

СТРУКТУРА І ВЛАСТИВОСТІ ЗВАРНИХ З'ЄДНАНЬ СТАЛІ 13ХГМРБ ПРИ ІМПУЛЬСНО-ДУГОВОМУ ЗВАРЮВАННІ

О.А. Гайворонський, В.Д. Позняков, С.Л. Жданов, А.В. Завдовєєв, А.О. Максименко, А.М. Денисенко

ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України. 03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11. E-mail: paton39@ukr.net

Наведено результати досліджень щодо формування структури в металі швів і зони термічного впливу (ЗТВ) низьколегованої термічно зміцненої сталі 13ХГМРБ при імпульсно-дуговому зварюванні, змін механічних властивостей та коефіцієнту інтенсивності напружень при крихкому руйнуванні, а також опірності з'єднань утворенню холодних тріщин та тріщин втоми. Встановлено, що в порівнянні з дуговим зварюванням стаціонарною дугою при імпульсно-дуговому зварюванні в структурі металу швів та ЗТВ з'єднань утворюється більша кількість гартівних структур бейніту та мартенситу. Визначено, що незалежно від способу зварювання, показники міцності ($\sigma_{0,2}$ і σ_B) та пластичності (δ_5 і ψ) металів знаходяться приблизно на одному рівні в той час як їх здатність опиратися ударним навантаженням, особливо при температурі випробувань -40 °С, у разі застосування імпульсно-дугового зварювання зростає. Зокрема встановлено, що показники ударної в'язкості металу ЗТВ зварних з'єднань, виконаних з використанням імпульсно-дугового зварювання, на 30 % вищі у порівнянні з дуговим зварюванням і становлять 108 Дж/см². Тобто холодостійкість металу шву явно підвищується. Опірність крихкому руйнуванню металів шву та ЗТВ знаходяться на достатньо високому рівні ($Kq \geq 84$ МПа $\sqrt{м}$). Встановлено також, що у зв'язку із збільшенням в металі ЗТВ зварних з'єднань, виконаних з використанням імпульсно-дугового зварювання гартівних структур, для уникнення утворення в них холодних тріщин температуру попереднього підігріву необхідно збільшувати з 90 до 120 °С. Натомість такі зварні з'єднання мають більш високий опір утворенню тріщин втоми при циклічному навантаженні вигином. Бібліогр. 18, табл. 1, рис. 7.

Ключові слова: низьколегована термічно зміцнена сталь, імпульсно-дугове зварювання, метал шва, ЗТВ, структура, механічні властивості, холодні тріщини, крихке руйнування, опір втоми

При виготовленні відповідальних металоконструкцій в різних галузях промисловості, як то цивільному будівництві, машинобудуванні, мостобудуванні тощо, все більшого застосування знаходять низьколеговані термічно зміцнені сталі класу С690 з $\sigma_{0,2} = 580 \dots 750$ МПа. Це дозволяє суттєво збільшити навантаження на об'єкти будівництва та подовжити їх ресурс експлуатації. Безпечність експлуатації таких конструкцій здебільше визначається якістю виконання зварних з'єднань, які повинні відповідати вимогам рівномірності, холодостійкості, мати достатньо високий опір крихкому і втомному руйнуванню. Слід також зазначити, що труднощі при зварюванні низьколегованих високоміцних сталей з $\sigma_{0,2} = 580 \dots 750$ МПа пов'язані з необхідністю запобігання можливості утворення в металах шву і ЗТВ холодних тріщин, що визначається формуванням гартівних структур [1, 2]. Вирішення даних завдань ускладнюється умовою, відповідно до якої необхідні показники службових і технологічних властивостей зварні з'єднання повинні мати після зварювання без додаткової термічної обробки. Це особливо важливо при зварюванні термічно зміцнених сталей, на структуру та властивості зварних з'єднань яких суттєво впливають характерні для дугового зварювання параметри нагріву і охолодження. Типо-

вим представником даного класу сталей є низьколегована термічно зміцнена сталь 13ХГМРБ. Саме стосовно з'єднань цієї сталі, зварювання якої виконувалося з використанням традиційних дугових процесів, в технічній літературі мається достатньо інформації щодо впливу технологічних режимів зварювання на структуру, механічні властивості та здатність зварних з'єднань чинити опір утворенню холодних тріщин.

Слід зазначити, що останнім часом, у світовій практиці при виготовленні зварних конструкцій знаходить все більш широке використання імпульсно-дугові процеси зварювання. Імпульсно-дугове зварювання (ІДЗ) характеризується періодично змінюваною потужністю дуги [3, 4–8], що дозволяє вирішувати складні технологічні питання при виготовленні унікальних конструкцій та збільшувати продуктивність процесів зварювання. При ІДЗ розширюються можливості управління процесами плавлення і переносу електродного металу, перемішуванням розплавленого металу, а також з'являється можливість у регулюванні властивостями і розмірами металу шву та ЗТВ зварних з'єднань. При цьому поліпшується формування з'єднань при виконанні їх в різних просторових положеннях при забезпеченні плавних переходів від шву до основного металу [9–16]. В

Гайворонський О.А. – <https://orcid.org/0000-0002-5922-5541>, Позняков В.Д. – <https://orcid.org/0000-0001-8581-3526>, Жданов С.Л. – <https://orcid.org/0003-3570-895X>, Завдовєєв А.В. <https://orcid.org/0000-0003-2811-0765>

© О.А. Гайворонський, В.Д. Позняков, С.Л. Жданов, А.В. Завдовєєв, А.О. Максименко, А.М. Денисенко, 2023

той же час в технічній літературі недостатньо висвітлена інформація щодо впливу особливостей процесу імпульсно-дугового зварювання на формування структури, механічні властивості зварних з'єднань із схильних до гартування високоміцних сталей та їх здатності опиратися утворенню холодних тріщин.

