

<https://doi.org/10.52150/2522-9117-2024-38-431-454>

УДК 621.79:621.771.25:669-15"26"28"292-194

Е. В. Парусов¹, д.т.н., с.н.с., ORCID 0000-0002-4560-2043

І. М. Чуйко¹, к.т.н., ст. досл., ORCID 0000-0002-4753-614X

Е. В. Олійник¹, ORCID 0000-0002-3366-3746

О. В. Парусов¹, к.т.н., с.н.с., ORCID 0000-0002-9879-6179

¹ Інститут чорної металургії ім. З. І. Некрасова НАН України

АНАЛІЗ ТЕНДЕНЦІЙ ТА ПРОБЛЕМ ВИРОБНИЦТВА ПРОКАТУ І ДРОТУ З НИЗЬКОВУГЛЕЦЕВИХ Cr-Mo-V СТАЛЕЙ ЗВАРЮВАЛЬНОГО ПРИЗНАЧЕННЯ

Анотація. Теплостійкі та жароміцні конструкційні Cr-Mo і Cr-Mo-V сталі існують вже більше століття й з великим успіхом знайшли застосування в енергетичній і хімічній промисловості. Типовою продукцією для цих галузей є котли, нагрівачі, теплообмінники, реактори, газові турбіни, установки гідрокрекінгу, суди високого тиску тощо. Для зварювання таких сталей в середовищі захисних газів та під флюсом традиційно використовується зварювальний дріт діам. 1,2–3,0 мм з низьковуглецевих Cr-Mo-V сталей, до типових представників яких можна віднести марки CrMoV1Si або Св-08ХГСМФА та їх аналоги і модифікації. Окремим напрямом використання такого дроту є відновлення та ремонт деталей, що працюють в умовах абразивного зношування, методом наплавлювання. До того ж цей дріт має перспективи для успішного застосування в технологіях дротяно-дугового адитивного виробництва (3D-друці). Для виготовлення такого дроту у якості металургійної заготовки застосовується бунтовий прокат діам. 5,5 мм, який повинен поряд з іншими споживчими властивостями мати високу технологічність при глибокому холодному деформуванні методом волочіння на сучасному високопродуктивному обладнанні. За результатами аналізу науково-технічних джерел у роботі узагальнено сучасні тенденції та проблеми виробництва прокату і дроту з низьковуглецевих Cr-Mo-V сталей зварювального призначення, розглянуто низку питань щодо актуальних вимог нормативної документації та специфікацій кращих світових і вітчизняних виробників бунтового прокату з легованих сталей та визначені основні цільові показники якості відповідної металопродукції з урахуванням характеристик самих зварювальних матеріалів. Для успішного розв'язання актуальної проблеми підвищення деформованості виробів з низьковуглецевих Cr-Mo-V сталей зварювального призначення визначено комплекс науково-практичних завдань, вирішення яких дозволить суттєво доповнити базу даних раніше отриманих результатів новими знаннями щодо впливу системи легування на

© Видавець Інститут чорної металургії ім. З. І. Некрасова НАН України, 2024



Ця стаття відкритого доступу за ліцензією CC BY-NC-ND 4.0
<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/legalcode.uk>

перебіг фазово-структурних перетворень і комплекс механічних властивостей прокату. Результати відповідних досліджень складуть підґрунтя для створення нових технологічних рішень щодо контрольованого керування процесами структуроутворення досліджуваних сталей та забезпечать отримання зварювальних матеріалів за зменшених матеріальних витрат, виробництва яких наразі в Україні відсутнє.

Ключові слова: прокат, зварювальний дріт, легована сталь, структура, механічні властивості

Посилання для цитування: Парусов Е. В., Чуйко І. М., Олійник Е. В., Парусов О. В. Аналіз тенденцій та проблем виробництва прокату і дроту з низьковуглецевих Cr-Mo-V сталей зварювального призначення. *Фундаментальні та прикладні проблеми чорної металургії*. 2024. Вип. 38. С. 431-454. <https://doi.org/10.52150/2522-9117-2024-38-431-454>

Вступ. У сучасному важкому машинобудуванні габарити і вага агрегатів часто виявляються настільки великими, що виготовлення заготовок необхідного розміру та форми за допомогою кування або лиття викликає суттєві труднощі. Подолання цих перешкод забезпечується інженерами на етапі проєктування шляхом розчленування великої та складної деталі на простіші за формою елементи меншої ваги з подальшим їх з'єднанням зварюванням [1]. В енергетичному та хімічному об'єднанні широко використовуються теплостійкі та жароміцні перлітні сталі, до яких належать низьколеговані Cr-Mo сталі типу 12ХМ, 10ХМЛ, 12Х2М1, які призначені для роботи за температур 450–550 °С, і Cr-Mo-V сталі типу 12Х1МФ, 12Х2МФБ, 15Х1М1Ф, 20ХМФЛ, 15Х1М1ФЛ, 14МоV6-3 (1.7715), 15CrMoV5-10 (1.7745), які призначені для роботи за температур 550–600 °С. Їх широке застосування зумовлене порівняно низькою вартістю та достатньо високою технологічністю при виробництві відливок, поковок, прокату та виготовленні з них зварних конструкцій [2]. Сталі 12ХМ, 15ХМ, 12Х2М1, 12Х1МФ, 12Х2МФБ, 15Х1М1Ф, 14МоV6-3 (1.7715), 15CrMoV5-10 (1.7745), що піддаються деформуванню, зазвичай використовуються для виготовлення паропроводів, теплообмінників, технологічних трубопроводів, робочих деталей нагрівальних котлів і гідрокрекінгових установок, а ливарні сталі 20ХМФЛ і 15Х1М1ФЛ – для відливання корпусів турбін та запірної арматури.

У відповідності до умов тривалої експлуатації під напруженням за високих температур ці сталі повинні володіти опором повзучості, тривалою міцністю, стабільністю властивостей у часі та жаростійкістю [3]. Ці властивості з урахуванням необхідності забезпечення технологічності сталей при виплавці, відливанні, куванні, прокатуванні,

термічній обробці та зварюванні досягаються додаванням до їх складу 0,5–2,0 % Cr, 0,2–1,0 % Mo, 0,1–0,3 % V [4]. Легування Cr підвищує жаростійкість сталей, тобто їх опір окисленню, а також запобігає графітизації у процесі експлуатації за температур вище 450 °C. Cr у кількості 1,0–1,5 % при уведенні його у сталь спільно з Mo підвищує до того ж її тривалу міцність та опір повзучості [5]. Позитивний вплив Mo на збільшення міцності сталі за підвищених температур при додаванні його у кількості 0,5–1,0 % пояснюється здатністю підвищувати температуру рекристалізації заліза та участю в утворенні фази Лавеса Fe₂Mo, що зміцнює метал [6]. V спільно з C забезпечує зміцнення сталі дисперсними карбідами VC і сприяє стабілізації карбідної фази як елемент, що має значну спорідненість до вуглецю [7].

Оптимальне поєднання механічних властивостей виробів з перлітних теплостійких та жароміцних низьколегованих сталей досягається після нормалізації (або гартування) з наступним високотемпературним відпуском. Водночас в структурі утворюється дрібнодисперсна феритокарбідна суміш, а в Cr-Mo-V сталях, особливо при гартуванні, з'являється також і бейнітна складова [2].

Металургійна зварюваність жароміцних перлітних сталей, що визначається поведінкою металу при плавленні, металургійній обробці та подальшій кристалізації зварного шву, не викликає суттєвих ускладнень. Існуюча технологія зварювання та зварювальні матеріали забезпечують необхідну стійкість металу шву проти утворення гарячих тріщин. Однак теплова зварюваність ускладнюється схильністю зварних з'єднань до утворення холодних тріщин і зміцненням металу, що зварюється, в зоні термічного впливу зварювання [8, 9].

За температур експлуатації 450–600 °C у готових виробах із теплостійких та жароміцних перлітних сталей можливий розвиток дифузійних процесів між основним металом та металом шву. Вуглець, який є одним з найбільш дифузійно-рухливих елементів, може мігрувати навіть за невеликої відмінності у легуванні карбідоутворюючими елементами. Утворення в процесі експлуатації знеуглецьованого (феритного) прошарку з одного боку лінії сплавлення і карбідів з іншого знижує границю тривалої міцності та пластичності зварного з'єднання і, як наслідок, призводить до локального (за віссю плавлення) руйнування [10]. Зважаючи на це зварювальні матеріали, що призначені для жароміцних перлітних низьколегованих сталей, повинні забезпечувати хімічний склад металу шву, близький до хімічного складу основного металу [11].

