

УДК 621.791.75.052:669.14.018.295

СТРУКТУРА ТА МЕХАНІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ МЕТАЛУ ЗТВ З'ЄДНАНЬ СТАЛІ 10Г2ФБ ПІСЛЯ ЗВАРЮВАННІ ТА ЦИКЛІЧНОГО НАВАНТАЖЕННЯ ЗГИНОМ

ПОЗНЯКОВ В. Д.^{1*}, *д.т.н., чл.-кор. НАН України,*
МАРКАШОВА Л. І.², *д.т.н., проф.,*
БЕРДНІКОВА О. М.², *к.т.н.,*
МАКСИМЕНКО А. О.², *мол. наук. співробітник*

^{1*} Інститут електрозварювання ім. Є.О.Патона НАН України, вул. Боженка, 11, 03680, Київ, Україна, тел. +38(044) 200-73-66, e-mail: paton39@ukr.net

² Інститут електрозварювання ім. Є.О.Патона НАН України, вул. Боженка, 11, 03680, Київ, Україна

Анотація. Мета. Структура і властивості сталі можуть змінюватися, деколи істотно, під дією термічних циклів зварювання. Подальші зміни параметрів структури металу, а відповідно і його властивостей, відбувається вже в процесі експлуатації конструкцій під впливом зовнішніх сил. Потрібно було дослідити, як це відбувається у металі зони термічного впливу зварних з'єднань сталі 10Г2ФБ. **Методи.** Дослідження виконувалися стосовно оброблених по термічному циклу зварювання зразків. Структуру і її параметри вивчали методом оптичної мікроскопії, а параметри тонкої структури: за результатами досліджень з використанням методу трансмісійної електронної мікроскопії. Випробування зразків на втому проводили на втомній машині малої потужності марки УММ-1. Механічні випробування на статичний розтяг та ударний вигин проводили з використанням стандартних зразків: тип II по ГОСТ 6996-66 і тип IX по ГОСТ 9454-78. **Результати.** Встановлено, що в результаті дії термічних циклів зварювання, які забезпечують швидкість охолодження металу зони термічного впливу в інтервалі температур 600 – 500 °С від 3 до 21 °С/с його структура змінюється від грубозернистої феритно-перлітно-бейнітної до дрібнозернистої бейнітної. За рахунок цього показники статичної міцності та ударної в'язкості металу зростають, а його пластичні властивості майже не змінюються. Суттєві зміни механічних властивостей металу зони термічного впливу сталі 10Г2ФБ відбуваються внаслідок дії на метал зовнішнього циклічного навантаження згином. По мірі збільшення кількості циклів навантаження параметри структури зменшуються на 23...40 %, а щільність дислокацій зростає майже у 1,5 рази. Це призводить до підвищення показників границі текучості металу на 20...22 % та зменшенню його опірності крихкому руйнуванню майже у 1,6 рази. **Наукова новизна.** Розширено уявлення щодо впливу термічних циклів зварювання та зовнішнього циклічного навантаження згином на структуру та механічні властивості металу зони термічного впливу зварних з'єднань низьколегованих конструкційних сталей. **Практична значимість.** Результати досліджень можуть бути використані при розробці технологій зварювання для виготовлення, зміцнення і ремонту металевих конструкцій із сталей типу 10Г2ФБ.

Ключові слова: зона термічного впливу, термічний цикл зварювання, структура металу, механічні властивості

СТРУКТУРА И МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА МЕТАЛЛА ЗТВ СОЕДИНЕНИЙ СТАЛИ 10Г2ФБ ПОСЛЕ СВАРКИ И ЦИКЛИЧЕСКОГО НАГРУЖЕНИЯ ИЗГИБОМ

ПОЗНЯКОВ В. Д.^{1*}, *д.т.н., чл.-корр. НАН Украины,*
МАРКАШОВА Л. И.², *д.т.н., проф.,*
БЕРДНИКОВА Е. Н.², *к.т.н.,*
МАКСИМЕНКО А. А.², *мл. н. сотр.*

^{1*} Институт электросварки им. Е.О.Патона НАН Украины, ул. Боженка, 11, 03680, Киев, Украина, тел. +38(044) 200-73-66, e-mail: paton39@ukr.net

² Институт электросварки им. Е.О.Патона НАН Украины, ул. Боженка, 11, 03680, Киев, Украина