З огляду на це, метою роботи було отримання порівняльних результатів випробувань при визначенні впливу способу зварювання, а саме ІДЗ, на структуру металів швів та ЗТВ зварних з'єднань низьколегованої термічно зміцненої сталі 13ХГМРБ, зміну механічних властивостей, на опірність з'єднань крихкому руйнуванню, утворенню холодних тріщин та тріщин втоми, що має певне наукове та практичне значення.

Методика досліджень. Об'єктом досліджень були зварні з'єднання високоміцної низьколегованої сталі 13ХГМРБ наступного хімічного складу, %: 0,13 С; 0,31 Si; 1,71 Mn; 0,96 Cr; 0,45 Mo; 0,03 Ni; 0,046 Nb; 0,002 В, 0,01 S та 0,015 Р, які отримували при механізованому зварюванні стаціонарною дугою (базовий варіант), при зварюванні на пульсуючому режимі модульованим током (для порівняння) та при ІДЗ (досліджуваний процес).

В якості джерела живлення використовувалася випрямляч інверторного типу марки EWM Phoenix Pulse 500, який забезпечує різну частоту проходження імпульсів при імпульсно-дуговому зварюванні. Механізоване зварювання у суміші захисних газів (82%Ar + 18% CO₂) з'єднань сталі 13ХГМРБ товщиною 20 мм з V-подібним розкриттям кромок виконували дротом суцільного перерізу Св-10ХН2ГСМФТЮ діаметром 1,2 мм. Зварювання з використанням традиційного процесу стаціонарною дугою виконували режимі: $I_{зв} = 180...200$ А, $U_d = 26$ В, $V_{зв} = 15...18$ м/год. Режим зварювання пульсуючою дугою: струм імпульсу $I_A = 220$ А, струм паузи $I_B = 80 \% \times I_A$, $U_d = 26...27$ В, скважність 0,5, частота 1,33 Гц. При ІДЗ режим був наступним: $I_{сп} = 220...240$ А, $U_d = 26...28$ В, $V_{зв} = 14...21$ м/год (струм у імпульсі $I_{max} = 450$ А, струм у паузі $I_{min} = 120...165$ А, скважність 0,33...0,36, частота 120...150 Гц) [17, 18].

Металографічні дослідження виконували з використанням світлового мікроскопу «Neophot-32» та скануючого електронного мікроскопу MIRA 3 LMU (Tescan). При дослідженні використовувались детектор вторинних електронів (позначення SE на електронному знімку) та детектор пружно відбитих електронів (позначення BSE). Мікротвердість окремих структурних складових і інтегральну твердість металу вимірювали на твердомірі М-400 фірми «LECO» при навантаженні 100 г (HV). Зразки для металографічних досліджень підготовлювали за стандартними методи-

ками зі застосуванням алмазних паст різної дисперсності, виявлення мікроструктури виконували методом хімічного травлення у 4%-ному спиртовому розчині азотної кислоти.

Для проведення випробувань механічних властивостей металів шву та ЗТВ зварних з'єднань виготовляли стандартні зразки для випробувань на статичний розтяг та ударний згин (зразки відповідно типу II та IX до ГОСТ 6996-96)*. За результатами проведених випробувань оцінювали вплив способу зварювання на зміну показників міцності (σ_T і σ_B), пластичності (δ_5 і ψ) та ударної в'язкості (KCV).

Здатність металу опиратися крихкому руйнуванню визначали з використанням підходів з механіки руйнування, згідно яких використовували зразки товщиною 10 мм з наведеною тріщиною втоми в вершині надрізу попередньо вирізані із зварних з'єднань. Потім при статичному навантаженні вигином визначали критичний коефіцієнт інтенсивності напружень Kq . Для визначення значень критичного коефіцієнта інтенсивності напруження використовували методику відповідно роботи [13]. При цьому приймали до уваги встановлену раніше залежність, що при підвищенні значень Kq чутливість до концентрації напружень знижується і опірність металу крихкому руйнуванню підвищується, або навпаки, при зниженні коефіцієнту опірність знижується.

Оцінку опору утворенню холодних тріщин виконували за допомогою стикової технологічної проби Теккен. В якості критерію випробувань приймали температуру попереднього підігріву, при якій тріщини в металі шву або в ЗТВ зварних з'єднань не утворювалися.

Випробування на втому проводили на зразках таврових зварних з'єднань завтовшки 12 мм при їх циклічному навантаженні вигином. Зварні з'єднання навантажували з частотою 14 Гц при напруженнях симетричного циклу рівнем 30, 35 та 35 МПа. Для випробувань використовували машину УМП-1. Під час випробувань фіксували кількість циклів, при яких відбувалось утворення тріщини втоми критичної довжини (3 мм) та напруження, при якому зразок залишався неушкодженим після $2,1 \cdot 10^6$ циклів навантаження.