Одним з основних матеріалів для зварювання теплостійких і жароміцних низьколегованих Cr-Mo та Cr-Mo-V сталей перлітного класу в середовищі захисних газів та під флюсом є зварювальний дріт зі

сталі CrMoV1Si за ДСТУ EN ISO 21952:2015 (EN ISO 21952-A) [12]. Найближчим аналогом за національною нормативною документацією є сталь CrMoV1 за ДСТУ EN ISO 3580:2019 [13], а за зарубіжною – сталь Св-08ХГСМФА за ГОСТ 2246-70 [14]. Існують також модифікації сталі CrMoV1Si (Св-08ХГСМФА), зварювальний дріт з яких застосовується переважно для відновлення та ремонту деталей залізничного рухомого складу – сталі Св-08ХГ2СМФ і Св-10ХГ2СМФ. При наплавлюванні під флюсом зношених вагонних коліс дріт зі сталі Св-08ХГ2СМФ забезпечує отримання шару металу зі сприятливою структурою бейнітного типу з необхідною твердістю (250–320 НВ), що має задовільну зносостійкість. Зварювальний дріт зі сталей Св-08ХГ2СМФ і Св-10ХГ2СМФ також застосовується при ремонті деталей залізничного транспорту, виготовлених прокаткою, куванням та штампуванням зі сталей марок Ст3, Ст5, 09Г2, 09Г2Д, 12ХНЗА, 20, 30, 35, 20ХНЗА, 30ХГСА, 30ХНЗА, 30ХНМА, 15Л, 20Л, 25Л, 20ФЛ, 20ГЛ, 20Г1ФЛ, 32Х06Л, 30ГСЛ, 30Л, 35Л та інших. Вимоги до хімічного складу сталей Св-08ХГ2СМФ і Св-10ХГ2СМФ нормуються технічними умовами різних заводів-виробників (наприклад, СТО 71915393-ГУ070-2008 «Дріт зварювальний обміднений і необміднений. Технічні умови»), а також технічними угодами між виробниками прокату-дроту та кінцевими споживачами (наприклад, ТО/ТС-СС-01-2008 «Технічна угода про умови поставки катанки з легованої сталі для виготовлення зварювального дроту»).

Наразі в Україні зварювальний і наплавний дріт з низьковуглецевих Cr-Mo-V сталей і прокат підвищеної деформованості для його виготовлення не виробляються, а національні підприємства машинобудівної, металургійної та транспортної галузей змушені купувати зазначені матеріали за кордоном. Активне повоєнне відновлення України в рамках реновації пошкоджених промислових об'єктів і транспортної інфраструктури буде потребувати значної кількості зварювальних матеріалів, зокрема для з'єднання теплостійких і жароміцних сталей (теплова електрогенерація, котельне обладнання, промислові теплообмінники тощо) та ремонту елементів залізничного транспорту. Впровадження науково обґрунтованих технологічних рішень дозволить вітчизняній промисловості домогтися імпортозаміщення за важливими позиціями зварювальних матеріалів, а національним металургійним і металовиробним підприємствам опанувати випуск нового виду продукції та гідно представити його не тільки на внутрішньому, а й на зовнішньому ринках збуту.

Мета роботи – узагальнення сучасних тенденцій та основних проблем під час виробництва прокату і дроту з низьковуглецевих Cr-

Мо-V сталей зварювального призначення з визначенням перспективних напрямів наукових досліджень за даною тематикою.

Методика дослідження. Представлена робота заснована на ретельному бібліографічному огляді сучасних науково-технічних публікацій, які стосуються тенденцій та проблематики виробництва прокату і дроту з низьковуглецевих Cr-Mo-V сталей зварювального призначення, й аналізі нормативної документації та специфікацій кращих світових і вітчизняних виробників відповідних видів металопродукції. Вихідні дані було зібрано станом на 2024 рік на спеціалізованих пошукових платформах широкого кола користування таких як «Springer», «ResearchGate», «GoogleScholar», «ScienceDirect», «MDPI», «SemanticScholar» тощо, а також використані відомості з власних попередніх досліджень авторів. Для коректного фільтрування вихідних даних та уточнення пошукових запитів використовувалися різні логічні оператори та параметри пошуку.

Результати дослідження та їх обговорення. До основних показників якості зварювального дроту відносяться: хімічний склад сталі; точність і стабільність геометричних розмірів; границя міцності; рівномірність розподілу внутрішніх напружень (рівноважність); якість поверхні; у разі нанесення мідного покриття – якість обміднення; зварювально-технологічні властивості. Наведений перелік показників не є вичерпним і у різних нормативних документах зустрічаються різні комбінації нормативних вимог.

З певною періодичністю зварювальний дріт на заводі-виробнику проходить спеціальні випробування на відповідність хімічного складу і механічних властивостей наплавленого металу вимогам атестаційних органів. Вимоги основних нормативних документів до хімічного складу сталі CrMoVSi, її найближчих аналогів та модифікацій наведені у табл. 1.

Слід відзначити, що деякі закордонні нормативні документи на зварювальні матеріали надають виробнику певну свободу у виборі хімічного складу металу, з якого виробляється дріт або пруток. Наприклад, американський стандарт AWS A5.28/A5.28M «Специфікація для електродів і дротів із низьколегованих сталей для дугового зварювання в захисних газах» передбачає можливість виготовлення зварювальних матеріалів з маркуванням літерою «G», що вказується після основної марки матеріалу. Щоб відповідати вимогам класифікації «G» метал дроту повинен містити принаймні один з наступних хімічних елементів: 0,50 % Ni, 0,30 % Cr або 0,20 % Mo. Конкретний склад металу дроту визначається специфікаціями виробника та додатково узгоджується між замовником і

постачальником. При цьому основною вимогою до зварювального матеріалу стають механічні властивості наплавленого металу, які нормуються відповідним стандартом і забезпечуються конкретним хімічним складом сталі. У табл. 2 наведено вимоги до механічних властивостей наплавленого металу за українською нормативною документацією (ДСТУ EN ISO) при зварюванні дротом або електродами зі сталей CrMoV1Si та CrMoV1.

Таблиця 1 – Вимоги до хімічного складу сталі CrMoV1Si, її найближчих аналогів та модифікацій

Марка сталі	Нормативний документ	Вміст хімічних елементів, % ваг. (у межах або не більше)							
		C	Si	Mn	Cr	Mo	V	S	P
CrMoV1Si	ДСТУ EN ISO 21952: 2015	0,06–0,15	0,50–0,80	0,80–1,20	0,90–1,30	0,90–1,30	0,10–0,35	0,020	0,020
CrMoV1	ДСТУ EN ISO 3580: 2019	0,05–0,15	0,80	0,70–1,50	0,90–1,30	0,90–1,30	0,10–0,35	0,025	0,030
Св-08ХГСМФА	ГОСТ 2246-70	0,06–0,10	0,45–0,70	1,20–1,50	0,95–1,25	0,50–0,70	0,20–0,35	0,025	0,025
Св-08ХГ2СМФ	ТО/ТС-СС-01-2008	0,04–0,08	0,20–0,40	1,00–1,40	0,70–1,00	0,50–0,70	0,15–0,30	0,020	0,020
Св-10ХГ2СМФ		0,08–0,12	0,50–0,70	1,20–1,60	0,70–0,90	0,20–0,40	0,15–0,30	0,020	0,020

Таблиця 2 – Вимоги до механічних властивостей наплавленого металу

Марка сталі	R _{0,2} , МПа	R _m , МПа	A, %	Енергія удару при + 20 °С, Дж		Термічна обробка наплавленого металу		
				Середнє значення для 3 зразків	Одиничне значення	Попередній підігрів, °С	Термічна обробка зразків після зварювання	
							Температура, °С	Час, хв
CrMoV1Si	min 435	min 590	min 15	min 24	min 19	200–300	680–730	50–70
CrMoV1	min 435	min 590	min 15	min 24	min 21			

