

ОСОБЛИВОСТІ ВПЛИВУ ХІМІЧНОГО СКЛАДУ НА ФОРМУВАННЯ МЕХАНІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ НИЗЬКОВУГЛЕЦЕВИХ CR-MO-V СТАЛЕЙ ЗВАРЮВАЛЬНОГО ПРИЗНАЧЕННЯ

Олійник Е.В.¹, Парусов Е.В.², Чуйко І.М.³, Кукса О.В.⁴

¹Інститут чорної металургії ім. З.І. Некрасова НАН України, аспірант, Україна,

²Інститут чорної металургії ім. З.І. Некрасова НАН України, д.т.н., с.н.с., Україна,

³Інститут чорної металургії ім. З.І. Некрасова НАН України, к.т.н., ст. досл., Україна

⁴К.т.н., Інститут чорної металургії ім. З.І. Некрасова НАН України, Україна,

Анотація. Проведено аналіз впливу хімічного складу низьковуглецевих сталей зварювального призначення із системою легування Cr-Mn-Si-Mo-V та додатковим мікролегуванням бором на механічні властивості бунтового прокату за стаціонарного режиму термомеханічної обробки. На засадах регресійного аналізу 28 плавов побудовано прогностні моделі зміни границь міцності та плинності й відносного звуження прокату. У якості незалежних змінних для моделей було обрано фізико-хімічний еквівалент зарядового стану металевої системи та вміст бору, які найбільш тісно пов'язані з комплексом механічних властивостей сталей для обраного масиву даних. Встановлено, що додатковим резервом для зниження міцності та підвищення пластичних характеристик прокату є зменшення у межах марочного складу вмісту легувальних елементів, насамперед С і Mn. Збільшення концентрації бору призводить до додаткового зміцнення та зниження пластичності металу імовірно за рахунок зменшення середнього розміру феритних зерен. Однак мікролегування бором відіграє позитивну роль у підвищенні деформованості прокату під час подальшого волочіння дроту, зв'язуючи атомарний азот у нітриди й перешкоджаючи розвитку деформаційного старіння металу в процесі холодного пластичного деформування.

Ключові слова: хімічний склад, механічні властивості, бунтовий прокат, математична модель, мікролегування

Вступ. Споживачі бунтового прокату, який призначено для виготовлення сталевих дроту, прагнуть отримати від виробника метал з максимальною технологічною пластичністю, у зв'язку з чим наполягають на нормуванні механічних характеристик на рівні, що забезпечується після пом'якшувального відпалу для низько- і середньовуглецевих сталей або патентування високовуглецевих сталей. Оскільки металургійні підприємства у більшості випадків не мають у своєму арсеналі печей для відпалу готового прокату або

патентувальних агрегатів, то для зниження міцності та підвищення пластичних показників металу доцільно застосовувати схеми знеміцнювальної термомеханічної обробки [1]. За такої умови хімічний склад сталі, поряд з умовами її охолодження та зеренною структурою аустеніту, чинить вирішальний вплив на структуроутворення та властивості прокату, а концентрація хімічних елементів визначає термодинаміку фазових перетворень, що відбуваються у процесі регульованого охолодження металу.

Зварювальний дріт суцільного перерізу найчастіше виготовляють шляхом холодного пластичного деформування (волочіння) бунтового прокату малого діаметру (5,5–6,5 мм). Таку металопродукцію зазвичай виготовляють із низьковуглецевих сталей (0,03–0,12 % ваг. С) з різноманітними системами легування, до яких можуть входити як часто використовувані у металургійній практиці легувальні елементи (Mn, Si, Cr, Ni, Mo, V, W, Al), так і в деяких випадках спеціальні добавки (Nb, Zr, Ti, Cu, В та ін.). Для бунтового прокату, призначеного для виготовлення зварювального дроту, критично важливим є формування у процесі виробництва мікроструктури, що складається з м'якої феритної матриці та мінімальної кількості твердих продуктів проміжного й зсувного перетворень переохолодженого аустеніту. Такий структурний стан вважається сприятливим з точки зору здатності металу сприймати без руйнування холодну пластичну деформацію з високими сумарними ступенями у процесі волочіння дроту [2]. Враховуючи це, зміна концентрації тих чи інших хімічних елементів у межах марочного складу сталі може істотно впливати на кінетику дифузійного $\gamma \rightarrow \alpha$ перетворення і, відповідно, на комплекс механічних властивостей прокату після регламентованого охолодження.