Результати роботи та їх обговорення. За результатами досліджень механічних властивостей встановлено, що показники статичної міцності зварних з'єднань, виконаних з використанням зазначених вище дугових процесів зварювання майже співставні (рис. 1, а). А саме, границя текучості металу швів зварних з'єднань знаходиться в діапазоні $\sigma_{0,2} = 713...740$ МПа. При цьому менші значення характерні для стаціонарного процесу,

* У випробуванні зразків приймав участь В.А. Яшук

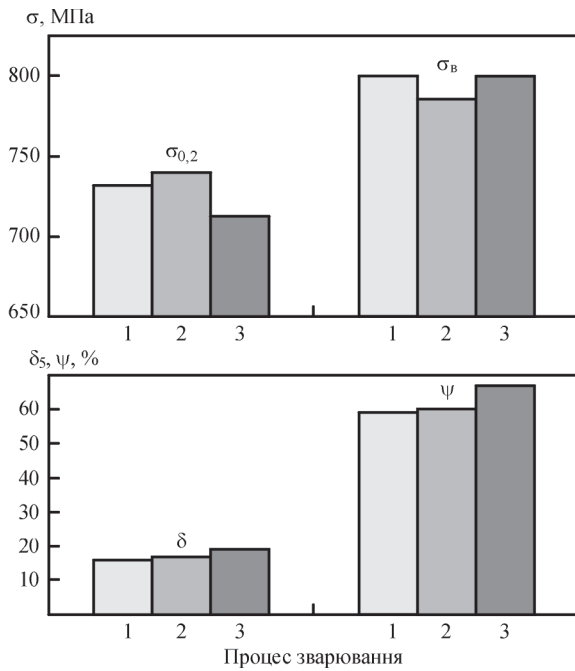


Рис. 1. Механічні властивості металу швів зварних з'єднань сталі 13ХГМРБ: 1 – пульсуюча дуга; 2 – ІДЗ; 3 – стаціонарна дуга

а більш високі – для ІДЗ. Така ж тенденція спостерігається і для показників тимчасового опору металу швів на розрив – $\sigma_b = 786 \dots 800$ МПа. Для зазначених вище способів зварювання несуттєво відрізняються також і показники пластичності (рис. 1, б). Так, показники відносного видовження металу швів зварних з'єднань знаходяться в межах $\delta_5 = 16 \dots 19$ %, а відносного звуження – $\psi = 59 \dots 67$ %. На відміну від показників міцності та пластичності, вплив процесу зварювання на величину ударної в'язкості як металу швів, так і ЗТВ зварних з'єднань є більш суттєвим та неоднозначним (рис. 2).

Що стосується показників ударної в'язкості металу швів, то при температурі випробувань 20°C найвищі значення $KCV_{+20} = 133$ Дж/см² характерні для стаціонарного процесу. При зварюванні пульсуючою дугою та при ІДЗ вони зменшуються відповідно до 117 і 96 Дж/см². Така ж тенденція щодо зменшення показників KCV металу швів зберігається і у разі випробування зразків

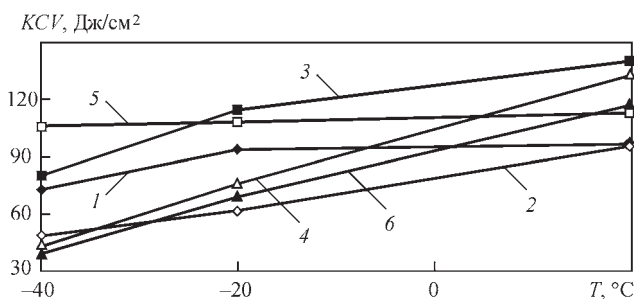


Рис. 2. Ударна в'язкість металу швів і ЗТВ зварних з'єднань сталі 13ХГМРБ при різних температур випробувань T : ■ – ЗТВ, ▲ – шов; 1, 2 – стаціонарна дуга, 3, 4 – пульсуюча дуга, 5, 6 – ІДЗ

при температурі -20°C . У даному разі показники ударної в'язкості металу швів зварних з'єднань, виконаних відповідно дугою, яка горить стаціонарно, пульсуючою дугою та при ІДЗ становлять 79, 69 та 62 Дж/см². Натомість у разі, коли зразки випробовувалися при температурі мінус 40°C , суттєвих розбіжностей між показниками KCV металу швів досліджених зварних з'єднань не спостерігається. Вони майже однакові і знаходяться в діапазоні 43...49 Дж/см². Слід зазначити, що не зважаючи на зменшення ударної в'язкості характерному для імпульсних процесів зварювання, вони залишаються на високому рівні і відповідають вимогам нормативних документів до ударної в'язкості сталі 13ХГМРБ ($KCV_{-40} \geq 39$ Дж/см²).

Деякі інші закономірності щодо зміни показників ударної в'язкості властиві для металу ЗТВ зварних з'єднань (рис. 2). Як і при дослідженні зразків з надрізом по металу шва, найвищі показники при температурі випробувань 20°C рівнем 150 Дж/см² характерні для стаціонарного процесу зварювання, для пульсуючої дуги 97 та 113 Дж/см² при ІДЗ. При температурі випробувань -20°C тенденція щодо зменшення показників холодостійкості починає змінюватися. Різниця між показниками KCV суттєво скорочується і вони становлять відповідно 113, 94 та 108 Дж/см². При температурі випробувань -40°C різниці між показниками ударної в'язкості металу ЗТВ зварних з'єднань, виконаних з використанням стаціонарного процесу зварювання та зварювання пульсуючою дугою майже не спостерігається. Для цих процесів зварювання характерні значення ударної в'язкості знаходяться в межах від 73 до 79 Дж/см². Значно вищі вони та до того ж такі, що знаходяться на рівні значень ударної в'язкості зразків, які випробовувались при температурі -20°C ($KCV_{-40} = 108$ Дж/см²), характерні для металу ЗТВ зварних з'єднань, виконаних з використанням ІДЗ. Тобто холодостійкість металу ЗТВ знань, виконаних з застосуванням ІДЗ явно підвищується.