Аналіз табл. 1 показав, що незважаючи на спільну систему легування у відповідності до різних нормативних документів вміст основних хімічних елементів у складі сталі може дещо відрізнятись, що

ускладнює уніфікацію підходів до вирішення завдання з оптимізації хімічного складу для забезпечення високої технологічності металу на всіх етапах його виробництва (від виплавлення сталі до волочіння дроту) і кінцевого застосування (від особливостей поведінки дроту у зварювальних апаратах до забезпечення якості готових металовиробів після зварювання). Проте з дослідницької точки зору саме спільна система легування сталі дає змогу ефективного розв'язання цієї проблеми з використанням сучасних інформаційних технологій за рахунок інтеграції фундаментальних досліджень властивостей багатокомпонентних комплексних сплавів на базі синтезу прецизійного лабораторного експерименту та математичного моделювання. У цьому випадку перспективним слід вважати використання методики фізико-хімічного моделювання металургійних розплавів на основі концепції направлено хімічного зв'язку [15, 16], яка розроблена в ІЧМ НАНУ і успішно випробувана у багаторічній практиці наукових досліджень. Визначення раціонального компонентного складу низьковуглецевих Cr-Mo-V сталей зварювального призначення у межах марочного, а також загальний аналіз трендів у межах доступної вибірки статистичних даних, зможуть забезпечити ефективне поєднання властивостей, структури та економічної складової (вміст легувальних елементів), що наразі є одним з найактуальніших завдань при освоєнні виробництва прокату-дроту з таких сталей на національних підприємствах.

Вимоги до механічних властивостей і рівноважності зварювального дроту продиктовані умовами його застосування та особливостями роботи механізмів подавання дроту в напівавтоматичних і автоматичних зварювальних агрегатах. Використання дроту із занадто низькою («м'якого») або високою («жорсткого») міцністю може призвести до його застрягання чи руйнування у направляючому каналі обладнання або спровокувати нерівномірність подавання дроту до зварювальної ванни і нестабільність електричної дуги [17]. Зважаючи на це деякими з нормативних документів нормуються діапазони границі міцності дроту (табл. 3), які, як вважається, забезпечують стабільність при його використанні у більшості типів зварювального обладнання.

Таблиця 3 – Вимоги ГОСТ 2246-70 до границі міцності дроту, що використовується для зварювання або наплавлювання

Діаметр дроту, мм	Границя міцності, МПа
0,3–0,5	882–1372
0,8–1,5	882–1323
1,6	882–1274
2,0	784–1176
Більше 2,0	686–1029

Оцінку рівномірності розподілу внутрішніх напружень (рівноважності) дроту, змотаного у бухти або намотаного на спеціальні котушки, проводять методом визначення підйому кінців його витків (площинність витка, що лежить на горизонтальній поверхні плити). Згідно вимог ДСТУ EN ISO 544:2019 «Матеріали зварювальні. Технічні умови постачання присадних матеріалів і флюсів. Тип продукції, розміри, допуски та маркування» висота підйому кінців витка дроту не повинна перевищувати 50 мм для котушок із зовнішнім діаметром більше 200 мм. Занадто висока нерівноважність зварювального дроту викликає коливання торця електрода, які можуть спровокувати появу дефектів зварного шву типу несплавлення, непровару кореня тощо [17].

Вимоги до якості поверхні зварювального дроту зазвичай регламентують відсутність тріщин, розшарування, закатів, плен, раковин, окалини, іржі, мастила та інших забруднень. Допускається наявність окремих волоочільних рисок, подряпин, слідів шліфування та вм'ятин, що за своєю глибиною не перевищують граничні відхилення за діаметром дроту. Наявність глибоких поверхневих дефектів може призводити до підвищеного зносу каналу струмопідвідного мундштука при зварюванні. Якість поверхні дроту визначає довговічність мідних мундшуків та гнучких каналів подачі електродного дроту шлангових тримачів напівавтоматів, але суттєво не впливає на стабільність процесу зварювання та якість зварних з'єднань [17]. Зважаючи на це, глибина поверхневих дефектів на бунтовому прокаті, що використовується у якості сировини для виробництва зварювального дроту, обов'язково підлягає нормуванню.

На практиці оцінку зварювально-технологічних властивостей дроту проводять на основі інтенсивності розбризкування металу та стабільності процесу зварювання [17]. Однією з причин підвищеного розбризкування металу та нестабільності електричної дуги при зварюванні може бути наявність мікропорожнин всередині дроту та великих неметалевих включень. Поява мікропорожнин у металі після волочіння здебільшого зумовлена наявністю твердих фаз типу бейніту або мартенситу у феритній матриці, про що буде йти мова нижче. Неметалеві ж включення потрапляють у метал або утворюються у ньому в процесі металургійного виробництва. Наявність неметалевих включень у зварювальному дроті не унормована, що, за думкою авторів, потребує перегляду і має стати об'єктом подальших досліджень.

Традиційно використовуваними профілерозмірами зварювального і наплавного дроту зі сталі CrMoV1Si та її аналогів і модифікацій є діаметри 1,2–3,0 мм. Комплекс показників якості зварювального дроту

визначається як технологією його виробництва, так і насамперед якістю сталевого прокату, з якого він виготовлений. Сучасна технологія виробництва дроту з низьковуглецевих легованих сталей пов'язана з необхідністю використання як металургійної сировини високоякісного сталевого прокату малого діаметру (5,5 мм), який повинен перероблятися без додаткових матеріальних витрат на проміжне термічне оброблення дротяної заготовки для запобігання передчасного руйнування металу в процесі волочіння [18]. Якість прокату своєю чергою залежить від хімічного складу, способу виробництва сталі, режиму термомеханічної обробки (ТМО) та інших факторів.

Незважаючи на те, що в теперішній час існують численні способи охолодження бунтового прокату в потоці безперервних дрібносоротно-дротяних станів, одним з найпоширеніших в сучасній металургійній практиці є спосіб охолодження, який зветься Стелмор-процесом, а технологічна ділянка охолодження металу – лінією двостадійного водоповітряного охолодження (рис. 1) [19]. У складі такої лінії прокат після виходу з чистової кліти дротяного блоку охолоджується водою спеціальними форсуночними пристроями, а після розкладання на витки на роликівому конвеєрі – під зачиненими теплоізоляційними кришками (уповільнено) або повітряними потоками, які нагнітаються дуттьовими вентиляторами знизу-вгору (прискорено) [19, 20].

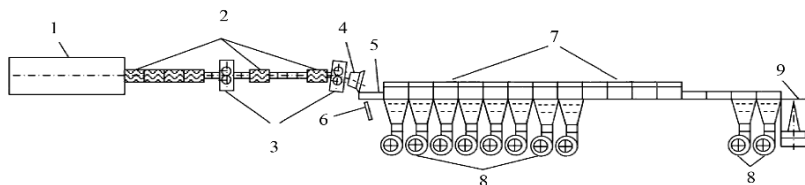


Рисунок 1 – Схема розташування основного обладнання на стадії водоповітряного охолодження бунтового прокату [19]: 1 – дротяний прокатний блок; 2 – ділянка водяного охолодження; 3 – трайбапарати; 4 – виткоутворювач; 5 – приймальний стіл витків прокату; 6 – пірометр; 7 – ділянка регульованого повітряного охолодження з роликівим конвеєром і теплоізоляційними кришками; 8 – дуттьові повітряні вентиляторні системи; 9 – шахта виткозбірника

Якість прокату з низьковуглецевих сталей здебільшого визначається температурно-деформаційними параметрами формозміни в чистових прокатних блоках, температурою розкладання прокату на витки і швидкістю його охолодження на роликівому конвеєрі. Деформування в чистових блоках є складним процесом, зумовленим взаємодією металу й інструменту в прокатних клітях, що мають спільний привід, і

виникненням міжклітьових зусиль. Високі швидкості прокатування (до 120 м/с) і малі відстані між клітьми в прокатних блоках зумовлюють реалізацію процесів зміцнення і знеміцнення металу. Високі швидкості прокатування також впливають на теплообмін металу з прокатним інструментом та навколишнім середовищем, а також на температуру звершення гарячого деформування, що разом із подальшим охолодженням визначає мікроструктуру та властивості готового продукту [21]. Відновлювальні структурні зміни (рис. 2), що відбуваються як у процесі гарячого деформування аустеніту, так і безпосередньо після його завершення (полігонізація, динамічна, метадинамічна та статична рекристалізація), є визначальними при різних схемах ТМО сталевого прокату [18]. Саме тому питанням регулювання величини динамічно рекристалізованого аустенітного зерна шляхом прискореного водяного охолодження металу від температури закінчення гарячого деформування до температури розкладання прокату на витки перед початком стадії повітряного охолодження на лінії Стелмор слід приділяти особливу увагу при розробці режимів знеміцувальної ТМО.