Хімічні елементи можуть впливати на дифузійне фазове перетворення в сталі через два основних механізми. Перший передбачає зміну відносної стійкості аустеніту (γ) і фериту (α) завдяки термодинамічному ефекту, що може бути виражений у різниці вільних енергій Гіббса ($G^\alpha - G^\gamma$), яка називається рушійною силою перетворення. Вплив цієї величини може бути продемонстровано у вигляді діаграм фазового стану сплаву. Другий механізм є більш тонким, оскільки залежить від швидкості перетворень. Рівноважна

розчинність легувального елементу не є однаковою в аустеніті та фериті. Якщо дозволяють умови, то розчинена речовина матиме тенденцію до перерозподілу між фазовими складовими. Необхідна дифузія у такому разі здатна обмежити кінетику процесу [3]. Насамперед такий ефект можна віднести до вуглецю в сталі. Інший кінетичний вплив рівноцінної важливості обумовлюється миттєвими концентраціями розчиненої речовини, атоми якої мають можливість сегрегувати на поверхні розділу. За цих обставин вони можуть зменшувати поверхневу міжфазну енергію на одиниці площі. Це механізм, за яким бор впливає на місця гетерогенного зародження фериту. Відносно невеликі концентрації бору можуть суттєво змінювати стійкість переохолодженого аустеніту, далеко від очікуваного впливу різниці вільних енергій Гіббса α - і γ -фази [3].

Мета роботи – визначення особливостей впливу хімічного складу низьковуглецевих сталей зварювального призначення із системою легування Cr-Mn-Si-Mo-V та додатковим мікролегуванням бором на механічні властивості бунтового прокату за стаціонарного режиму термомеханічної обробки.

Матеріал і методика дослідження. Для проведення статистичного аналізу були відібрані 28 плавок сталі марок Св-08ХГ2СМФ, Св-08ХГСМФА і Св-10ХГ2СМФ з додатковим мікролегуванням бором, виплавленої в електродуговій печі, розлитої на машині безперервного лиття заготовок з наступним гарячим пластичним деформуванням до діаметру 5,5 мм на високошвидкісному дрібносоротно-дротяному прокатному стані та регламентованим водо-повітряним охолодженням на лінії Стелмор. При цьому параметри режиму термомеханічної обробки були незмінними. Статистична характеристика досліджуваних плавок наведена у табл.

Для встановлення зв'язку між механічними властивостями прокату та хімічним складом сталі використано металохімічну модель міжатомної взаємодії елементів, розроблену в Інституті чорної металургії НАН України проф. Приходько Е. В. [4]. Відповідно до цієї методики у якості «згортки» хімічного складу сталі вводяться інтегральні параметри: середньостатистична

між'ядерна відстань d і фізико-хімічний еквівалент Z^Y , що характеризує середній розподіл електронної щільності між елементами ближнього порядку і внесок основної матриці (насамперед, вмісту C, Mn, Si). Комплекс параметрів міжатомної взаємодії розраховується на засадах аналізу всіх можливих пар взаємодіючих елементів з урахуванням їх індивідуальних характеристик, встановлених квантовою фізикою, а також вмісту елементів у металевій системі.

Прогнозні моделі зміни механічних властивостей прокату побудовано з використанням стандартних методів математичної статистики (регресійним аналізом).