Щодо результатів досліджень зразків, випробування яких виконувалося з використанням силового критерію механіки руйнування, то при їх проведенні суттєвих розбіжностей у показниках Kq не виявлено. У всіх випадках опірність крихкому руйнуванню металів швів та ЗТВ зварних з'єднань знаходиться на високому рівні (рис. 3). Встановлено, що метал швів зварних з'єднань сталі 13ХГМРБ, виконаних як ІДЗ, так і зварюванням пульсуючою дугою в досліджуваному діапазоні температур має приблизно однакові показники Kq . При температурі випробувань 20°C він становить 94,6...95,6 при -20°C – 88...89,1 та при -40°C 84,7...85,8 МПа $\sqrt{\text{м}}$ (рис. 3, а, в). Також достатньо високий опір крихкому руйнуванню має і метал

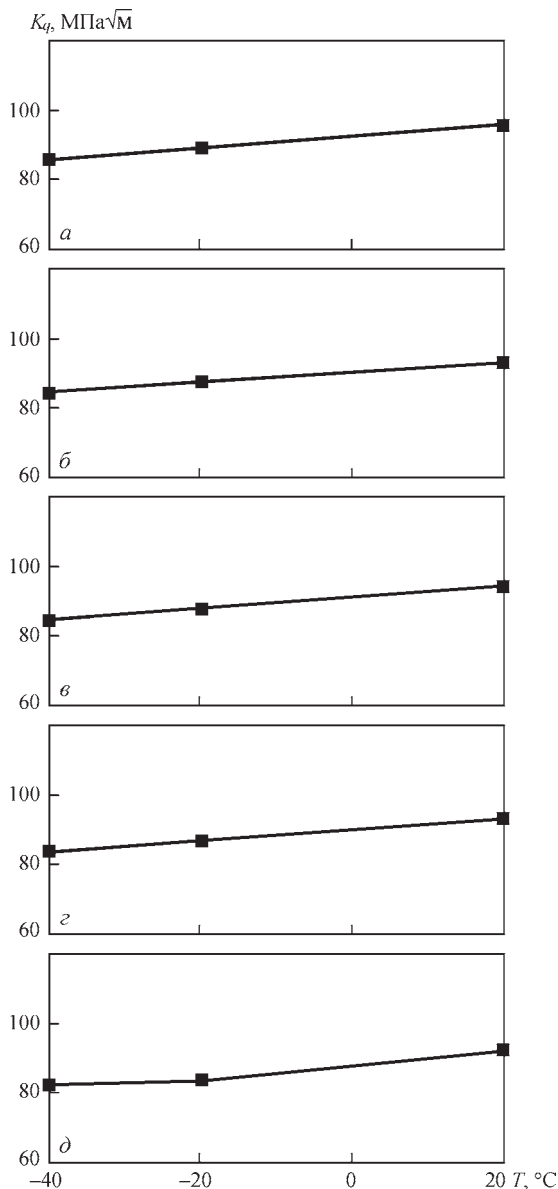


Рис. 3. Опірність крихкому руйнуванню металу швів (а, б) і ЗТВ (б, г) зварних з'єднань сталі 13ХГМРБ при ДЗ (а, б) та зварюванням пульсуючою дугою (в, г) та стаціонарною дугою (д)

ЗТВ, а саме коефіцієнт інтенсивності напружень в залежності від температури іспитів змінюється в діапазоні 84,2...92,7 МПа√м. Слід також відмітити,

що в порівнянні зі зварюванням стаціонарною дугою показники опірності практично не змінилися.

Зазначені відмінності, особливо показників ударної в'язкості при низькій температурі, в залежності від способу зварювання пов'язані зі змінами фазово-структурного складу металу. Структура сталі 13ХГМРБ являє собою структуру відпущеного бейніту, в основному нижнього, з твердістю 253...264 HV (рис. 4). Структура верхнього шару шва при зварюванні стаціонарною дугою складається в основному з дрібнозернистого сорбіту (рис. 5, а, б) з вузькими тонкими виділеннями доєвтектоїдного фериту по межах литих кристалів. Твердість сорбіту становить 274 HV. В ділянці крупного зерна ЗТВ спостерігаються суміш верхнього і нижнього бейніту з твердістю 383 HV. На ділянці дрібного зерна і на ділянці неповної перекристалізації спостерігається подрібнення зерна і падіння твердості від 309 до 236...253 HV.

При ДЗ структура верхнього шару шва складається з суміші верхнього та переважно нижнього бейніту (рис. 5, в, г). Твердість такої структури знаходиться в межах 317...336 HV. По границям литих кристалів, подібно як і при стаціонарному процесі, спостерігаються дуже тонкі виділення доєвтектоїдного фериту. На ділянці крупного зерна ЗТВ спостерігається мартенситна структура з твердістю 446...488 HV. На ділянці дрібного зерна і ділянці неповної перекристалізації ЗТВ розміри зерен стають меншими, а твердість знижується до 285 HV.

Структура верхнього шару шва зразка, виконаного пульсуючою дугою, складається з суміші верхнього та нижнього бейніту з твердістю від 262 до 314 HV (рис. 5, д, е). По ділянках литих кристалів також, як і в попередніх випадках, видно тонкі виділення доєвтектоїдного фериту. В ділянці крупного зерна в ЗТВ спостерігається в основному суміш верхнього і нижнього бейніту з твердістю до 383 HV і невеликі ділянки мартенситу (401 HV). На ділянках дрібного зерна та неповної перекристалізації в ЗТВ спостерігається подрібнення зерна і падіння твердості до 366 HV.