З метою створення умов ефективного охолодження металу постійно удосконалюються конструктивні особливості обладнання лінії Стелмор. Наприклад, при виробництві прокату з середньо- і високовуглецевих марок сталі використовується «коротка» лінія Стелмор (довжиною 45–60 м), а для низьковуглецевих легованих, в тому числі і складнолегованих сталей зварювального призначення потрібен уповільнений режим охолодження, що обумовило створення лінії «довгий» Стелмор (довжиною 100–120 м), яка є більш ефективною і універсальною [22]. Конструктивні особливості такої лінії дозволяють гнучко реалізувати різноманітні режими ТМО прокату.

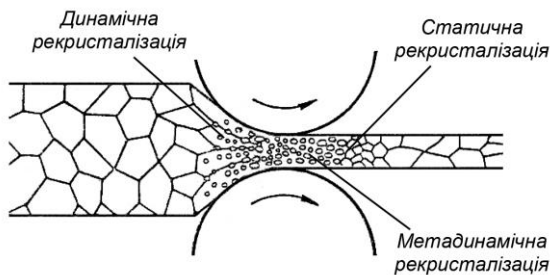


Рисунок 2 – Схема протікання динамічних і статичних відновлювальних процесів при гарячому деформуванні сталі методом високошвидкісного прокатування [18]

Складна система легування сталі CrMoV1Si (підвищений вміст Cr, Mo, Mn, Si, V) зумовлює формування мультифазного структурного стану прокату після охолодження на лінії Стелмор з наявністю у феритній матриці перліту, бейніту і мартенситу у різних співвідношеннях. З огляду на безперервну модернізацію волочильного обладнання та вдосконалення технологічних схем виготовлення зварювального дроту можливість отримання прокату з мінімальною кількістю твердих структур гартівного типу (мартенситу та бейніту) стає все більш актуальною проблемою, вирішення якої спрямоване на підвищення продуктивності та зниження матеріальних витрат, що пов'язані з проведенням проміжного відпалу переробної заготовки. Відомо [23-26], що бейніто-мартенситні ділянки (БМД) в структурі прокату-дроту (рис. 3а) є природними концентраторами напружень і призводять до зниження технологічної пластичності металу в умовах складного напружено-деформованого стану в осередку деформації при реалізації процесу волочіння. Це зумовлює появу так званих шевронних тріщин (рис. 3б) на поверхні дротяної заготовки та внутрішніх дефектів у вигляді порушень суцільності металу (рис. 4), що своєю чергою призводить до підвищеної обривності дроту при волочінні, а також порушення технологічного процесу зварювання або наплавлювання через нестабільність електричної дуги.

Вказані обставини визначають необхідність розробки науково обґрунтованої технології знеміцнювальної ТМО прокату з легуваних сталей зварювального призначення з використанням всього арсеналу можливостей сучасних металургійних підприємств, що дозволить забезпечити його подальше енергоефективне перероблення у зварювальний дріт різних профілерозмірів. Цей процес неможливий без фундаментальних знань з кінетики перетворень переохолодженого аустеніту в низьковуглецевих Cr-Mo-V сталях як за безперервного охолодження, так і в ізотермічних умовах. Аналіз літературних джерел показав відсутність відомостей про якісні та кількісні параметри розпаду аустеніту в сталі CrMoV1Si (Св-08ХГСМФА) та її модифікаціях, що не дозволяє встановити температурні режими обробки тиском та інтервали швидкостей безперервного охолодження, в межах яких відбувається формування поліпшеної структури й раціонального комплексу показників якості прокату. Таким чином, проведення досліджень в цьому напрямку є актуальним і представляє інтерес з наукової та практичної точок зору.

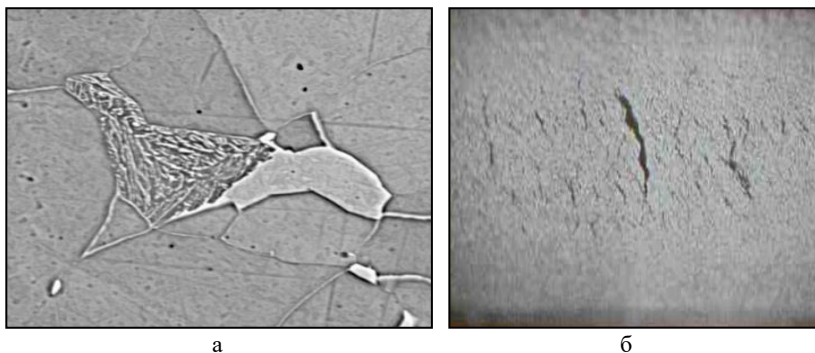


Рисунок 3 – Характерний вигляд БМД в структурі прокату зварювального призначення (а) [27] і тріщини на поверхні дроту (б) [28]: а – скануюча електронна мікроскопія ($\times 5000$); б – світлова оптична мікроскопія ($\times 10$)

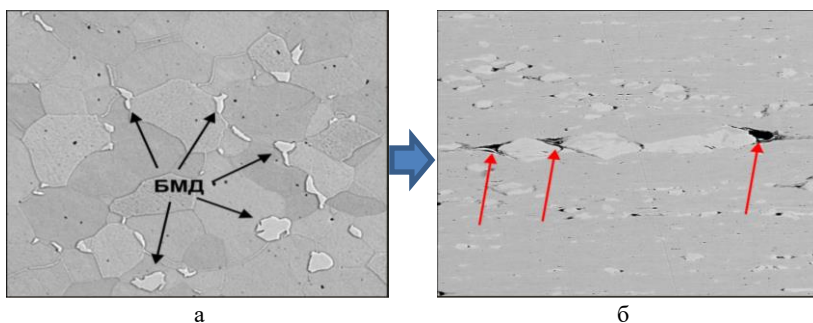


Рисунок 4 – Еволюція мікроструктури прокату-дроту в процесі волочіння (скануюча електронна мікроскопія, $\times 3000$). Стрілками на (б) показані мікропорожнини навколо БМД: а – прокат перед волочінням; б – дріт після волочіння

Враховуючи те, що найновіше високопродуктивне обладнання для волочіння сталевих дроту передбачає використання високоякісної металургійної заготовки – бунтового прокату круглого перерізу, слід більш детально розглянути сучасні вимоги до такого прокату, зокрема з низьковуглецевих легованих сталей зварювального призначення, і визначити головні пріоритети у показниках його якості з урахуванням характеристик самих зварювальних матеріалів. Аналіз наявних національних нормативів на бунтовий прокат зварювального призначення з легованих сталей і закордонних інформаційних ресурсів показав відсутність єдиних стандартів на таку металопродукцію, а кожне підприємство-виробник розробляє і затверджує власні специфікації або технічні умови на постачання прокату. В Україні та

країнах ближнього зарубіжжя – це технічні умови, що реєструються у системі стандартизації, а за кордоном – технічні специфікації, що є частково відкритими для ознайомлення, при цьому конкретні показники якості узгоджуються при розміщенні замовлення на відповідний вид прокату. Вказана обставина ускладнює системний аналіз і порівняння вимог до такого типу металопродукції.

Авторами до розгляду були прийняті наступні нормативні документи та інформаційні матеріали:

- ТУ У 24.1-23365425-710:2019 «Катанка для виготовлення зварювального дроту. Технічні умови» (ПІПАТ «Камет-Сталь», Україна);

- ТУ 14-15-346-94 «Катанка з легованої сталі для виготовлення зварювального дроту. Технічні умови» (ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг», Україна);

- ТУ У 27.1-24432974-020:2010 «Катанка для виготовлення зварювального та наплавлювального дроту. Технічні умови» (ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг», Україна);

- ТУ У 27.1-233654425-653:2010 «Катанка підвищеної деформованості з легованої сталі для виготовлення зварювального дроту прямим волочінням. Технічні умови» (ВАТ «Молдавський металургійний завод», Молдова);

- ТО/ТС-СС-01-2008 «Технічна угода про умови поставки катанки з легованої сталі для виготовлення зварювального дроту» (Україна, Молдова);

- web-сайти та буклети закордонних виробників Saarstahl (Німеччина), Voestalpine (Австрія), COBE Steel (Японія), POSCO, Hyundai Welding (Південна Корея), Moravia Steel (Чехія), Baosteel (Китай), ICDAS Celik (Туреччина), TATA Steel (Індія) та ін.