Аннотация. Цель. Структура и свойства стали могут изменяться, иногда существенно, под действием термических циклов сварки. Дальнейшие изменения параметров структуры металла, а соответственно и его свойств, происходит уже в процессе эксплуатации конструкций под воздействием внешних сил. Необходимо было исследовать, как это происходит в металле зоны термического влияния сварных соединениях стали 10Г2ФБ. **Методы.** Исследования выполнялись с использованием обработанных по термическому циклу сварки образцов. Структуру и ее параметры изучали методом оптической микроскопии, а параметры тонкой структуры: по результатам исследований с использованием метода трансмиссионной электронной микроскопии. Испытания образцов на усталость выполняли на усталостной машине малой мощности марки УММ-1. Механические испытания на статическое растяжение и ударный изгиб проводили с

использованием стандартных образцов: тип II по ГОСТ 6996-66 и тип IX по ГОСТ 9454-78. **Результаты.** Установлено, что в результате действия термических циклов сварки, обеспечивающих скорость охлаждения металла зоны термического влияния в интервале температур 600 - 500 °С от 3 до 21 °С/с его структура меняется от крупнозернистой ферритно-перлитно-бейнитной до мелкозернистой бейнитной. За счет этого показатели статической прочности и ударной вязкости металла растут, а его пластические свойства почти не изменяются. Существенные изменения механических свойств металла зоны термического влияния стали 10Г2ФБ происходят вследствие действия на металл внешнего циклического нагружения изгибом. По мере увеличения количества циклов нагрузки параметры структуры уменьшаются на 23...40%, а плотность дислокаций возрастает почти в 1,5 раза. Это приводит к повышению показателей предела текучести металла на 20...22% и уменьшению его сопротивляемости хрупкому разрушению практически в 1,6 раза. **Научная новизна.** Расширено представление о влиянии термических циклов сварки и внешнего циклического нагружения изгибом на структуру и механические свойства металла зоны термического влияния сварных соединений низколегированных конструкционных сталей. **Практическая значимость.** Результаты исследований могут быть использованы при разработке технологий сварки для изготовления, упрочнения и ремонта металлических конструкций из сталей типа 10Г2ФБ.

Ключевые слова: зона термического влияния, термический цикл сварки, структура металла, механические свойства

STRUCTURE AND MECHANICAL PROPERTIES OF HAZ METAL OF 10G2FB STEEL JOINTS AFTER WELDING AND BENDING CYCLIC LOADING

POZNIAKOV V.D. ^{1*}, *Dr. Sc. (Tech.)*,
MARKASHIVA L.I. ², *Dr. Sc. (Tech.), Prof.*,
BERDNIKOVA O.M. ², *Cand. Sc. (Tech.)*,
MAKSYMENKO A.O. ², *Junior Researcher.*

^{1*} Paton Welding Institute of the NAS of Ukraine, Bozhenko str., 11, 03650, Kyiv, Ukraine, тел. +38 (044) 200-73-66, e-mail: paton39@ukr.net

² Paton Welding Institute of the NAS of Ukraine, Bozhenko str., 11, 03650, Kyiv, Ukraine

Abstract. Purpose. The structure and properties of the steel may vary, sometimes substantially, by thermal welding cycles. Further changes in the structure parameters of the metal, and therefore its properties occur already during operation of the structures under the influence of external forces. It was necessary to investigate how it happens in the metal heat affected zone of welded joints 10G2FB steel. **Methodology.** Researches were performed using treated by thermal cycle of welding samples. Structure and its parameters were studied by optical microscopy, and the parameters of the fine structure: the results of studies using the method of transmission electron microscopy. Testing of the samples carried out on the low power fatigue machine with brand UMM-1. Mechanical testing for a static tension and impact bending was carried out using standard samples: type II according to GOST 6996-66 and type IX according to GOST 9454-78. **Findings.** It is established that as a result of the effect of the welding thermal cycles, providing the cooling rate from 3 to 21°C/s of the metal heat affected zone in the temperature range 600-500°C its structure changes from grained ferrite-pearlite-bainite to fine grained bainite. Thereby static parameters of the strength and impact resilience of the metal grow and its plastic properties almost no changed. Essential changes in the mechanical properties of the metal HAZ of 10G2FB steel take place due to the action on metal by the external bending cyclic loading. As the number of load cycles the structure parameters are reduced by 23...40%, and the dislocation density is increased by nearly 1.5 times. It led to an increase of yield strength of the metal by 20...22% and reducing its resistance to brittle fracture nearly 1.6 times. **Originality.** Broadens understanding about the influence of welding thermal cycles and external bending cyclic loading on the structure and mechanical properties of the HAZ of welded joints of low-alloy structural steels. **Practical value.** The research results can be used to develop technologies for the manufacture, hardening and repair of metal constructions of 10G2FB steel.

