

ВПЛИВ ДУГОВОГО ЗВАРЮВАННЯ ТА ВИСОКОЧАСТОТНОГО МЕХАНІЧНОГО ПРОКОВУВАННЯ НА МЕХАНІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ ТА ОПІР КРИХКОМУ РУЙНУВАННЮ ЗВАРНИХ З'ЄДНАНЬ СТАЛІ S420NL

С.Л. Жданов¹, О.А. Гайворонський¹, В.Д. Позняков¹, Vaudin T.², А.В. Завдовєєв¹, А.М. Герасименко¹, Р.В. Богодіст¹

¹ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України. 03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11, E-mail: patonlab48@ukr.net

²Université Paris-Saclay, CNRS, Institut de chimie moléculaire et des matériaux d'Orsay, 91405, Orsay, France

У роботі розглянуто закономірності фазово-структурних перетворень у зварних з'єднаннях низьколегованої сталі S420NL у вихідному стані після високочастотного механічного проковування та накопичення втомних пошкоджень. Зварні з'єднання отримано механізованим зварюванням у середовищі вуглекислого газу порошковим дротом Filarc PZ 6114 S. Методом світлової та трансмісійної електронної мікроскопії (ТЕМ) досліджено зеренну, субзеренну та дислокаційну структуру зварних з'єднань. Отримано експериментальні дані щодо впливу структури на зміну показників ударної в'язкості (KCV) та опору крихкому руйнуванню (K_d) зварних з'єднань без обробки з високочастотним механічним проковуванням після накопичення втомних пошкоджень. Показано ефективність підвищення їх опору втомі за рахунок використання високочастотного механічного проковування. Бібліогр. 13, табл. 1, рис. 5.

Ключові слова: низьколегована сталь, дугове зварювання, зварні з'єднання, структура, високочастотне механічне проковування, втомні пошкодження, крихке руйнування

Вступ. Однією з основних службових характеристик зварних з'єднань є здатність забезпечувати високу довговічність в умовах циклічних навантажень. Але їх границя опору втомі може суттєво відрізнятись від основного металу. Можливість виходу з ладу через втому металу є одним з факторів, які необхідно враховувати при проектуванні конструкцій [1, 2]. Втомне руйнування починається з однієї або декількох тріщин на поверхні та поширюється всередину в ході багаторазового прикладання зусиль, поки раптово не відбудеться повний розрив. Частка втомних пошкоджень зварних конструкцій складає приблизно 40 % від загальної кількості їх руйнувань і відмов. Причина полягає в тому, що при циклічних навантаженнях значну роль відіграють несприятливі залишкові напруження, концентрація яких обумовлена формою шва та технологічними дефектами, градієнт структур і механічних характеристик на межі переходу від металу шва до ЗТВ. Додатково на опір втомі впливають хімічний склад і структура основного металу, параметри термічного циклу зварювання, схема навантаження, середовище тощо [3, 4]. Негативний вплив вказаних факторів не завжди вдається мінімізувати до чи під час зварювання. Тому в багатьох випадках необхідна післязварювальна обробка зварних з'єднань [5–8]. Актуальність технології підвищення опору втомі багато десятиліть входить до пріоритетної групи

інтересів інженерів, інформація про їх здобутки не сходить зі сторінок технічних видань [1–3, 6, 7].

У світовій практиці спостерігається загальна тенденція пошуку високотехнологічних способів продовження терміну безпечної експлуатації діючих металоконструкцій. Систематичні дослідження [7–11], проведені в Інституті електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України та інших організаціях, показали, що передові методи зварювання, високочастотне механічне проковування (ВМП) та автоматизація цього процесу забезпечують високі фізико-механічні показники зміцненого шару металу і на сучасному етапі розвитку ресурсозберігаючих технологій є найефективнішим способом зміцнення зварних конструкцій, що працюють в умовах циклічних навантажень.

З огляду на це, **метою** роботи було отримання порівняльних результатів випробувань при визначенні впливу дугового зварювання та високочастотного механічного проковування, а також накопичення втомних пошкоджень на фізико-механічні властивості зварних з'єднань і на їх опір крихкому руйнуванню.