До основних якісних показників бунтового прокату зварювального призначення належать: хімічний склад сталі; точність і стабільність геометричних розмірів; глибина поверхневих дефектів; кількість окалини на поверхні; макро- і мікроструктура; механічні властивості. Ґрунтуючись на аналізі актуальних нормативних документів і наявних власних доробок авторів до цільових показників якості бунтового прокату зварювального призначення малого перерізу (діам. 5,5 мм) слід віднести наступні:

- хімічний склад сталі при виготовленні прокату повинен відповідати вимогам відповідних нормативів і специфікацій на зварювальний дріт (табл. 1);

- граничні відхилення за діаметром прокату не повинні перебільшувати $\pm 0,25$ мм, овальність – не більше 0,35 мм;

- прокат не повинен мати поверхневих дефектів, таких як розкатані бульбашки, тріщини і забруднення, прокатні плени, закати, вуса; дозволена наявність відбитків, рябизни, рисок, окремих дрібних плен, глибина яких не перевищує 0,20 мм;

- маса окалини на поверхні прокату не повинна перевищувати 12 кг/т;

- у макроструктурі прокату не дозволяються порушення суцільності металу, спричинені наявністю усадкових раковин, пор, пузирів, розшарувань, внутрішніх тріщин та шлакових включень;

- мікроструктура прокату має бути ферито-перлітною, дозволяється наявність бейніто-мартенситних ділянок за умови виконання вимог до механічних властивостей;

- в прокаті величина дійсного зерна не повинна бути більшою за бал 5 згідно з ДСТУ 8972:2019 з розбіжністю у партії не більше трьох номерів (оптимальний розмір 6–9 бал).

Окремо слід розглянути вимоги до механічних властивостей прокату. Враховуючи те, що бунтовий прокат з легованих сталей зварювального призначення є переробною заготовкою, що у подальшому піддається холодному деформуванню волочінням під час виготовлення дроту, то до основних показників його механічних властивостей відносять границю міцності та відносне звуження під час випробувань на розтяг. Границя міцності при цьому виступає у якості критерія для розрахунку необхідних тягових зусиль волочильного обладнання і попереднього оцінювання деформаційного зміцнення металу в процесі волочіння дроту.

Визначення залежності зміцнення дроту від технологічних факторів процесу волочіння та створення на цих засадах інженерних методик розрахунку показників міцності холоднодеформованого дроту є одним з актуальних завдань дротяного виробництва. При всій складності процесу зміцнення основний вплив на нього чинить ступінь деформації та нагрівання дроту при волочінні, а отже, пов'язані з цим процеси, що протікають у наклепаному металі, які додатково зміцнюють (динамічне старіння) або знеміцнюють (повернення, полігонізація) дріт. Накопичений багаторічний досвід авторів цієї роботи з аналізу зміни механічних властивостей низьковуглецевих легованих сталей у процесі волочіння [29] дозволив розробити методику прогнозного визначення міцності сталевого дроту зварювального призначення за деформаційними переходами, що базується на відомому рівнянні Туленкова-Золотнікова [30], яке було модифіковане шляхом уведення емпіричного коефіцієнту k , що враховує хімічний склад і структурний стан сталі та, відповідно, рівень її деформаційного зміцнення під час прямого (без знеміцнювальної термічної обробки дротяної заготовки на

проміжному діаметрі) холодного деформування на сучасних волочильних станах:

$$R_m^{dp} = k \cdot R_m^{np} \cdot \sqrt{\frac{D}{d}},$$

де R_m^{dp} – границя міцності дроту, МПа; R_m^{np} – границя міцності бунтового прокату, МПа; k – емпіричний коефіцієнт, що враховує хімічний склад сталі; D – діаметр бунтового прокату, мм; d – діаметр дроту, мм.

Як відомо [31, 32], зростання показників міцності сталей у процесі холодного деформування насамперед пов'язане з підвищенням щільності дислокацій і механізмами протидії їхньому переміщенню. Вміст легувальних елементів впровадження (С), заміщення (Cr, Mo, Ni, V, Mn, Si та ін.) і природні домішки (N, H) чинять суттєвий вплив на ступінь закріплення дислокацій, що наведені холодним деформуванням. Для низьковуглецевих сталей ($C \leq 0,15$ % wag.) з додатковим легуванням Cr (0,70–1,30 %), Mo (0,50–1,30 %), V (0,10–0,30 %), Mn (0,70–1,60 %) і Si (0,20–0,80 %), що мають феритну матрицю, емпіричний коефіцієнт k відповідає інтервалу значень 1,17–1,22.

На рис. 5 показана залежність деформаційного зміцнення дроту з низьковуглецевих Cr-Mo-V сталей від міцності бунтового прокату діам. 5,5 мм під час його прямого волочіння, що була визначена за допомогою описаної вище авторською методики. З наведеної залежності витікає, що для гарантованого забезпечення після прямого волочіння унормованих показників міцності зварювального дроту діам. 1,2–3,0 мм (табл. 3) границя міцності бунтового прокату діам. 5,5 мм у вихідному стані не повинна перевищувати 550 МПа. При підвищенні цього показника вище 600 МПа виникає необхідність проведення знеміцнювальної термічної обробки (рекристалізаційного відпалу) дротяної заготовки на проміжному розмірі.

Пластичність металу за стандартних випробувань на розтяг характеризується максимальною деформацією до руйнування: видовженням зразка або зменшенням площі його поперечного перерізу. Для бунтового прокату з низьковуглецевих сталей відносно звуження під час випробувань на розтяг побічно характеризує матеріал з точки зору його готовності до формозміни шляхом холодного пластичного деформування. Практика перероблення прокату з легованих сталей зварювального призначення у дріт показала [23], що мінімально достатнім рівнем відносного звуження металу перед початком прямого волочіння з діам. 5,5 мм до діам. 2,0 мм включно слід вважати $Z \geq 65$ %,

а до діам. 1,2 мм – $Z \geq 70\%$. Такі показники пластичності прокату, поряд з мінімальною кількістю твердих фаз (бейніт, мартенсит) у його мікроструктурі, дозволяють забезпечити високу технологічність металу під час глибокого волочіння зі значними ступенями відносної деформації (до 95 %).

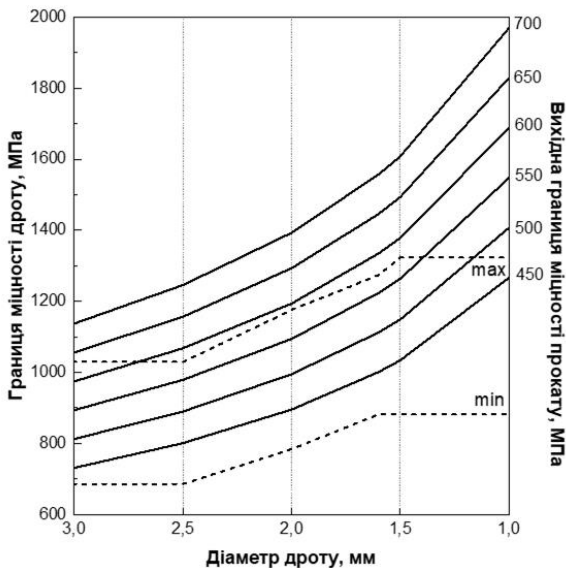


Рисунок 5 – Вплив границі міцності бунтового прокату діам. 5,5 мм з низьковуглецевих Cr-Mo-V сталей на деформаційне зміцнення дроту: суцільними лініями позначені криві деформаційного зміцнення; пунктирними – обмежена область нормативних вимог у відповідності до ГОСТ 2246-70

Отже, до цільових показників механічних властивостей бунтового прокату зварювального призначення з Cr-Mo-V сталей, що сприяють його високій технологічності при переробленні у дріт діам. до 1,2 мм, слід віднести такі: границя міцності $R_m \leq 550$ МПа; відносне звуження $Z \geq 70\%$.