Таким чином встановлено, що попри зміні процесу зварювання від стаціонарного до пульсуючо-

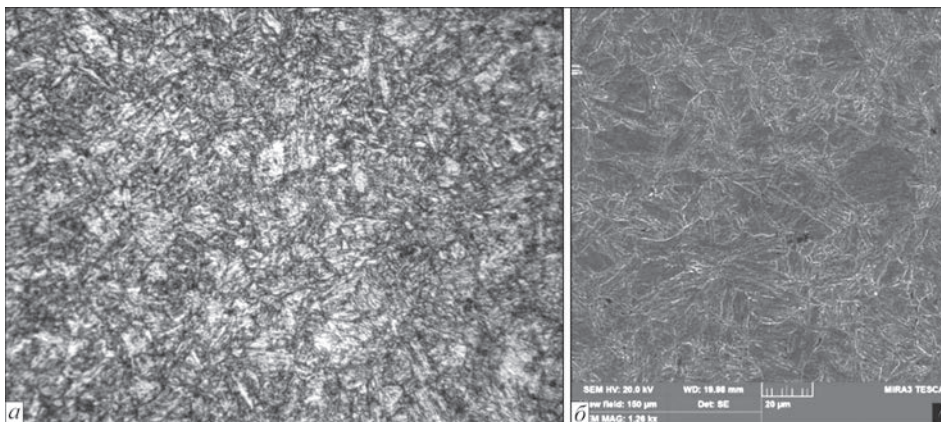


Рис. 4. Структура сталі 13ХГМРБ: а – оптична мікроскопія при $\times 500$ (зменшено в 2 рази); б – СЕМ

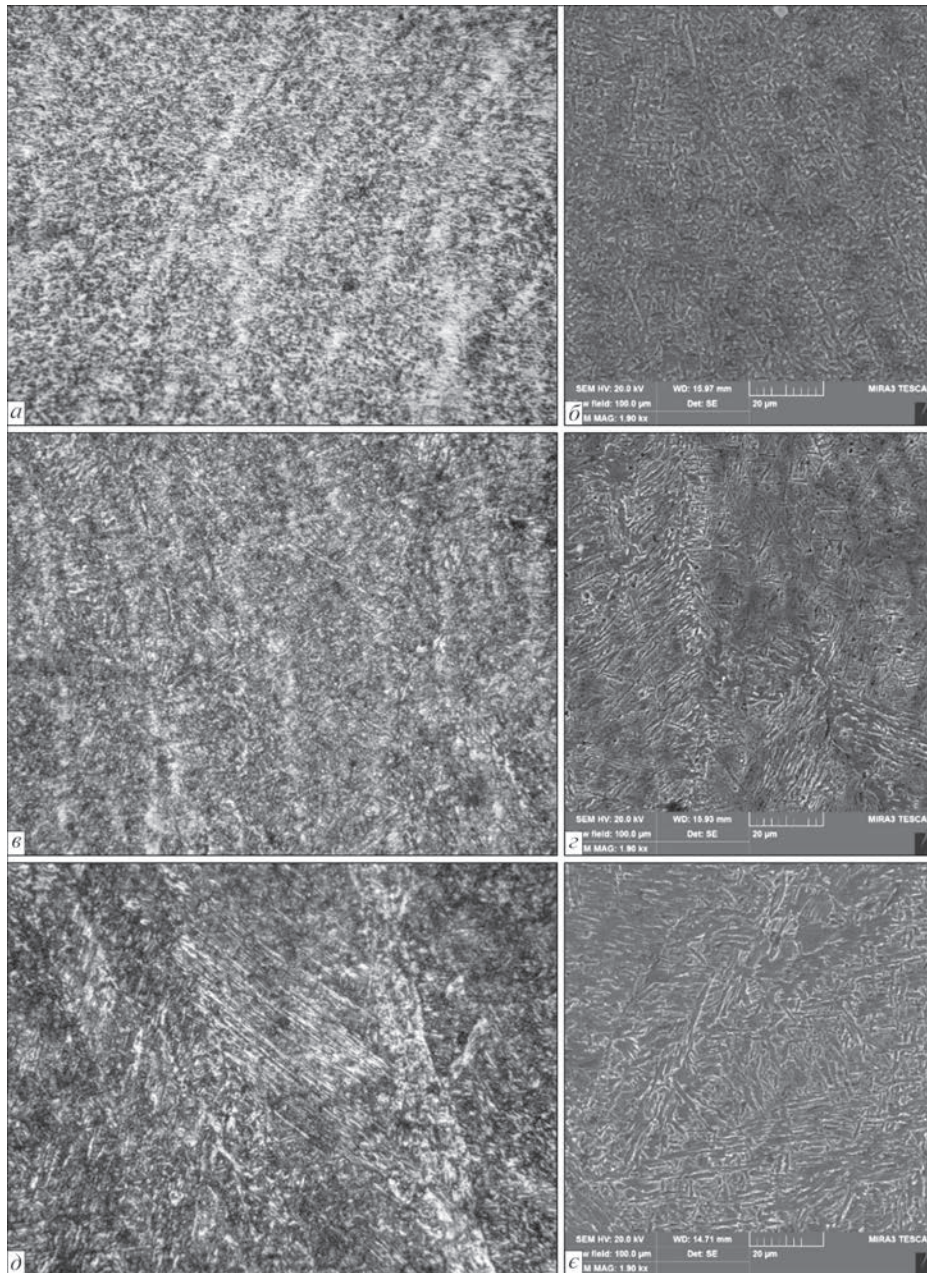


Рис. 5. Структура верхнього шару шва при зварюванні стаціонарною дугою (а, б), при ІДЗ (в, г) та пульсуючою дугою (д, е): а, в, д – оптична мікроскопія при $\times 500$ (зменшено в 2 рази); б, г, е – СЕМ

