., Лохматов А. П. Управление температурным

- режимом непрерывной сортовой прокатки (Теоретические и технологические основы). М. : Теплотехник, 2008. 144 с.
7. Жучков С. М., Паламарь Д. Г., Раздобреев В. Г., Иванов А. П. Разработка информационно-аналитической системы непрерывной сортовой прокатки. *Обработка материалов давлением сб. науч. тр. ДГМА*. 2010. №3 (24). Краматорськ : из-во ДГМА. С. 54-59.
 8. Энергосберегающие мероприятия при производстве арматурного проката на стане 320 Белорусского металлургического завода / В. Г. Раздобреев, П. В. Токмаков, В. А. Луценко, А. А. Сотников, П. А. Бобков, М. И. Титов // *Черные металлы*. 2011. № 6. С. 19-24.
 9. Аналитические и экспериментальные исследования технологии производства бунтового арматурного проката класса А500 в условиях непрерывного сортового стана 400/200 ПАО «ДМК» / В. Г. Раздобреев, Д. Г. Паламар, В. В. Мощный, Г. А. Мединский, Ю. К. Олейник // *Спеціальна металургія: вчора, сьогодні, завтра* [Електрон. ресурс]: матеріали XVI Всеукраїнської науково-практичної конференції, Київ, 17 квітня 2018 р. К.: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2018. С. 350-368.
 10. Раздобреев В. Г., Паламар Д. Г., Парусов С. В., Чуйко І. М. Формування структури і властивостей високоміцного бунтового арматурного прокату з вуглецевих сталей при різних температурно-швидкісних та енергосилових режимах прокатки. *Спеціальна металургія: вчора, сьогодні, завтра* [Електрон. ресурс]: матеріали XVII Всеукраїнської науково-практичної конференції, Київ, 23 квітня 2019 р. К.: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2019. С. 49-59.
 11. Расчет и моделирование параметров режима деформационно-термической обработки при производстве бунтового проката периодического профиля из высокоуглеродистой стали / Э. В. Парусов, О. В. Парусов, В. Г. Раздобреев, И. Н. Чуйко, С. В. Долгий // *Деформация и разрушение материалов и наноматериалов: материалы VIII межд. конф.*, г. Москва, 19-22 ноября 2019 г. Москва : ИМЕТ РАН, 2019. С. 129–131.
 12. Дзугутов М. Я. Пластическая деформация высоколегированных сталей и сплавов. М. : Металлургия, 1977. 479 с.
 13. Cuijie N., Foley I. Charter Steel Modernization: Prefinishing mill and high - speed rod. *Iron and Steel Eng.* 1998. Vol. 75. № 1. P. 37-38.
 14. Булат С. И., Тихонов А. С., Дубровин А. К. Деформируемость структурнонеоднородных сталей и сплавов. М. : Металлургия, 1975. 352 с.
 15. Химушин Ф. Ф. Жаропрочные стали и сплавы. М. : Металлургия, 1968. 749 с.
 16. Budenbender G. Temperaturverlant beim Walzen kleiner Querschritte an einer kontinuierlichen Drahtstrabe. *Kalibreur.* 1977. № 27. S. 31-78.
 17. Bourgin C., Chauveau E., Dermelin B. Stainless steel rebar: the choice of service life. *La Revue de Metallurgie. CIT.* 2006. № 2. P. 89-98.
 18. Пикеринг Ф. Б. Физическое металловедение и разработка сталей. М. : Металлургия, 1982. 184 с.
 19. Stainless Steel in construction industry. *BSSA Conference Report. Steel Times.* 1996. № 1. P. 21-23.
 20. Cochrane D. Y. Austenitic stainless steel – The solution to rebar corrosion. *Steel Times.* 1996. № 1. P. 19-20.
 21. Металловедение и термическая обработка стали: Справ. изд. – 3-е изд.