Keywords: heat-affected zone, the thermal cycle of welding, the metal structure, mechanical properties

Вступ

Останніми роками при виготовленні зварних металоконструкцій в машинобудуванні, суднобудуванні, мостобудуванні, вагонобудуванні широко використовуються конструкційні сталі класу міцності С440-С490 і вище. Оптимальне поєднання міцності, в'язкості і пластичності в таких сталях досягається за рахунок їх легування марганцем,

кремнієм, нікелем, хромом, мікролегування ванадієм, алюмінієм, ніобієм, а також за рахунок оптимізації технології виробництва прокату (контрольоване плющення, прискорене охолодження, термічна обробка) [1-5].

Відомо, що структура і властивості сталі можуть змінюватися, деколи істотно, під дією термічних циклів зварювання [6-8]. У зварних з'єднаннях до таких змін найсильніше схильна ділянка перегріву

металу зони термічного впливу (ЗТВ), яка в процесі зварювання нагрівається до температур 1300-1150 °С. Подальші зміни параметрів структури металу, а відповідно і його властивостей, відбувається вже в процесі експлуатації конструкцій під впливом зовнішніх сил. Найяскравіше такі зміни виявляються в зонах концентрації напружки [9]. У зварних з'єднаннях це ділянка переходу від шва до основного металу. Саме ця ділянка зварних з'єднань була предметом досліджень, які викладені в даній роботі.

Мета

Метою даної роботи було дослідити зміни в структурі ЗТВ зварних з'єднань сталі 10Г2ФБ внаслідок дії на метал термічних циклів зварювання та зовнішнього циклічного навантаження вигином і визначити вплив таких змін на його механічні властивості.

Методика

Виходячи з поставленої мети, як об'єкт досліджень був вибраний метал ділянки перегріву ЗТВ зварних з'єднань сталі 10Г2ФБ. Але оскільки ця ділянка має обмежені розміри, його ширина, як правило, не перевищує 0,5 мм, виготовити із зварних з'єднань стандартні зразки для механічних випробувань не представляється можливим, дослідження проводилися на модельних зразках двох типорозмірів 12x12x150 мм і 18x18x150 мм, які оброблялися по термічному циклу зварювання (ТЦЗ).

Для моделювання ТЦЗ зразки нагрівалися струмом до температури 1250 °С (швидкість нагріву 150 °С/с), а потім охолоджувалися за заданою програмою. За рахунок регулювання інтенсивності обдування зразків інертним газом швидкість їх охолодження в інтервалі температур 600 – 500 °С ($W_{6/5}$) змінювали від 3 до 21 °С/с. З оброблених по ТЦЗ заготовок розміром 12x12x150 мм виготовлялися мікрошліфи для металографічних досліджень, а також стандартні зразки: тип II по ГОСТ 6996-66 і тип IX по ГОСТ 9454-78 для випробувань відповідно на статичний розтяг та ударний вигин.

Вплив циклічного вантаження на структуру і властивості металу ЗТВ сталі 10Г2ФБ проводилися з використанням зразків розмірами 18x18x150 мм, які охолоджувалися із швидкістю $W_{6/5} = 10$ °С/с. Для того, щоб модельний зразок мав зону, в якій концентрується напружка, на одній з його сторін був нанесений надріз шириною 2мм, завглибшки 3,5 мм з радіусом округлення у вершини 1 мм.

Випробування зразків на втому проводили на втомній машині малої потужності марки УММ-1. Зразки піддавали циклічному вантаженню на консольний вигин з симетричним циклом при частоті 35 Гц і напрузі циклу 120 МПа.

Першу серію, оброблених по термічному циклу зварювання зразків, навантажували до розвитку в них тріщини втомі завдовжки 2 мм ($N_{fr} = 21000$ циклів). Після такого вантаження поблизу вершини тріщини

втомі виникала помітна зона пластичної деформації. Другу серію зразків навантажували до 7000 циклів, що складало 33,3 % від N_{fr} . Третю серію зразків навантажували до 11000 циклів, а четверту до 15000 циклів, що складало відповідно 53,2 % і 71,4 % від N_{fr} .

Структуру і її параметри (D_3) вивчалися методом оптичної мікроскопії, з використанням мікроскопа Неофот-32, а параметри тонкої структури: ширина рейок (h_p), розмір фрагментів ($d_{фр}$) і щільності дислокацій (ρ), були отримані за результатами досліджень з використанням методу трансмісійної електронної мікроскопії (ТЕМ) на приладі Jem-200 СХ при прискорюючій напрузі 200 кВ. Досліджувані зони зразків вказані на рис. 1.