Висновки

За результатами проведеного аналізу сучасних науково-технічних інформаційних джерел встановлено, що за останні десятиріччя опубліковано значну кількість робіт, які присвячено дослідженню різних аспектів виробництва й використання прокату і дроту з низьковуглецевих Cr-Mo-V сталей зварювального призначення.

Показано, що у зв'язку з безперервною модернізацією волочильного обладнання та вдосконаленням технологічних схем виготовлення зварювального дроту залишається недостатньо вивченою низка питань, які пов'язані з проблемою формування в умовах металургійних підприємств оптимального структурного стану та властивостей бунтового прокату з низьковуглецевих легованих сталей з метою підвищення його деформованості при виробництві зварювальних матеріалів. Ця проблема є актуальною з наукової та практичної точки зору, а її вирішення має підвищити продуктивність дротяного виробництва завдяки зниженню матеріальних витрат, пов'язаних з необхідністю проведення додаткової операції знеміцнювальної термічної обробки переробної заготовки.

Розглянуто низку питань щодо сучасних вимог нормативної документації та специфікацій кращих світових і вітчизняних виробників прокату з легованих сталей зварювального призначення та визначені основні цільові показники якості відповідної металопродукції з урахуванням характеристик самих зварювальних матеріалів.

З огляду на сучасні тенденції зростання вимог до споживчих властивостей переробного металопркату, недостатню базу раніше отриманих результатів, а також нагальну потребу у повоєнному відновленню України в рамках реновації пошкоджених промислових об'єктів і транспортної інфраструктури, для успішного розв'язання проблеми підвищення деформованості виробів з низьковуглецевих Ст-Мо-V сталей зварювального призначення доцільним слід вважати проведення комплексного дослідження, що включало б вирішення наступних науково-практичних завдань:

- встановлення особливостей перебігу фазово-структурних перетворень в досліджуваних сталях;

- дослідження впливу параметрів термічної та деформаційної обробки на формування мікроструктури (зеренна структура, тип, морфологія і розподілення структурних складових тощо) й тонкої структури сталі (внутрішня будова структурних складових, дислокаційна субструктура фаз тощо), а також механічних властивостей металу;

- визначення на засадах встановлених закономірностей температурно-деформаційних параметрів знеміцнювальної обробки прокату з легованих сталей, що забезпечують підвищення деформованості металу і зниження матеріальних витрат при виробництві зварювального та наплавного дроту;

- розробку науково обґрунтованих рекомендацій щодо модернізації існуючих виробництв і визначення складу та параметрів обладнання при проєктуванні нових з урахуванням конструктивних особливостей

основного устаткування та послідовності технологічних операцій при виготовленні прокату-дроту.

Результати таких досліджень складуть підґрунтя для створення нових технологічних рішень щодо контрольованого керування процесами структуроутворення низьковуглецевих Cr-Mo-V сталей та забезпечать отримання зварювальних матеріалів за зменшених матеріальних витрат, виробництво яких наразі в Україні відсутнє.

Перелік посилань

1. Anokhov A. E. On some features of repair welding without heat treatment of power-generating equipment made of pearlite steels. *Power Technol Eng.* 2021. Vol. 55. P. 613–619. <http://doi.org/10.1007/s10749-021-01406-z>
2. Hilkes J., Gross V. Welding CrMo steels for power generation and petrochemical applications - Past, present and future. *Biuletyn Instytutu Spawalnictwa.* 2013. No. 2. P. 11–22. URL: <https://www.scribd.com/document/218810353/02-Hilkes-Gross-Welding-of-CrMo-Steels-for-Power-Generation-and-Petrochemical-Applications>
3. Venkata Rao R., Kalyankar V. D. Experimental investigation on submerged arc welding of Cr–Mo–V steel. *Int Jour Adv Manuf Tech.* 2013. Vol. 69(1–4). <http://doi.org/10.1007/s00170-013-5007-9>
4. KOBE STEEL LTD. Arc welding of specific steels and cast irons. Tokyo, Japan, 2015. 170 p.
5. Abe F. Precipitate design for creep strengthening of 9% Cr tempered martensitic steel for ultra-supercritical power plants. *Sci. Technol. Adv. Mater.* 2008. Vol. 9. 013002. <http://doi.org/10.1088/1468-6996/9/1/013002>
6. Hayashi T., Sarosi P. M., Schneibel J. H., Mills M. J. Creep response and deformation processes in nanocluster-strengthened ferritic steels. *Acta Mater.* 2008. Vol. 56. P. 1407–1416. <http://doi.org/10.1016/j.actamat.2007.11.038>
7. Martin J. W. Micromechanisms in particle-hardened alloys. Cambridge University Press : Cambridge, UK, 1980. 193 p.
8. Efimenko N. G., Artyomova S. V. Welding of defects in cast cases of turbines with pearlite electrodes without heating and thermal processing. *PAST.* 2020. No. 4(128). P. 84–88. URL: https://vant.kipt.kharkov.ua/ARTICLE/VANT_2020_4/article_2020_4_84.pdf
9. Vujnovic L., Perunicic V., Sijacki Zeravcic V. M., Bakic G. M. Welding flaws of pipeline heat resistant steels. *Trends in the Development of Machinery and Associated Technology (TMT 2009) : Materials of 13th International Research / Expert Conference, Hammamet, Tunisia, 16-21 October 2009.* P. 917–920. URL: <https://www.tmt.unze.ba/zbornik/TMT2009/230-TMT09-263.pdf>
10. Dmitrik V. V., Grinchenko E. D., Syrenko T. O. The structure of the superheated region of the heat-affected zone of the welded joint in heat-resisting pearlitic steels. *Welding International.* 2011. Vol. 25. Iss. 11. P. 868–871. <http://doi.org/10.1080/09507116.2011.581425>
11. Shang C., Wang Q., Wang X., Jia Y., Wu J., Yang S., Guo J., Zheng L. Practice of JCO welding process for Cr-Mo series heat-resistant pearlite steel pipe. *Steel Pipe.* 2016. Vol. 45(4). P. 18–22.

12. ДСТУ EN ISO 21952:2015. Зварювальні матеріали. Дроти електродні, дроти, прутки та наплавлений метал для дугового зварювання жароміцних сталей у захисних газах. Класифікація (EN ISO 21952:2012, IDT; ISO 21952:2012, IDT). Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2015.

13. ДСТУ EN ISO 3580:2019. Зварювальні матеріали. Електроди з покриттям для ручного дугового зварювання жароміцних сталей. Класифікація (EN ISO 3580:2017, IDT; ISO 3580:2017, IDT). Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2019.

14. ГОСТ 2246-70. Проволока стальная сварочная. Технические условия (переизд. июнь 1993 г.). Москва : Издательство стандартов, 1993.

15. Prikhod'ko E. V. Methodology for determining the parameters of directed interatomic interaction in molecules and crystals. *Metallophysics and New Technologies*. 1995. No. 11. P. 54–60.

16. Prikhod'ko E. V., Tohobitskaia D. N. The properties of metallurgical melts are a consequence of their composition and structure. *Modern Problems of Physical Materials Science*. 2017. Vol. 26. P. 124–138.

17. Turyk E. V. Manufacturing defects in welding consumables influencing the quality of welded joints. *The Paton Welding Journal*. 2014. No. 6–7. P. 103–106. <http://doi.org/10.15407/tpwj2014.06.22>

18. Олійник Е. В., Парусов Е. В., Чуйко І. М. Теоретичні та технологічні засади знеміцнюючого термомеханічного оброблення сталевого прокату зварювального призначення. *Інформаційні технології в металургії та машинобудуванні – ІТММ '2024* : матер. міжнар. наук.-техн. конф., м. Дніпро, 10–11 квітня 2024 р. Дніпро : УДУНТ, 2024. С. 57–64. <http://doi.org/10.34185/1991-7848.itmm.2024.01.010>

19. Парусов В. В., Сычков А. Б., Парусов Э. В. Теоретические и технологические основы производства высокоэффективных видов катанки. Днепропетровск : АРТ-ПРЕСС, 2012. 376 с.