Методика досліджень. Об'єктом досліджень були зварні з'єднання низьколегованої конструкційної сталі S420NL наступного хімічного складу, %: 0,18 С; 0,58 Si; 1,01 Mn; 0,6 Ni; 0,11 Mo; 0,22 Cr; 0,17 V; 0,05 Nb; 0,48 Cu; 0,011 S; 0,018 P. При їх зварюванні в середовищі CO₂ використовували порошковий зварювальний дріт Filarc PZ

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

© С.Л. Жданов, О.А. Гайворонський, В.Д. Позняков, Vaudin T., А.В. Завдовєєв, А.М. Герасименко, Р.В. Богодіст, 2025

6114 S діаметром 1,2 мм, який за показниками статичної міцності забезпечує рівномірність металу шва з основним металом. Режим зварювання стикових з'єднань зазначеної сталі завтовшки 14 мм з V-подібним розкриттям кромки становив: $I_{зв} = 190...210$ А; $U_d = 26...28$ В; $V_{зв} = 14...16$ м/год.

Післязварювальне ВМП виконували за відпрацьованою технологією з параметрами статичного навантаження (пережиму інструменту) $C = 150...200$ Н з частотою та амплітудою коливань перетворювача 27 кГц та $a = 15$ мкм і швидкістю повздовжньої подачі деформуючого інструменту $V = 25$ мм/с. Обробці підлягала вузька ділянка металу лінії сплавлення з'єднання з формуванням після проковування гладкої канавки завширшки 2...2,5 мм і завглибшки до 1,0 мм.

Для проведення експериментальних досліджень використовували комплексний підхід сучасних методів світлової (Versamet-2, Neophot-32) і трансмісійної електронної мікроскопії (JEM-200СХ, фірма JEOL, Японія). Мікротвердість вимірювали на мікротвердомірі LECO M-400 із навантаженням 100 г. Зразки для металографічних досліджень готували за стандартними методиками із застосуванням алмазних паст різної дисперсності. Виявлення мікроструктури виконували методом хімічного травлення у 4%-му спиртовому розчині азотної кислоти.

Для проведення випробувань ударної в'язкості зони термічного впливу (ЗТВ) зварних з'єднань виготовляли зразки відповідно до ДСТУ EN ISO 9017:2015. За результатами випробувань оцінювали вплив ВМП на зміну показників KCV при температурах випробувань до -40 °С.

Здатність металу опиратись крихкому руйнуванню визначали з використанням підходів механіки руйнування, згідно з якими використовували зразки, попередньо вирізані зі зварних з'єднань, завтовшки 10 мм з наведеною тріщиною втомі у верхині надрізу, у вихідному стані та після ВМП. Потім при статичному навантаженні вигином визначали критичний коефіцієнт інтенсивності напружень K_q . Для визначення значень критичного коефіцієнта інтенсивності напружень використовували формули механіки руйнування. При цьому брали до уваги встановлену раніше залежність, що при підвищенні значень K_q чутливість до концентрації напружень знижується та опір металу крихкому руйнуванню підвищується, або навпаки, при зниженні коефіцієнта опір знижується.

Ударна в'язкість металу ЗТВ зварних з'єднань сталі S420NL, виконаних порошковим дротом Filarc PZ 6114 S в CO₂

Номер з/п	Обробка після зварювання	KCV, Дж/см ² , при температурах, °С		
		+20	-20	-40
1	Вихідний стан	315...322	275...287	227...252
		319	282	238
2	Високочастотне механічне проковування	325...330	281...298	235...262
		327	290	250

Випробування на втому проводили на зразках зварних з'єднань завтовшки 14 мм у вихідному стані та після ВМП при їх циклічному навантаженні вигином. Зварні з'єднання навантажували з частотою 14 Гц при напруженнях симетричного циклу 100 МПа. Для випробувань використовували машину УМП-1. Під час випробувань фіксували кількість циклів, при яких відбувалось утворення тріщини втомі критичної довжини (3 мм), та напруження, при якому зразки залишилися неушкодженими після $2,1 \cdot 10^6$ циклів навантажень.

Результати роботи та їх обговорення. У результаті випробувань на ударну в'язкість встановлено, що показники KCV для пришовного металу ЗТВ у випадку високочастотного механічного проковування та без нього практично однакові, але після ВМП дещо вищі. Так, при температурі випробування $+20$ °С вони знаходяться в діапазоні 319...327 Дж/см² при -20 °С – 281...290 Дж/см² при -40 °С – 238...250 Дж/см² (див. таблицю).