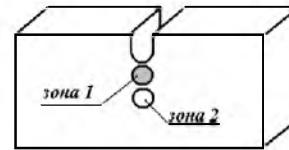


Рис. 1. Схематичне зображення зразка та зон, стосовно яких виконувалися металографічні дослідження / Schematic drawing of sample and the areas for which the metallographic study were carried out

Зразки для досліджень виготовлялися з листового прокату сталі 10Г2ФБ товщиною 18,7 мм наступного хімічного складу, в %: С - 0,08; Si - 0,249; Mn - 1,57; V - 0,05; Nb - 0,05; [N] - 0,006; S - 0,007; P - 0,013. В стані постачання (контрольований прокат) сталь має феритно-бейнітну структуру з невеликою кількістю перліту і володіє такими механічними властивостями: $\sigma_T = 531...581$ МПа; $\sigma_B = 610...660$ МПа; $\delta_5 = 24,8...26,3$ %; $\psi = 62,0...64,8$ %, $KCU^{-60} = 220...324$ Дж/см²; $KCV^{-60} = 204...300$ Дж/см².

Результати

Металографічні дослідження модельних зразків показали, що в інтервалі швидкостей охолодження 3 - 21 °С/с, структура металу на ділянці перегріву ЗТВ зварних з'єднань сталі 10Г2ФБ може змінюватися від феритно-перлітної до бейнітної. При швидкості охолодження $W_{6/5} = 3$ °С/с в металі формується грубозерниста структура, яка складається з глобулярного бейніту усередині зерен та з доєвтектоїдного полігонального фериту і перліту виділеннями по їх границях. Зі збільшенням швидкості охолодження кількість фериту та перліту зменшується, а структурні складові стають дрібнішими.

Оскільки структурний стан металу визначає його механічні властивості, то сповна закономірно, що зміни в структурі сталі, які відбулися після її обробки по різних термічних циклах зварювання, призвели до змін показників границі текучості, границі міцності та ударної в'язкості металу (рис. 2, а, в). Практично не змінилася при цьому його пластичність (рис. 2, б).

Дослідження, направлені на вивчення змін параметрів структури і властивостей металу ЗТВ сталі

10Г2ФБ в результате дії на нього циклічного навантаження показали наступне.

В зразках, які оброблялися по термічному циклу зварювання, що забезпечує $W_{6/5} = 10 \text{ }^{\circ}\text{C/c}$, але не піддавалися циклічному вантаженню (вихідний стан) структура металу, як під надрізом, так і в центрі зразка, складається з бейніту верхнього (B_v), бейніту нижнього (B_n) і феритних облямівок (Φ_o). У зоні I розмір зерна (D_z) бейніту верхнього знаходиться в діапазоні 100 – 300 мкм (рис. 3, б). Розміри зерна нижнього бейніту змінюються від 80 до 180 мкм, а ширина феритних облямівок від 5 до 10 мкм. Мікротвердість (HV) B_v знаходиться в діапазоні 2370...2570 МПа, а B_n - 2630...2940 МПа (рис. 3, а).

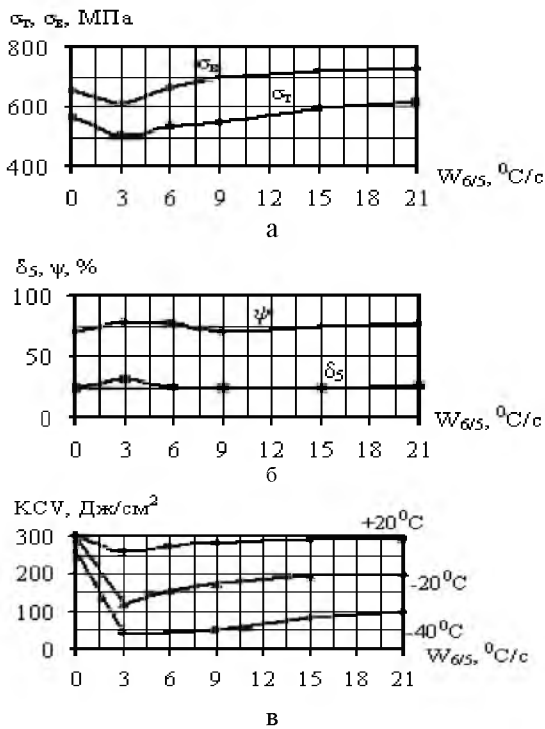


Рис. 2. Вплив швидкості охолодження на показники статичної міцності (а), пластичності (б) і ударної в'язкості (в) металу ділянки перегріву ЗТВ сталі 10Г2ФБ / Influence of cooling rate on the values of static strength (a), ductility (b) and toughness (v) of metal of overheating areas of HAZ of 10G2FB steel

Аналогічна по складу структура сформувалася і в середній частині зразка, але вона має дещо інші параметри і мікротвердість.