20. Парусов Э. В., Сычков А. Б., Губенко С. И., Чуйко И. Н. Анализ технологических особенностей охлаждения бунтового проката на линии Стелмор ОАО «ММЗ». *Наукові праці ВНТУ*. 2016. № 3. С. 1–8.

21. Laber K. B. Analysis of the uniformity of mechanical properties along the length of wire rod designed for further cold plastic working processes for selected parameters of thermoplastic processing. *Materials*. 2024. Vol. 17(4). 905. <http://doi.org/10.3390/ma17040905>

22. Парусов Е. В., Сычков О. Б., Губенко С. И., Малашкин С. О., Сагура Л. В. Про ефективні шляхи вдосконалення режимів регульованого повітряного охолодження бунтового прокату в промислових умовах. *Наукові праці ВНТУ*. 2017. № 3. С. 1–9.

23. Структура и свойства катанки для изготовления электродов и сварочной проволоки : монография / А. Б. Сычков и др. Бендеры : Полиграфист, 2009. 608 с.

24. Das S., Talukdar S., Kumar A., Mukhopadhyay G. Metallurgical investigation of welding wire rod grade during processing. *Engineering Failure Analysis*. 2020. Vol. 118. 104884. <http://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2020.104884>

25. Asati B., Shajan N., Arora K. S. Development of high strength welding consumable for arc welding carbon steels. *Materials Today: Proceedings*. 2023. <http://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.07.007>

26. Zhao H., Wang S., Gao J., Qi J., Su R., Zhang H., Chen H., Tian Z., Bai L. Cause analysis of V-shaped crack pairs on drawn welding wire surface of ER70S-6 steel. *Metall. Res. Technol.* 2022. Vol. 119(5). 510. <http://doi.org/10.1051/metal/2022070>

27. Парусов В. В., Сычков А. Б., Чуйко И. Н., Парусов О. В., Жукова С. Ю., Жигарев М. А., Перчаткин А. В. Влияние химического состава на структуру, свойства и технологическую пластичность катанки сварочного назначения из стали Св-08ГНМ. *Теория и практика металлургии*. 2009. № 1–2. С. 98–102.

28. Парусов В. В., Чуйко И. Н., Сычков А. Б., Парусов О. В., Парусов Э. В. Влияние режимов термомеханической обработки на качественные характеристики катанки из стали марки 30ХГСА и ее технологичность. *Строительство, материаловедение, машиностроение* : сб. научн. труд. Днепропетровск : ПГАСА, 2013. Вып. 67. С. 25–27.

29. Парусов В. В., Чуйко И. Н., Парусов О. В., Сычков А. Б., Жигарев М. А., Перчаткин А. В., Жукова С. Ю. Оценка технологичности переработки катанки из легированных сталей сварочного назначения на метизном переделе. *Строительство, материаловедение, машиностроение* : сб. научн. тр. Днепропетровск : ПГАСА, 2009. Вып. 48. Ч. 2. С. 8–11.

30. Туленков К. И., Злотников М. И., Бобылева С. Ф. Механические свойства стальной наклепанной проволоки. *Сталь*. 1956. № 9. С. 821–825.

31. Губенко С. И., Парусов В. В. Деформация металлических материалов. Днепропетровск : АРТ-ПРЕСС, 2006. 316 с.

32. Gubenko S. Physical nature of plasticity and strengthening of metals during deformation. Germany-Mauritius : Beau Bassin. LAP LAMBERT Academic publishing, 2020. 341 p.

References

1. Anokhov, A. E. (2021). On some features of repair welding without heat treatment of power-generating equipment made of pearlite steels. *Power Technol Eng*, 55, 613-619. <http://doi.org/10.1007/s10749-021-01406-z>

2. Hilkes, J., & Gross, V. (2013). Welding CrMo steels for power generation and petrochemical applications - Past, present and future. *Biuletyn Instytutu Spawalnictwa*, (2), 11-22. <https://www.scribd.com/document/218810353/02-Hilkes-Gross-Welding-of-CrMo-Steels-for-Power-Generation-and-Petrochemical-Applications>

3. Venkata Rao, R., & Kalyankar, V. D. (2013). Experimental investigation on submerged arc welding of Cr–Mo–V steel. *Int Jour Adv Manuf Tech*, 69(1-4). <http://doi.org/10.1007/s00170-013-5007-9>

4. KOBE STEEL LTD. (2015). *Arc welding of specific steels and cast irons*.

5. Abe, F. (2008). Precipitate design for creep strengthening of 9% Cr tempered martensitic steel for ultra-supercritical power plants. *Sci. Technol. Adv. Mater*, 9, 013002. <http://doi.org/10.1088/1468-6996/9/1/013002>

6. Hayashi, T., Sarosi, P. M., Schneibel, J. H., & Mills, M. J. (2008). Creep response and deformation processes in nanocluster-strengthened ferritic steels. *Acta Mater*, 56, 1407-1416. <http://doi.org/10.1016/j.actamat.2007.11.038>

7. Martin, J. W. (1980). *Micromechanisms in particle-hardened alloys*. Cambridge University Press.

8. Efimenko, N. G., & Artyomova, S. V. (2020). Welding of defects in cast cases of turbines with pearlite electrodes without heating and thermal processing. *PAST*, 4(128), 84-88. https://vant.kipt.kharkov.ua/ARTICLE/VANT_2020_4/article_2020_4_84.pdf

9. Vujnovic, L., Perunicic, V., Sijacki Zeravcic, V. M., & Bakic, G. M. (2009, 16-21 October). Welding flaws of pipeline heat resistant steels. *Trends in the Development of Machinery and Associated Technology (TMT 2009), 13th International Research / Expert Conference*, Tunisia, 917-920. URL: <https://www.tmt.unze.ba/zbornik/TMT2009/230-TMT09-263.pdf>

10. Dmitrik, V. V., Grinchenko, E. D., & Syrenko, T. O. (2011). The structure of the superheated region of the heat-affected zone of the welded joint in heat-resisting pearlitic steels. *Welding International*, 25(11), 868-871. <http://doi.org/10.1080/09507116.2011.581425>

11. Shang, C., Wang, Q., Wang, X., Jia, Y., Wu, J., Yang, S., Guo, J., & Zheng, L. (2016). Practice of JCO welding process for Cr-Mo series heat-resistant pearlite steel pipe. *Steel Pipe*, 45(4), 18-22.

12. DSTU EN ISO 21952:2015. Zvariuvanni materialy. Droti elektrodni, droti, prutki ta naplavljeni metal dlia duhovoho zvariuvannia zharomitsnykh stalei u zakhysnykh hazakh. Klasyfikatsiia [Welding materials. Wire electrodes, wires, rods and filler metal for arc welding of heat-resistant steels in shielding gases. Classification] (EN ISO 21952:2012, IDT; ISO 21952:2012, IDT) [In Ukrainian].

13. DSTU EN ISO 3580:2019. Zvariuvanni materialy. Elektrody z pokryttiam dlia ruchnoho duhovoho zvariuvannia zharomitsnykh stalei. Klasyfikatsiia [Welding materials. Covered electrodes for manual arc welding of heat-resistant steels. Classification] (EN ISO 3580:2017, IDT; ISO 3580:2017, IDT) [In Ukrainian].

14. GOST 2246-70. Provoloka stalnaia svarochnaia. Tekhnicheskie usloviia [Steel welding wire. Technical conditions] (reissue July 1993) [In Russian].

15. Prikhod'ko, E. V. (1995). Methodology for determining the parameters of directed interatomic interaction in molecules and crystals. *Metallophysics and New Technologies*, (11), 54-60.

16. Prikhod'ko, E. V., & Tohobitskaia, D. N. (2017). The properties of metallurgical melts are a consequence of their composition and structure. *Modern Problems of Physical Materials Science*, (26), 124-138.

17. Turyk, E. V. (2014). Manufacturing defects in welding consumables influencing the quality of welded joints. *The Paton Welding Journal*, (6-7), 103-106. <http://doi.org/10.15407/tpwj2014.06.22>

18. Oliinyk, E. V., Parusov, E. V., & Chuiko, I. M. (2024, 10-11 April). Teoretychni ta tekhnolohichni zasady znemitsniuuchoho termomekhanichnogo oboblennia stalevoho prokatu zvariuvannoho pryznachennia [Theoretical and technological principles of softening thermomechanical processing of steel wire rod for welding purposes]. *Technologies in Metallurgy and Machine building – ITMM*

2024, Dnipro, Ukraine, 57-64. UDUNT. [In Ukrainian].
<http://doi.org/10.34185/1991-7848.itmm.2024.01.010>

19. Parusov, V. V., Sychkov, A. B., & Parusov, E. V. (2012). *Teoreticheskie i tekhnologicheskie osnovy proizvodstva vysokoeffektivnykh vidov katanki* [Theoretical and technological foundations for the production of highly efficient types of wire rod]. ART-PRESS. [In Russian].