го та ІДЗ відбуваються певні зміни і у формуванні структур в металі швів та ЗТВ зварних з'єднань. На відміну від металу швів зварних з'єднань, виконаних з використанням дуги, яка горить стаціонарно та в якому формується переважно структура, що складається з сорбіту, в металі швів, з'єднань виконаних зварюванням пульсуючою дугою та ІДЗ, формується верхній та нижній бейніт. Відбулися при цьому зміни і в структурі металу ЗТВ зварних з'єднань. Визначено, що на відміну від металу ЗТВ зварних з'єднань, виконаних з використанням дуги, що горить стаціонарно, і в якому сформувалась бейнітна структура, при пульсуючому процесі зварювання в металі ЗТВ спостерігаються незначні ділянки, які містять мартенсит, при ІДЗ на ділянці перегріву ЗТВ формується виключно мартенситна структура підвищеної твердості.

Очевидно саме з цим пов'язаний той факт, що для запобігання утворення в зварних з'єднаннях сталі 13ХГМРБ холодних тріщин, необхідно підвищувати температуру їх попереднього підігріву. Про це свідчать результати нижче наведених досліджень узагальнені результати яких наведено у таблиці, а типові макрошліфи з проб Теккен на рис. 6.

Як видно із наведеного матеріалу, при традиційному зварювання з використанням дуги, що горить стаціонарно, температура попереднього підігріву (ТП) проб Теккен, яка дозволяє уникнути утворення в них холодних тріщин має бути не меншою ніж $90\text{ }^{\circ}\text{C}$. Стосовно проб Теккен зварювання яких виконувалося ІДЗ такого результату можливо досягти за рахунок підвищення температури попереднього підігріву проб до $120\text{ }^{\circ}\text{C}$ (рис. 6, б, в).

Наявність холодних тріщин (ХТ) та глибина їх розвитку у перерізі з'єднань (%) при ІДЗ низьколегованих термоміцних сталей

Марка сталі	Спосіб зварювання	Температура попереднього підігріву T_n , °C			
		20	60	90	120
13ХГМРБ	Стационарний	ХТ (100 %)	ХТ (50 %)	Відсутні	–
	ІДЗ	ХТ (100 %)	–	ХТ (до 30 %)	Відсутні

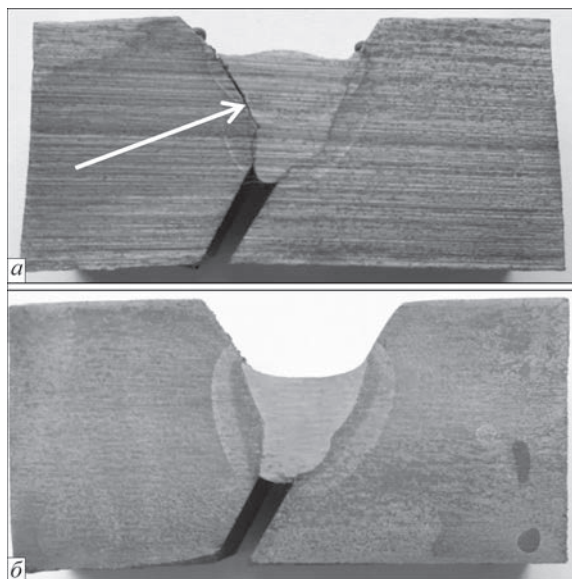


Рис. 6. Макрошліфи проб Теккен зварних з'єднань сталі 13ХГМРБ, виконаних ІДЗ: а – без попереднього підігріву; б – $T_n = 120$ °C

Враховуючи результати вище наведених досліджень в подальшому при зварюванні таврових зразків сталі 13ХГМРБ з яких виготовлялись зразки для випробувань на циклічну довговічність застосовувався попередній підігрів зварних з'єднань до температури 120 °C, яку підтримували за рахунок автопідігріву. Приварювання ребер до пластин сталі виконували з повним проваром і катетом 12 мм. Узагальнені результати випробувань наведено на рис. 7.

Встановлено, що за умов випробувань при напруженні циклу 30 МПа при обох способах зварювання тріщини втоми в зварних з'єднаннях не утворюються навіть після $2 \cdot 10^6$ циклів навантаження. Натомість, при напруженні 35 МПа, тріщини втоми критичної довжини (3 мм) виявили в місцях переходу від шву до основного металу, як при стаціонарному процесі зварювання, так і при

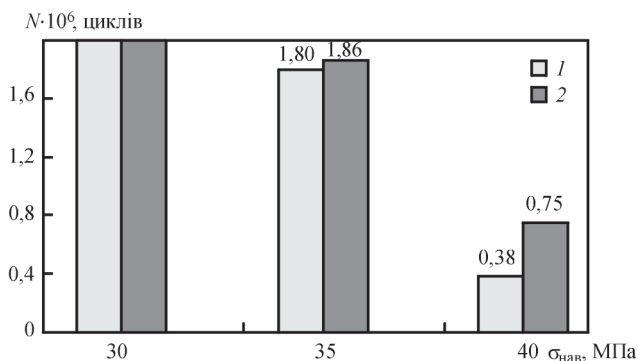


Рис. 7. Опірність утворенню тріщин втоми таврових зварних з'єднань сталі 13ХГМРБ при циклічному навантаженні вигинном: 1 – стаціонарний процес; 2 – ІДЗ