- перераб. и доп. В 3-х т. Т. III. Термическая обработка металлопродукции / Под ред. Бернштейна М. Л., Рахштада А. Г. М.: Металлургия, 1983. 216 с.
22. Thomas Pauly. Nichtrostender Draht-ein Produkt mit Alltagsbedeutung und Innovationspotential. *Stahlmarkt*. 1996. № 4. S. 36-41.
 23. Погорельский В. И., Литвиненко Д. А., Матросов Ю. И., Иваницкий А. В. Контролируемая прокатка. М.: Металлургия, 1979. 184 с.

References

1. Odesskiy P. D. Sovremennyye stali dlya stroitel'nykh metallicheskiykh konstruksiy i voprosy ekonomicheskoy effektivnosti [Modern steels for building metal structures and issues of economic efficiency]. *Stal' [Steel]*. 2018. No 12. P. 57-61.
2. Konovalov O. F., Ryzhenkov O. A., Korol'ov V. P. Systemnyy pidkhdid do monitorynhu koroziyi ta zakhystu metalevykh konstruksiy. *Fyzyko-khimichna mekhanika materialiv [System approach to corrosion monitoring and protection of metal structures]. Fyzyko-khimichna mekhanika materialiv [Physico-chemical mechanics of materials]*. 2004. No 5. P. 99-103.
3. Scully J. C. *The Fundamentals of Corrosion*. N-Y.: Pergamon Press, 1975. 234 p.
4. Razdobryeyev V. G., Palamar D. G. Suchasni tendentsiyi vyrobnytstva korozijnostiykoho i vohnestiykoho nenapruzhenoho armaturnoho prokatu [Modern trends in the production of corrosion-resistant and fire-resistant unstressed reinforcement]. *Fundamental'ni i prykladni problemy chornoyi metalurhiyi [Fundamental and applied problems of ferrous metallurgy]*. 2020. Collection 34, P. 190-201. DOI: 10.52150/2522-9117-2020-34-170-189.
5. Razdobryeyev V. G., Palamar D. G., Leshchenko O. I., Klyuchnikov K. Yu. Suchasni tendentsiyi vyrobnytstva korozijnostiykoho i vohnestiykoho napruzhenoho armaturnoho prokatu [Modern trends in the production of corrosion-resistant and fire-resistant tensile reinforcement]. *Fundamental'ni i prykladni problemy chornoyi metalurhiyi [Fundamental and applied problems of ferrous metallurgy]*. 2021. Collection 35. P. 108-133. DOI: 10.52150/2522-9117-2021-35-108-133.
6. Zhuchkov S. M., Kulakov L. V., Lokhmatov A. P. *Upravleniye temperaturnym rezhimom nepreryvnoy sortovoy prokatki (Teoreticheskiye i tekhnologicheskkiye osnovy) [Temperature control of continuous section rolling (Theoretical and technological foundations)]*. Moskva: Teplotekhnik, 2008. 144 p.
7. Zhuchkov S. M., Palamar' D. G., Razdobryeyev V. G., Ivanov A. P. Razrabotka informatsionno-analiticheskoy sistemy nepreryvnoy sortovoy prokatki [Development of an information-analytical system for continuous section rolling]. *Obrabotka materialov davlenim [Processing of materials pressure]*. No 3 (24). P. 54-59.
8. Energosberegayushchiye meropriyatiya pri proizvodstve armaturnogo prokata na stane 320 Belorusskogo metallurgicheskogo zavoda [Energy-saving measures in the production of rebar at mill 320 of the Belarusian Metallurgical Plant] / V. G. Razdobryeyev, P. V. Tokmakov, V. A. Lutsenko, A. A. Sotnikov, P. A. Bobkov, M. I. Titov // *Chernyye metally [Stahl und Eisen]*. 2011. No 6. P. 19-24.
9. Analiticheskiye i eksperimental'nyye issledovaniya tekhnologii proizvodstva buntovogo armaturnogo prokata klassa A500 v usloviyakh nepreryvnogo sortovogo stana 400/200 PAO "DMK" [Analytical and experimental studies of the technology for the production of class A500 coiled reinforcing bars in the conditions of a