У зоні II розмір зерна бейніту верхнього складає 150...350 мкм, нижнього бейніту – 120...300 мкм. Мікротвердість B_v знаходиться в межах 2140...2440 МПа, а B_n – 2500...2750 МПа. Тобто в зоні II (в центрі зразка) в порівнянні із зоною I (під надрізом) спостерігається збільшення розміру зерна структурних складових на 14% (B_v) і на 32% (B_n), тоді як їх мікротвердість зменшується відповідно на 5...10% і 5...6,5%. Розмір феритних облямівок в цих зонах залишається незмінним.

Дослідженнями по методу ТЕМ встановлено, що ширина рейок для бейніту верхнього складає 0,6...

2,3 мкм (зона II) і $h_p = 0,5...1,8$ мкм (зона I) відповідно. Розмір фрагментів бейніту нижнього знаходиться в діапазоні 0,5...1,5 мкм (зона II), а в зоні I зменшується в 2 рази, до 0,5...0,7 мкм. Щільність дислокацій в зоні II складає $(3...5) \times 10^{10} \text{ см}^{-2}$, а в зоні I збільшується до $\rho = (5...7) \times 10^{10} \text{ см}^{-2}$ (рис. 4).

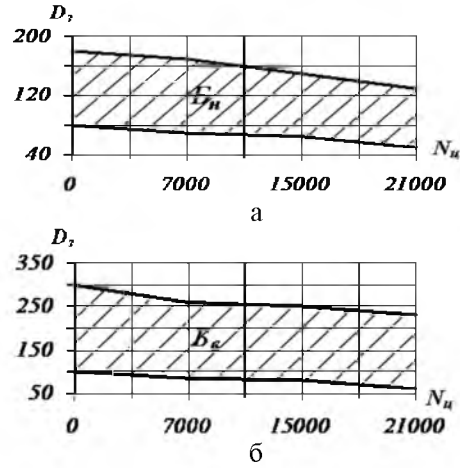


Рис. 3. Вплив циклічного вантаження на зміну розмірів зерна нижнього (а) і верхнього (б) бейніту в зоні I модельних зразків сталі 10Г2ФБ / Influence of cyclic loading on change of grain size of lower (a) and upper (b) bainite in zone I of model samples of 10G2FB steel

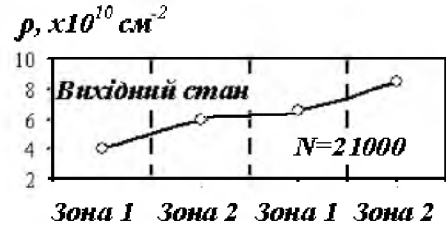


Рис. 4. Вплив циклічного вантаження на щільність дислокацій в металі модельних зразків сталі 10Г2ФБ в початковому стані після обробки по ТЦЗ і після 21000 циклів вантаження / Influence of cyclic loading on the dislocation density in the metal of model samples of 10G2FB steel in the initial state after processing in welding thermal cycle and after 21,000 cycles of loading

В результаті циклічного вантаження структура металу по складу не міняється. Це сповна закономірно, оскільки структурних перетворень при цьому не відбувається. В той же час спостерігається зменшення параметрів верхнього і нижнього бейніту відповідно від 85...260 мкм і 70...170 мкм при 7000 циклів вантаження до 60...230 мкм і 50...130 мкм при 210000 циклів вантаження. Розміри Φ_o залишаються незмінними.

Дослідженнями методом ТЕМ зразка після 21000 циклів вантаження встановлено, що ширина рейок для бейніту верхнього в зоні I складає 0,4...1,5 мкм, а в зоні II – 0,35...1,6 мкм. Розмір фрагментів бейніту нижнього в зоні I складає 0,2...0,7 мкм, а в зоні II – 0,3...1,2 мкм. Щільність дислокацій в зоні II становить $\rho \sim (6...7) \times 10^{10} \text{ см}^{-2}$ та $(8...9) \times 10^{10} \text{ см}^{-2}$ в зоні I. Тобто, в результаті циклічного вантаження щільність дислокацій збільшується в 1,5 – 2,0 рази.