ІДЗ, приблизно при однакових циклах навантажень (відповідно 1,8 та $1,86 \cdot 10^6$ циклів). При збільшенні напружень до 40 МПа кількість циклів, при яких утворювалась тріщина втоми, суттєво знизилась. Але все ж, при ІДЗ вони приблизно були в 2 рази вищі, ніж при стаціонарному процесі (відповідно 0,38 та $0,75 \cdot 10^6$ циклів). На нашу думку, така різниця може бути пояснена за рахунок формування більш плавних переходів від шву до основного металу при ІДЗ та відповідного зниження рівня концентрації напружень в цій зоні зварного з'єднання.

Висновки

1. При імпульсно-дуговому зварюванні, в порівнянні з стаціонарним процесом, відбуваються певні зміни у формуванні структур в металі шву та ЗТВ зварних з'єднань низьколегованої термічно зміцненої сталі 13ХГМРБ. Структура металів стає більш гартівною. В металі шву формується верхній та переважно нижній бейніт (був сорбіт, 274 HV) твердістю 317...336 HV. На ділянці крупного зерна ЗТВ спостерігається мартенситна структура з твердістю 446...488 HV (був бейніт, 383 HV).

2. При зміні процесу зварювання показники статичної міцності та пластичності металу швів зварних з'єднань співставні та знаходяться в межах $\sigma_{0.2} = 713...740$ МПа, $\sigma_B = 786...800$ МПа, $\delta_5 = 16...19$ %, $\psi = 59...67$ %.

3. Вплив процесу дугового зварювання на показники ударної в'язкості металу швів та ЗТВ неоднозначний. Більш високі значення ударної в'язкості характерні для металу швів зварних з'єднань, виконаних з використанням традиційного процесу дугового зварювання, а саме дугою, яка горить стаціонарно. Традиційно при зниженні температури випробування зразків показники KCV зменшуються та при температурі іспиту мінус 40 °C становлять 43...49 Дж/см² незалежно від процесу зварювання. Схожі закономірності щодо змін ударної в'язкості в залежності від способу зварювання спостерігаються і для металу ЗТВ зварних з'єднань. Виключенням є результати іспиту зразків при температурі іспиту мінус 40 °C. За даної температури іспиту зразки, які виготовлялись із зварних з'єднань, виготовлених з використанням імпульсно-дугового зварювання мають найвищі показники KCV₋₄₀ (108 Дж/см²).

4. Опір металу швів та ЗТВ зварних з'єднань, незалежно від способу зварювання знаходиться на високому рівні ($K_q \geq 84$ МПа√м).

5. За рахунок формування при імпульсно-дуговому зварюванні в металі ЗТВ зварних з'єднань

термічно зміцненої сталі 13ХГМРБ гартівної мартенситної структури їх опірність утворенню холодних тріщин погіршується. Для уникнення утворення в зварних з'єднаннях таких тріщин підігрів таких з'єднань необхідно збільшити з 90 до 120 °С.

6. Результати випробувань зразків зварних таврових з'єднань термічно зміцненої сталі 13ХГМРБ на циклічному навантаженні вигином показав, що зварні з'єднання при імпульсно-дуговому зварюванні за рахунок формування більш плавних переходів від шву до основного металу та відповідного зниження рівня концентрації напружень мають підвищений опір утворенню тріщин втоми.