20. Parusov, E. V., Sychkov, A. B., Gubenko, S. I., & Chuiko, I. N. (2016). Analiz tekhnologicheskikh osobennostei okhlazhdeniia buntovoho prokata na linii Stelmor OAO «MMZ» [Analysis of technological features of cooling rolled metal on the Stelmor line of OJSC MSW]. *Scientific Works of VNTU*, (3), 1-8. [In Russian].

21. Laber, K. B. (2024). Analysis of the uniformity of mechanical properties along the length of wire rod designed for further cold plastic working processes for selected parameters of thermoplastic processing. *Materials*, 17(4), 905. <http://doi.org/10.3390/ma17040905>

22. Parusov, E. V., Sychkov, O. B., Gubenko, S. I., Malashkin, S. O., & Sahura, L. V. (2017). Pro efektyvni shliakhy vdoskonalennia rezhymiv rehulovanoho povitrianooho okholodzhennia buntovoho prokatu v promyslovykh umovakh [On effective ways to improve the modes of regulated air cooling of wire rod in industrial conditions]. *Scientific Works of VNTU*, (3), 1-9. [In Ukrainian].

23. Sychkov, A. B., Parusov, V. V., Nesterenko, A. M., Zhukova, S. Yu., Zhigarev, M. A., Perchatkin, A. V., Peregudov, A. V., & Chuiko, I. N. (2009). *Struktura i svoistva katanki dlia izhotovleniia elektrodov i svarochnoi provoloki* [Structure and properties of wire rod for the manufacture of electrodes and welding wire]. Poligrafist. [In Russian].

24. Das, S., Talukdar, S., Kumar, A., & Mukhopadhyay, G. (2020). Metallurgical investigation of welding wire rod grade during processing. *Engineering Failure Analysis*, 118, 104884. <http://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2020.104884>

25. Asati, B., Shajan, N., & Arora, K. S. (2023). Development of high strength welding consumable for arc welding carbon steels. *Materials Today: Proceedings*. <http://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.07.007>

26. Zhao, H., Wang, S., Gao, J., Qi, J., Su, R., Zhang, H., Chen, H., Tian, Z., & Bai, L. (2022). Cause analysis of V-shaped crack pairs on drawn welding wire surface of ER70S-6 steel. *Metall. Res. Technol*, 119(5), 510. <http://doi.org/10.1051/metal/2022070>

27. Parusov, V. V., Sychkov, A. B., Chuiko, I. N., Parusov, O. V., Zhukova, S. Yu., Zhigarev, M. A., & Perchatkin, A. V. (2009). Vliianie khimicheskoho sostava na strukturu, svoistva i tekhnologicheskuiu plastichnost katanki svarochnoho naznacheniia iz stali Sv-08HNM [The influence of chemical composition on the structure, properties and technological plasticity of wire rod for welding purposes made of Sv-08HNM steel]. *Theory and Practice of Metallurgy*, (1-2), 98-102. [In Russian].

28. Parusov, V. V., Chuiko, I. N., Sychkov, A. B., Parusov, O. V., & Parusov, E. V. (2013). Vliianie rezhimov termomekhanicheskoi obrabotki na kachestvennye kharakteristiki katanki iz stali marki 30KhGSA i ee tekhnologichnost [The influence of thermomechanical processing modes on the quality characteristics

of wire rod made of 30KhGSA steel grade and its manufacturability]. *Construction. Material Science. Mechanical Engineering*, (67), 25-27. [In Russian].

29. Parusov, V. V., Chuiko, I. N., Parusov, O. V., Sychkov, A. B., Zhigarev, M. A., Perchatkin, A. V., & Zhukova, S. Yu. (2009). Otsenka tekhnologichnosti pererabotki katanki iz lehirovannykh staley svarchnoho naznachenii na metiznom peredele [Evaluation of the processability of processing wire rod from alloyed steels for welding purposes in the hardware processing section]. *Construction. Material Science. Mechanical Engineering*, 48(2), 8-11. [In Russian].

30. Tulenkov, K. I., Zolotnikov, M. I., & Bobyleva, S. F. (1956). Mekhanicheskie svoystva stalnoi naklepannoi provoloki [Mechanical properties of cold-worked steel wire]. *Stal*, (9), 821-825. [In Russian].

31. Gubenko, S. I., & Parusov, V. V. (2006). *Deformatsiia metallicheskiikh materialov* [Deformation of metallic materials]. ART-PRESS. [In Russian].

32. Gubenko, S. (2020). *Physical nature of plasticity and strengthening of metals during deformation*. Beau Bassin. LAP LAMBERT Academic publishing.

E. V. Parusov¹, D. Sc. (Tech.), Senior Researcher, ORCID 0000-0002-4560-2043

I. M. Chuiko¹, Ph. D. (Tech.), Senior Researcher, ORCID 0000-0002-4753-614X

E. V. Oliinyk¹, ORCID 0000-0002-3366-3746

O. V. Parusov¹, Ph. D. (Tech.), Senior Researcher, ORCID 0000-0002-9879-6179

¹ *Iron and Steel Institute of Z. I. Nekrasov National Academy of Sciences of Ukraine*

ANALYSIS OF TRENDS AND PROBLEMS OF THE PRODUCTION OF LOW-CARBON Cr-Mo-V STEEL WIRE ROD AND WIRE FOR WELDING PURPOSES

Abstract. High temperature resistant structural Cr-Mo and Cr-Mo-V steels have existed for more than a century and have been used with great success in the energy and chemical industries. Typical products for these industries are boilers, heaters, heat exchangers, reactors, gas turbines, hydrocrackers, high pressure vessels, etc. For welding such steels in an environment of protective gases and under a flux using a welding wire diam. 1.2–3.0 mm from low-carbon Cr-Mo-V steels, typical representatives of which include CrMoV1Si or Sv-08KhGSMFA and their analogues and modifications. A separate area of use of this wire is the recovery and repair of parts operating under conditions of abrasive wear by the surfacing method. In addition, this wire has prospects for successful application in wire-arc additive manufacturing technologies (3D printing). For the production of such a wire, as a metallurgical billet, is using the wire rod of diameter 5.5 mm, which, along with other consumer properties, should have high manufacturability during deep cold deformation by drawing by modern high-performance equipment. According to the results of the analysis of scientific and technical sources, the work summarizes the modern trends and problems in the production of low-carbon Cr-Mo-V steel wire rod and wire for welding purposes, a number of issues regarding the current requirements of regulatory documentation and specifications of the best global and domestic manufacturers of alloyed steels wire rod are considered, and the main target indicators of the quality of the corresponding metal products are determined, taking into account

the characteristics of the welding materials themselves. In order to successfully solve the urgent problem of increasing the deformability of products made of low-carbon Cr-Mo-V steels for welding purposes, a set of scientific and practical tasks has been defined, the solution of which will significantly supplement the database of previously obtained results with new knowledge about the influence of the alloying system on the course of phase-structural transformations and complex of mechanical properties of wire rod. The results of the relevant research will form the basis for the creation of new technological solutions for the controlled management of the structure formation processes of the studied steels and will ensure the production of welding materials at reduced material costs, the production of which is currently absent in Ukraine.

Key words: wire rod, welding wire, alloy steel, structure, mechanical properties

For citation: Parusov, E. V., Chuiko, I. M., Oliinyk, E. V., & Parusov, O. V. (2024). Analysis of trends and problems of the production of low-carbon Cr-Mo-V steel wire rod and wire for welding purposes. *Fundamental and applied problems of ferrous metallurgy*, 38, 431-454. <https://doi.org/10.52150/2522-9117-2024-38-431-454>

Стаття надійшла до редакції збірника 04.10.2024 р.
Рекомендовано до друку редколегією збірника (Протокол № 12 від 19.12.2024 р.)