Найбільша щільність дислокацій спостерігається уздовж границь рейок бейніту верхнього. Після 21000 циклів вантаження в локальних зонах вона досягає значень $\rho \sim 2,5 \times 10^{11} \text{ см}^{-2}$.

Структурні зміни, що відбулися в металі ЗТВ внаслідок дії циклічного навантаження вигином, позначилися й на його механічних властивостях (рис. 5). З використанням експериментальної бази даних, отриманої при металографічних досліджень, розрахунковим методом [10] було встановлено, що в результаті циклічного навантаження метал зміцнюється. Після 21000 циклів вантаження показники його границі текучості збільшуються на 20... 22 %, від 650 до 820 МПа під надрізом та від 550 до 695 МПа посередині зразка. Відбувається це за рахунок подрібнення структурних складових металу.

На рис. 6 наведено дані щодо впливу циклічного навантаження на показники холодостійкості металу ЗТВ сталі 10Г2ФБ. Встановлено, що в початковому стані після термічної обробки, але без циклічного вантаження, а також після циклічного вантаження до 7000 циклів, випробувані при температурі мінус 40 °С зразки мають досить близькі показники ударної в'язкості 37,0...40,0 Дж/см². При подальшому збільшенні циклів вантаження спостерігалось поступове зниження цих показників до 18,0...22,0 Дж/см² після 11000 циклів і до 7,0...8,0 Дж/см² і 4,5...6,0 Дж/см² після 15000 і 21000 циклів вантаження відповідно.



Рис. 5. Розрахункові значення границі текучості металу ЗТВ сталі 10Г2ФБ до і після циклічного навантаження / Calculated values of fluidity limit of HAZ metal of 10G2FB steel before and after cyclic loading

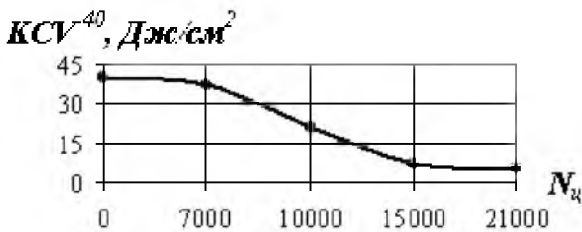


Рис. 6. Вплив циклічного навантаження на ударну в'язкість металу ЗТВ сталі 10Г2ФБ / Influence of cyclic loading on the impact toughness of HAZ metal of 10G2FB steel

На рис. 7 наведено залежності, що характеризують вплив циклічного навантаження на магнітні властивості металу.

Дослідженнями встановлено, що в стані після оброблення по термічному циклу зварювання

значення H_p , мають великий розкид. Пов'язано це, очевидно, з нерівномірним намагнічуванням зразка, в результаті його нагріву струмом. Проте вже після відносно невеликої кількості циклів вантаження ($N = 0,1 N_{fr}$) відбувається вирівнювання параметрів H_p . Деякий час значення нормальної складової магнітного поля практично не змінюються, а після значного напрацювання, досягши $N = 0,7 N_{fr}$, починають зростати і досягати своїх максимальних величин у момент утворення тріщини втоми ($N = N_{fr} = 21000$). Градієнт напруженості магнітного поля при цьому зростає майже у 8 разів.

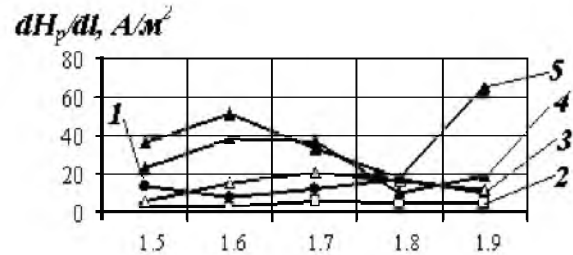


Рис. 7. Залежності зміни градієнтів напруженості магнітного поля від кількості циклів напрацювання: 1 – після термообробки $N = 0$; 2 – $N = 2500$; 3 – $N = 13000$; 4 – $N = 15000$; 5 – $N = 21000$ циклів (1.5-1.10 місця, в яких вимірювалися показники dH_p схематично вказані на рис. 8) / Dependences of the magnetic field gradients on the number of time cycles 1 – after treating $N = 0$; 2 – $N = 2500$; 3 – $N = 13,000$; 4 – $N = 15,000$; 5 – $N = 21,000$ cycles (1.5-1.10 places where measured values of dH_p specified in Fig. 8 schematically)