Список літератури/References

1. Лобанов, Л.М., Позняков, В.Д., Півторак, В.І. та ін. (2009) Залишкові напруження у зварних з'єднаннях високоміцних сталей. *Фізико-хімічна механіка матеріалів*, **6**, 13–22. Lobanov, L.M., Poznyakov, V.D., Pivtorak, V.I. et al. (2009) Residual stresses in welded joints of high-strength steels. *Fiz.-Khimich. Mekhanika Materialiv*, **6**, 13–22 [in Ukrainian]
2. Берднікова, О.М. (2021) Структурні критерії міцності та тріщиностійкості високоміцних сталей та їх зварних з'єднань. *Сучасна електromеталургія*, **2**, 47–53. Doi: <https://doi.org/10.37434/sem2021.02.07>. Berdnikova, O.M. (2021) Structural criteria of strength and crack resistance of high-strength steels and their welded joints. *Suchasna Elektrometal.*, **2**, 47–53 [in Ukrainian]. Doi: <https://doi.org/10.37434/sem2021.02.07>.
3. Palani, P.K., Murugan, N. (2006) Selection of parameters of pulsed current gas metal arc welding. *J. of Materials Processing Technology*, **172**, 1–10.
4. Ghosh, P.K. (2017) *Pulse current gas metal arc welding*. New York, Springer.
5. Римский С.Т., Свещинский В.Г., Шейко П.П. и др. (1993) Импульснодуговая сварка низколегированных сталей плавящимся электродом в смеси аргона с углекислым газом. *Автомат. сварка*, **2**, 38–41. Rimsky, S.T., Svetsinsky, V.G., Shejko, P.P. et al. (1993) Pulsed arc consumable electrode welding in argon-CO₂ mixture of low-alloy steels. *Avtomatic. Svarka*, **2**, 38–41 [in Russian].
6. Жерносеков А.М., Андреев В.В. (2007) Импульсно-дуговая сварка плавящимся электродом (Обзор). *Автомат. сварка*, **10**, 48–52. Zhernosekov, A.M., Andreev, V.V. (2007) Pulsed metal arc welding (Review). *The Paton Welding J.*, **10**, 40–43.
7. Жерносеков А.М. (2012) Тенденции развития управления процессами переноса металла в защитных газах (Обзор). *Автомат. сварка*, **1**, 33–38. Zhernosekov, A.M. (2012) Tendencies in development of control of metal transfer processes in shielding gases (Review). *The Paton Welding J.*, **1**, 29–33.
8. Zhernosekov, A.M., Fedorchuk, V.Ye., Kysla, H.P. et al. (2022) Influence of the shape of pulses of welding currents on the properties of joints of aluminum alloys. *Materials Science*, **58**(2), 157–164. Doi: <https://doi.org/10.1007/s11003-022-00644-4>
9. Потапьевский А.Г. (2007) *Сварка в защитных газах плавящимся электродом. Ч.1. Сварка в активных газах*. Изд. 2-е, перераб. Киев, Екотехнологія. Potapievsky, A.G. (2007) *Shielded-gas metal arc welding. Pt 1. Welding in active gases*. 2nd Ed. Kyiv, Ekotekhnologiya [in Russian].
10. Essers, W.G., Van Gompel, M.R.M. (1984) Arc control with pulsed GMA welding. *Weld. J.*, **63**, 26–32.
11. Лашченко Г.И. (2006) Способы дуговой сварки стали плавящимся электродом. Киев, Екотехнологія. Lashchenko, G.I. (2006) *Methods of metal arc welding*. Kyiv, Ekotekhnologiya [in Russian].
12. Воропай Н.М., Илюшенко В.М., Ланкин Ю.Н. (1999) Особенности импульсно-дуговой сварки с синергетическим управлением параметрами режимов. *Автомат. сварка*, **6**, 26–32. Voropaj, N.M., Ilyushenko, V.M., Lankin, Yu.N. (1999) Features of pulsed arc welding with synergetic control of mode parameters. *Avtomatic. Svarka*, **6**, 26–32 [in Russian].
13. Pal, K., Pal, S.K. (2011) Effect of pulse parameters on weld quality in pulsed gas metal arc welding: a review. *J. of Materials Engineering and Performance*, **20**(6), 918–931.
14. Yousefieh, M., Shamanian, M., Saatchi, A. (2011) Optimization of the pulsed current gas tungsten arc welding (PCGTAW) parameters for corrosion resistance of super duplex stainless steel (UNS S32760) welds using the Taguchi method. *J. Alloys Compd.*, **509**, 782–788. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2010.09.087>.
15. Goyal, V.K., Ghosh, P.K., Saini, J.S. (2009) Analytical studies on thermal behaviour and geometry of weld pool in pulsed current gas metal arc welding. *J. of Materials Processing Technology*, **209**(3), 1318–1336.
16. Palani, P.K., Murugan, N. (2006) Selection of parameters of pulsed current gas metal arc welding. *J. of Materials Processing Technology*, **172**, (1), 10.
17. Zhdovceev, A.V., Poznyakov, V.D. Rogante, M. (2020) Features of structure formation and properties of joints of S460M steel made by pulsed-arc welding. *The Paton Welding J.*, **6**, 9–13.
18. Zhdovceev, A., Poznyakov, V., Kim, H.S. (2020) PC-GMAW effect on the welding thermal cycle and weld metal geometry for high strength steels. *Int. J. of Engineering and Safety Sciences*, **1**, 5–16. DOI: <https://doi.org/10.16926/ijess.2020.01.01>.

STRUCTURE AND PROPERTIES OF WELDED JOINTS OF 13KhGMRB STEEL IN PULSED-ARC WELDING

O.A. Haivoronskyi, V.D. Poznyakov, S.L. Zhdanov, A.V. Zhdovceev, A.O. Maksymenko, A.M. Denysenko

E.O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine. 11 Kazymyr Malevych Str., 03150, Kyiv, Ukraine.

E-mail: paton39@ukr.net

The results of studies on the structure formation in the welds and heat-affected-zone (HAZ) metal of a low-alloy thermally strengthened 13KhGMRB steel in a pulsed-arc welding, changes in mechanical properties and stress intensity factor in brittle fracture and resistance to cold and fatigue cracks formation are given. It was found that compared to stationary arc welding, in a pulsed-arc welding in the structure of welds and HAZ metal of joints, a larger number of hardening structures of bainite and martensite is formed. It was determined that regardless of the welding method, the values of strength ($\sigma_{0.2}$ and σ_f) and ductility (δ_5 and ψ) of metals are approximately at the same level while their ability to resist impact loads, especially at a test temperature -40 °C, in the case of pulsed-arc welding grows. In particular, it was determined that the values of impact toughness of the HAZ metal of welded joints produced using pulsed-arc welding are by 30 % higher compared to arc welding and amount to 108 J/cm². I.e., the cold resistance of the weld metal is clearly increased. The resistance of weld and HAZ metals to brittle fracture is at a fairly high level ($Kq \geq 84 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$). It was also established that due to an increase of welded joints in the HAZ metal produced using pulsed welding of hardening structures, the temperature of preliminary heating should be increased from 90 to 120 °C to avoid the formation of cold cracks. Instead, such welded joints have a higher resistance to fatigue cracks at cyclic bending load. 18 Ref., 1 Tabl., 7 Fig.

Keywords: low-alloy thermally strengthened steel, pulsed-arc welding, weld metal, HAZ, structure, mechanical properties, cold cracks, brittle fracture, fatigue resistance

Надійшла до редакції 13.07.2023