Таблиця 1
Статистична характеристика масиву досліджуваних даних (n = 28 плавів)

Показник*	Одиниця вимірювання	Значення		
		min	max	середнє
C	% ваг.	0,04	0,10	0,07
Mn	% ваг.	0,87	1,30	1,11
Si	% ваг.	0,22	0,57	0,36
Cr	% ваг.	0,65	0,78	0,73
Ni	% ваг.	0,06	0,10	0,08
Cu	% ваг.	0,10	0,15	0,13
Mo	% ваг.	0,22	0,54	0,41
V	% ваг.	0,15	0,19	0,17
N	% ваг.	0,006	0,015	0,008
B	% ваг.	0,005	0,009	0,007
S	% ваг.	0,002	0,013	0,006
P	% ваг.	0,010	0,016	0,012
Fe	% ваг.	96,68	97,32	96,92
R _m	МПа	455	764	614
R _e	МПа	226	549	363
Z	%	57	89	64

Примітка*: R_m – границя міцності під час розтягування; R_e – границя плинності; Z – відносне звуження.

Результати. Статистична обробка експериментальних даних показала, що збільшення концентрації всіх легувальних елементів (C, Si, Mn, Cr, Ni, V, B) підвищує характеристики міцності та зменшує пластичність досліджуваних сталей. Фізико-хімічний еквівалент Z^Y був пов'язаний з комплексом механічних властивостей сталей аналогічним чином, а структурний параметр d має від'ємний парний зв'язок з характеристиками міцності та прямий парний

зв'язок з показником пластичності. Таким чином, чим меншою є середня між'ядерна відстань d і більшим хімічний еквівалент Z^Y , тим вищою буде міцність досліджуваних сталей.

Враховуючи кількість досліджуваних плавок у вихідному масиві даних ($n = 28$), для коректної статистичної моделі можливе використання не більше двох аргументів. Аналіз достовірності даних для кожної із плавок дозволив обрати у якості незалежних змінних моделей механічних властивостей прокату фізико-хімічний еквівалент зарядового стану (Z^Y) і вміст бору (B), які найбільш тісно пов'язані з комплексом механічних властивостей сталей для обраного масиву даних. На основі регресійного аналізу для сталей Св-08ХГ2СМФ, Св-08ХГСМФА, Св-10ХГ2СМФ були отримані наступні прогнозні моделі, що адекватно узгоджуються з експериментальними даними:

$$R_m(\text{МПа}) = -11735 + 9953,333 \cdot Z^Y + 23269,05 \cdot B, (R = 0,95) \quad (1)$$

$$R_e(\text{МПа}) = -7097,61 + 6018,757 \cdot Z^Y + 9948,73 \cdot B, (R = 0,87) \quad (2)$$

$$Z(\%) = 1150,546 - 880,766 \cdot Z^Y - 1343,17 \cdot B, (R = 0,93) \quad (3)$$

Висновки. Аналіз отриманих прогнозних моделей показав, що додаткове зниження міцності та підвищення пластичних характеристик прокату з досліджуваних сталей можливе у разі зниження у межах марочного складу вмісту легувальних елементів, насамперед С і Мп.

Мікролегування бором досліджуваних сталей призводить до різноспрямованих наслідків. З одного боку, введення бору в низьковуглецеві сталі суттєво підвищує стійкість переохолодженого аустеніту в області дифузійного розпаду, знижує температуру $\gamma \rightarrow \alpha$ перетворення та сприяє формуванню феритної матриці з дрібнішим зерном у порівнянні зі сталями без бору. Дрібнозернистий стан, згідно із законом Холла-Петча, обумовлює підвищення міцності сталі, а зниження пластичності металу є наслідком такої еволюції характеристик міцності, що підтверджується отриманими математичними моделями (1)–(3). З іншого боку, бор, зв'язуючи атомарний азот у нітриди типу BN, перешкоджає розвитку процесів деформаційного старіння металу під час холодного пластичного деформування та сприяє підвищенню загальної деформованості прокату при переробленні його у дріт методом волочіння. Також мікродобавки бору до сталей зварювального

призначення вважаються доцільними з точки зору його впливу на структуроутворення зварних з'єднань, зменшуючи кількість видманштеттового фериту і збільшуючи кількість голчастого фериту в мікроструктурі швів.