- continuous section mill 400/200 of PJSC "DMK" / V. G. Razdobreyev, D. G. Palamar, V. V. Motsnyy, G. A. Medinskiy, Yu. K. Oleynik // *Spetsial'na metalurhiya: vchora, s'ohodni, zavtra [Special metallurgy: yesterday, today, tomorrow]*, 2018. P. 350-368.
10. Razdobreyev V. G., Palamar D. G., Parusov Ye. V., Chuyko I. M. Formuvannya struktury i vlastyvostey vysokomitsnoho buntovoho armaturnoho prokatu z vuhletsevykh staley pry riznykh temperaturno-shvydkisnykh ta enerhosylovykh rezhymakh prokatky [Formation of structure and properties of high-strength rebound reinforcing steel from carbon steels at different temperature-speed and power rolling modes]. *Spetsial'na metalurhiya: vchora, s'ohodni, zavtra [Special metallurgy: yesterday, today, tomorrow]*, 2019. P. 49-59.
 11. Raschet i modelirovaniye parametrov rezhima deformatsionno-termicheskoy obrabotki pri proizvodstve buntovogo prokata periodicheskogo profilya iz vysokouglerodistoy stali [Calculation and modeling of the parameters of the mode of deformation-heat treatment in the production of coiled rolled products of a periodic profile from high-carbon steel] / E. V. Parusov, O. V. Parusov, V. G. Razdobreyev, I. N. Chuyko, S. V. Dolgiy // *Deformatsiya i razrusheniye materialov i nanomaterialov [Deformation and destruction of materials and nanomaterials]*, 2019. P. 129–131.
 12. Dzugutov M. Ya. *Plasticheskaya deformatsiya vysokolegirovannykh staley i splavov [Plastic deformation of high-alloy steels and alloys]*. Moskva: Metallurgiya, 1977. 479 p.
 13. Cuitie N., Foley I. Charter Steel Modernization: Prefinishing mill and high - speed rod. *Iron and Steel Eng.* 1998. Vol. 75. No 1. P. 37-38.
 14. Bulat S. I., Tikhonov A. S., Dubrovin A. K. *Deformiruyemost' strukturne neodnorodnykh staley i splavov [Deformability of structurally inhomogeneous steels and alloys]*. Moskva: Metallurgiya, 1975. 352 p.
 15. Khimushin F. F. Zharoprochnyye stali i splavy [*Heat-resistant steels and alloys*]. Moskva : Metallurgiya, 1968. 749 p.
 16. Budenbender G. Temperaturverlant beim Walzen kleiner Querschritte an einer kontinuierlichen Drahtstrabe. *Kalibreur.* 1977. No 27. P. 31-78.
 17. Bourgin C., Chauveau E., Dermelin B. Stainless steel rebar: the choice of service life. *La Revue de Metallurgie. CIT.* 2006. No 2. P. 89-98.
 18. Pickering F. B. (1982). *Physical Metallurgy and the design of steels: Materials science series*. Moskva: Metallurgy, 1982. 184 p.
 19. Stainless Steel in construction industry. *BSSA Conference Report. Steel Times.* 1996. No 1. P. 21-23.
 20. Cochrane D. Y. Austenitic stainless steel – The solution to rebar corrosion. *Steel Times.* 1996. No 1. P. 19-20.
 21. Bernshteyn M. L., Rakhshid A. G. *Metallovedeniye i termicheskaya obrabotka stali. T. III. Termicheskaya obrabotka metalloproduktii [Metal science and heat treatment of steel. T. III. Heat treatment of metal products]*. Moskva: Metallurgiya, 1983. 216 p.
 22. Thomas Pauly. Nichtrostender Draht-ein Produkt mit Alltagsbedeutung und Innovationspotential. *Stahlmarkt.* 1996, No 4. P. 36-41.
 23. Pogorzhel'skiy V. I., Litvinenko D. A., Matrosov Yu. I., Ivanitskiy A. V. *Kontroliruyemaya prokatka [Controlled rolling]*. Moskva: Metallurgiya, 1979. 184 p.