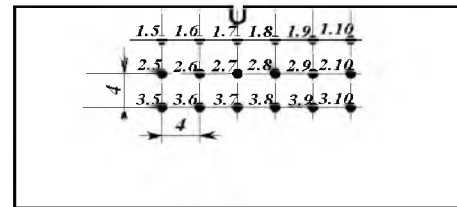


Рис. 8. Схематичне зображення зразка та зон, в яких здійснювалися виміри нормальної складової магнітного поля / Schematic drawing of sample and the areas in which the measurements of the normal component of the magnetic field were made

Наукова новизна та практична значимість

Розширено уявлення щодо впливу термічних циклів зварювання та зовнішнього циклічного навантаження згином на структуру та механічні властивості металу зони термічного впливу зварних з'єднань низьколегованих конструкційних сталей.

Результати досліджень можуть бути використані при розробці технологій зварювання для виготовлення, зміцнення і ремонту металевих конструкцій із сталей типу 10Г2ФБ.

Висновки

1. Під впливом термічних циклів зварювання структура металу на ділянці перегрівання ЗТВ зварних з'єднань сталі 10Г2ФБ може мінятися від

феритно-перлітно-бейнітної при $W_{6/5} = 3$ °C/c до бейнітної при $W_{6/5} = 21$ °C/c.

2. При швидкостях охолодження $W_{6/5} \leq 9$ °C/c метал ЗТВ сталі 10Г2ФБ стає схильним до зменшення. Зі збільшенням швидкості охолодження його статична міцність і ударна в'язкість зростають.

3. Параметри структури металу, розташованого в зоні локалізації напруги, викликаної циклічним навантаженням, зменшуються, а щільність дислокацій

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Тишаев С.И. Низколегированные стали нового поколения для металлических конструкций / С.И. Тишаев, П.Д. Одесский // *Металлы*. – 2001. – №6. – С. 56-64.

Tishaev S.I., Odesskij P. D. Nizkolegiro-vannye stali novogo pokolenija dlja metallicheskih konstrukcij [Low-alloy steel of a new generation metal constructions] – *Metally*, 2001, no.6. pp.56-64.

2. Ramirez J.E. Characterization of high-strength steel weld metals: chemical composition, microstructure, and nonmetallic inclusions / J.E. Ramirez // *Welding J.* – 2008. – 87, №3. – P. 65-75.

Ramirez J.E. Characterization of high-strength steel weld metals: chemical composition, microstructure, and nonmetallic inclusions – *Welding J.*, 2008, V.87, no.3, pp.65-75.

3. Экономнолегированные стали с наномодифицированной структурой для эксплуатации в экстремальных условиях / И.В. Горынин, В.А. Мальшевский, Е.И. Хлусова и др. // *Вопросы материаловедения*. – 2008. – №2(54). – С. 7-19.

Jekonomnolegirovannye stali s nanomodifirovannoju strukturoju dlja jekspluatacij v jekstremal'nyh uslovijah [Economically alloyed steels with nano-modified structure for exploitation in extreme conditions] / I.V. Gorynin, V.A. Malyshevskij, E.I. Hlusova i dr. – *Voprosy materialovedenija*, 2008, no.2(54), pp.7-19.

4. Влияние режимов контролируемой прокатки на структуру и свойства низкоуглеродистой микролегированной стали 10Г2ФБ / В.И. Большаков, Г.Д. Сухомлин, Д.В. Лаухин и др. // *Строительство, материаловедение, машиностроение: Сб. научн. трудов.* – Днепропетровск, 2009. – Вып.48. – Ч.3. – С. 237-242.

Vlijanie rezhimov kontrolirujemoj prokatki na strukturu i svojstva nizkouglerodistoj mikrolegirovannoj stali 10G2FB [Influence of modes of controlled rolling on the structure and properties of low carbon microalloyed steel 10G2FB] / V.I. Bol'shakov, G.D. Suhomlin, D.V. Lauhin i dr. // *Stroitel'stvo, materialovedenie, mashinostroenie: Sb. nauchn. trudov.* – Dnepropetrovsk, 2009, Issue.48, Ch.3. pp.237-242.

5. Имитация процессов структурообразования в трубных сталях при контролируемой прокатке с ускоренным охлаждением / М.Ю. Матросов, А.А. Кичкина, А.А. Ефимов и др. // *Металлург.* – 2007. – №7. – С. 52-58.