ЛІТЕРАТУРА

1. 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 – ITMM'2024 : матер. міжнар. наук.-техн. конф., м. Дніпро, 10-11 квітня 2024 р. Дніпро : УДУНТ, – 2024. С. 57–64. <https://doi.org/10.34185/1991-7848.itmm.2024.01.010>
2. 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 : сб. наук. пр. – 2024. Вип. 38. С. 431 – 454. <https://doi.org/10.52150/2522-9117-2024-38-431-454>
3. Bhadeshia H. K. D. H. Reliability of weld microstructure and property calculations. Welding Journal. – 2004. Vol. 83. P. 237s – 243s.
4. Togobitska D., Belkova A. New approach to evaluating the thermodynamic consistency of melts in the "Metal-Slag" system based on interatomic interaction parameters. Lithuanian Journal of Physics. – 2024. Vol. 64. No. 1. P. 58 – 71. <https://doi.org/10.3952/physics.2024.64.1.6>

FEATURES OF THE INFLUENCE OF CHEMICAL COMPOSITION ON THE FORMATION OF MECHANICAL PROPERTIES IN LOW-CARBON Cr-Mo-V WELDING STEELS

Eduard Oliinyk, Eduard Parusov, Ihor Chuiko, Oleh Kuksa

Abstract. *The influence of the chemical composition of low-carbon welding steels with a Cr-Mn-Si-Mo-V alloying system and additional boron microalloying on the mechanical properties of steel wire rod was analyzed under constant parameters of the thermomechanical treatment mode. Based on a regression analysis of 28 melts, predictive models were developed to estimate changes in tensile strength, yield strength, and reduction of area in the steel wire rod. The physicochemical equivalent of the metal system's charge state and the boron content both most closely correlated with the mechanical property set of the steels were selected as independent variables in the models. It was established that a potential method to further reduce strength and increase the plastic properties of steel wire rod is to decrease the content of alloying elements, primarily carbon and manganese, within the compositional range of the steel grade. An increase in boron concentration leads to higher strength and reduced plasticity of the metal, presumably due to a reduction in the average ferrite grain size. However,*

boron microalloying has a beneficial effect on the deformability of the wire rod during subsequent wire drawing, as it binds atomic nitrogen into nitrides and prevents deformation aging of the metal during cold plastic deformation.

Keywords: *chemical composition, mechanical properties, wire rod, mathematical model, microalloying*

REFERENCE

1. Oliinyk E. V., Parusov E. V., Chuiko I. M. Teoretychni ta tekhnolohichni zasady znemitsniuiuchoho termomekhanichnoho obroblennia stalevoho prokatu zvariuvalnogo pryznachennia. Informatsiini tekhnolohii v metalurhii ta mashynobuduvanni – ITMM'2024 : mater. intern. sci. tech. conf., Dnipro, April 10-11, 2024. Dnipro : USUST, – 2024. P. 57–64. [In Ukrainian]. <https://doi.org/10.34185/1991-7848.itmm.2024.01.010>
2. Parusov E. V., Chuiko I. M., Oliinyk E. V., Parusov O. V. Analiz tendentsii ta problem vyrobnytstva prokatu i drotu z nyzkovuhletsevykh Cr-Mo-V stalei zvariuvalnogo pryznachennia. Fundamentalni ta prykladni problemy chornoj metalurhii. – 2024. Vol. 38. P. 431 – 454. [In Ukrainian]. <https://doi.org/10.52150/2522-9117-2024-38-431-454>
3. Bhadeshia H. K. D. H. Reliability of weld microstructure and property calculations. Welding Journal. – 2004. Vol. 83. P. 237s – 243s.
4. Togobitska D., Belkova A. New approach to evaluating the thermodynamic consistency of melts in the "Metal-Slag" system based on interatomic interaction parameters. Lithuanian Journal of Physics. – 2024. Vol. 64. No. 1. P. 58 – 71. <https://doi.org/10.3952/physics.2024.64.1.6>