V. G. Razdobreev, Ph. D. (Tech.), Senior Researcher, ORCID 0000-0001-7402-7992
 D. G. Palamar, Junior Researcher, ORCID 0000-0002-9503-3248
 K. Yu. Kluychnikov, Junior Researcher, ORCID 0000-0003-2465-3244
 O. I. Leshchenko, Junior Researcher, ORCID 0000-0003-1877-8358

Iron and Steel Institute of Z. I. Nekrasov National Academy of Sciences of Ukraine

RESEARCH OF TECHNOLOGICAL PARAMETERS OF HOT VARIETY ROLLING IN THE PRODUCTION OF CORROSION-RESISTANT AND FIRE-RESISTANT REINFORCEMENT ROLLING

Summary. The purpose of the work is to adapt the computer mathematical model of the process of continuous grade rolling developed in the Department of Pressure Metal Processing (VOMT) of the Institute of Chemical Engineering of the National Academy of Sciences of the Russian Academy of Sciences for the study and prediction of the mechanical properties of corrosion-resistant and fire-resistant reinforcing bars. Recently, stainless steel grades have been used as a material for such production of rebar. Such rental is usually used in the construction of responsible structures for special purposes of similar objects. Unfortunately, reinforcing bars from stainless steel grades are not produced in Ukraine. Therefore, it is relevant to determine the parameters of the technology of hot grade rolling and subsequent heat treatment from rolling heating in the production of corrosion-resistant and fire-resistant reinforced rolled steel from stainless steel grades. Analytical studies were carried out with the help of a mathematical model for predicting mechanical properties developed at the Institute of Chemical Engineering of the National Academy of Sciences of Ukraine, adapted to the conditions of fine-grade state 250-1 of ArcelorMittal Kryvyi Rih PJSC. It has been established that in the production of thermally strengthened reinforcing bars of a periodic profile with a diameter of 12 mm (rolling start temperature 1150 °C and rolling speed 12.5 m/s), the current technology does not allow to obtain a finished rolled product above class A500 according to the norms of DSTU 3760:2019. This is due to high values of the temperature at the end of rolling $T_{k.pr.}=1095-1109$ °C. All investigated stainless steel grades have calculated values of the temperature at the end of rolling by 22-32 °C higher than for low-alloy steel grades. The analysis of research results showed that with a decrease in the initial rolling temperature and subsequent thermal strengthening of rebar No. 12 made of stainless steel grades, for example, according to the strengthening mode for class A600, it is possible to obtain a ready-made corrosion- and fire-resistant rebar with a conditional yield strength above 600 N/mm². At the same time, the calculated values of plastic characteristics are on average 2 times higher than the normalized values of these properties of DSTU 3760:2019.

Key words: rebar, corrosion resistance, stainless steel, hot graded rolling, mathematical modeling, temperature, mechanical properties.

For citation: Razdobreev V. G., Palamar D. G., Kluychnikov K. Yu., Leshchenko O. I. Doslidzhennia tekhnolohichnykh parametriv hariachoi sortovoi prokatky pry vyrobnytstvi koroziihnostiikoho i vohnestiikoho armaturnoho prokatu [Research of technological parameters of hot variety rolling in the production of corrosion-resistant and fire-resistant reinforcement rolling]. *Fundamental and applied problems of ferrous metallurgy*. 2022. Collection 36. P. 265-284. [In Ukrainian]. DOI: 10.52150/2522-9117-2022-36-265-284.

*Стаття надійшла до редакції збірника 08.11.2022 р.
 Рекомендовано до друку редколегією збірника (Протокол № 5 від 20.12.2022 р.)*

*"Фундаментальні та прикладні проблеми чорної металургії". 2022. Випуск 36
 "Fundamental and applied problems of ferrous metallurgy". 2022. Collection 36*