Imitacija processov strukturoobrazovanija v trubnyh staljah pri kontrolirujemoj prokatke s uskorennyim ohlazhdeniem [Imitation of structure formation processes in the pipe steels at a controlled rolling with accelerated cooling] / M.Ju Matrosov, A.A. Kichkina, A.A. Efimov i dr. – *Metallurg*, 2007, no.7, pp. 52-58.

в ній збільшується. За рахунок цього значення границі текучості металу підвищуються на 20...22 %.

4. В результаті втомних пошкоджень холодостійкість металу ЗТВ сталі 10Г2ФБ знижується.

5. Помітні зміни магнітних властивостей металу, в оброблених по термічному циклу зварювання зразках спостерігаються безпосередньо під надрізом на стадії, що передує утворенню тріщини втоми.

6. Исследование особенностей распада аустенита стали 10Г2ФБ при непрерывном охлаждении / В.И. Большаков, С.В. Иванцов, Г.Д. Сухомлин и др. // *Строительство, материаловедение, машиностроение: Сб. научн. трудов.* – Днепропетровск, 2009. – Вып.48. – Ч.1. – С. 105-109.

Issledovanie osobennostej raspada austenita stali 10G2FB pri nepreryvnom ohlazhdenii [Research of features of austenite decomposition of 10G2FB steel under continuous cooling] / V.I. Bol'shakov, S.V. Ivancov, G.D. Suhomlin i dr. // *Stroitel'stvo, materialovedenie, mashinostroenie: Sb. nauchn. trudov.* – Dnepropetrovsk, 2009, Issue.48, Ch.1, pp. 105-109.

7. Brozda J. Weldability evaluation of a modern TMCP steel by using simulation techniques / J. Brozda, M. Zeman // *Acta metallurgica sinica.* – 2000. – Vol.13, №1. – P. 103-111.

Brozda J., Zeman M. Weldability evaluation of a modern TMCP steel by using simulation techniques – *Acta metallurgica sinica*, 2000, Vol.13, no.1, pp. 103-111.

8. Влияние термического цикла сварки на структуру и свойства микролегированных конструкционных сталей / В.А. Костин, Г.М. Григоренко, В.Д. Позняков и др. // *Автоматическая сварка.* – 2012. – №12. – С. 10-16.

Vlijanie termicheskogo cikla svarki na strukturu i svojstva mikrolegirovannyh konstrukcionnyh stalej [Influence of the thermal cycle of welding on the structure and properties of microalloyed structural steels] / V.A. Kostin, G.M. Grigorenko, V.D. Poznjakov i dr. – *Avtomaticheskaja svarka*, 2012, no.12, pp. 10-16.

<http://patonpublishinghouse.com/rus/journals/as/2012/12/02>

9. Горицкий В.М. Диагностика металлов. / В.М. Горицкий – Москва: *Металлургиздат*, 2004. – 402 с.

Gorickij V.M. Diagnostika metallov. [Diagnostics of metals] – Moskva: *Metallurgizdat*, 2004, 402 p.

10. Структурный критерий оценки прочности, пластичности, трещиностойкости металлов, сплавов, композиционных материалов и их сварных соединений / Л.И. Маркашова, Г.М. Григоренко, В.Д. Позняков, Е.Н. Бердникова, Т.А. Алексеенко // *Збірник праць IV Міжнародної конференції Механіка руйнування матеріалів і міцність конструкцій (червень 2009, Львів).* – Фізико-механічний інститут ім. Г.В. Карпенка НАНУ, Львів-2009. – С.447-451.

Markashova L.I., Grigorenko G.M., Poznjakov V.D., Berdnikova E.N., Alekseenko T.A. Strukturnyj kriterij ocenki prochnosti, plastichnosti, treshhinostjokosti metallov, splavov, kompozicionnyh materialov i ih svarnyh soedinenij [Structural criterion for assessing the strength, ductility, fracture toughness of metals, alloys, composite materials and their welded joints] // *Zbirnyk prats IV Mizhnarodnoi konferentsii Mekhanika ruinvannia materialiv i mitsnist konstruksii (cherven 2009, Lviv).* – Fyzyko-mekhanichniy instytut im. H.V. Karpenka NANU, Lviv-2009, pp.447-451.

Статья рекомендована к публикации докт. техн. наук, проф. В. И. Большаковым (Украина); докт. техн. наук, проф. Д. В. Лаухиным (Украина)

Поступила в редколлегию 21.01.2015

Принята к печати 24.03.2015