Методами світлової мікроскопії встановлено, що структура основного металу сталі S420NL є феритно-перлітною з розміром зерна $Dz \sim 10...30$ мкм з мікротвердістю $HV_{0,1} \sim 1600...1700$ МПа. У багатопрхідному зварному з'єднанні без обробки ВМП метал шва має феритно-перлітну (Ф+П) структуру. У верхньому проході мікротвердість складає $HV \sim 1650$ МПа з розміром зерен глобулярного типу $Dz \sim 10...50$ мкм і дендритів $h \times l = 50...200 \times 150...550$ мкм. У нижньому проході $HV_{0,1} \sim 1600...1700$ МПа, розмір зерен також глобулярного типу $Dz \sim 10...50$ мкм і дендритів $h \times l = 50...100 \times 150...450$ мкм.

У зоні термічного впливу (ЗТВ) спостерігається бейнітна структура (Б), а при наближенні до основного металу – структура Ф+П. Розмір пакетів зменшується від $Dz \sim 40...200$ мкм (ділянка перегріву ЗТВ) до $Dz \sim 5...39$ мкм (ділянка перекристалізації ЗТВ). При цьому $HV_{0,1}$ відповідно від 2210...2740 МПа до 1990...2280 МПа.

У порівнянні з вихідним станом після ВМП на глибині 125 мкм від поверхні зразка відбувається подрібнення структури на вищевказаних ділянках ЗТВ зварного з'єднання до $Dz \approx 15...100$ мкм (ділянка перегріву ЗТВ) та $Dz \approx 5...30$ мкм (ділянка перекристалізації ЗТВ), при цьому зростають значення $HV_{0,1}$ в середньому в 1,2 рази – до 3090 та до 2360 МПа відповідно (рис. 1).

Методом ТЕМ встановлено, що в металі зварного шва спостерігається формування

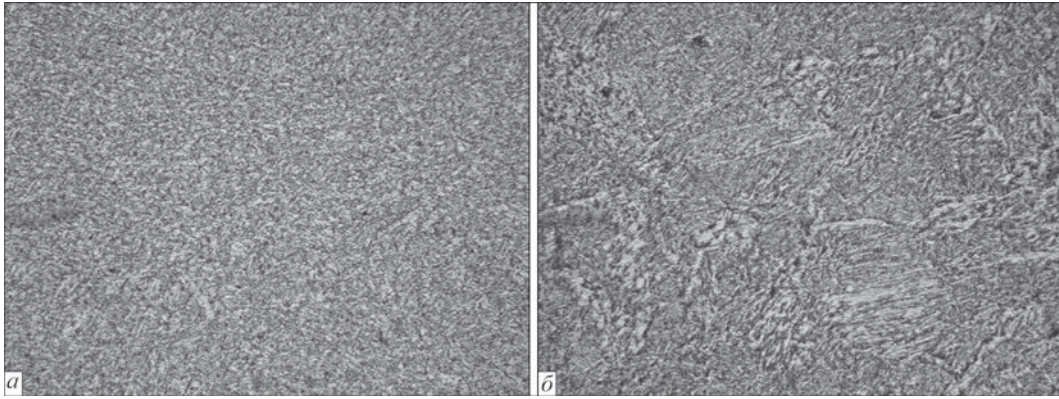


Рис. 1. Мікροструктура ($\times 500$) металу шва (а) та ЗТВ (б) зварного з'єднання сталі S420NL з використанням дроту Filarc PZ 6114 S в CO_2 після ВМП

субструктури (0,3...1,5 мкм). Щільність дислокацій (ρ) у структурі металу шва в середньому складає $\rho = 3 \dots 6 \cdot 10^9 \text{ см}^{-2}$. У зоні термічного впливу формується рейкова бейнітна структура. Бейніт верхній має товщину рейок $h_p = 0,3 \dots 1,1 \text{ мкм}$ із субструктурою розміром $d_c = 0,16 \dots 0,3 \times 0,35 \dots 1 \text{ мкм}$ при щільності дис-

локацій $\rho = 4 \dots 6 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2}$. Бейніт нижній має $h_p = 0,5 \dots 1,3 \text{ мкм}$ з $d_c = 0,15 \dots 0,4 \times 0,25 \dots 0,9 \text{ мкм}$ при щільності дислокацій $\rho = 2 \dots 5 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2}$.

Таким чином, встановлено, що в металі зварного з'єднання сталі S420NL з використанням дроту Filarc PZ 6114 S у металі шва та ЗТВ спостерігаються відносно невеликі градієнти щодо щільності

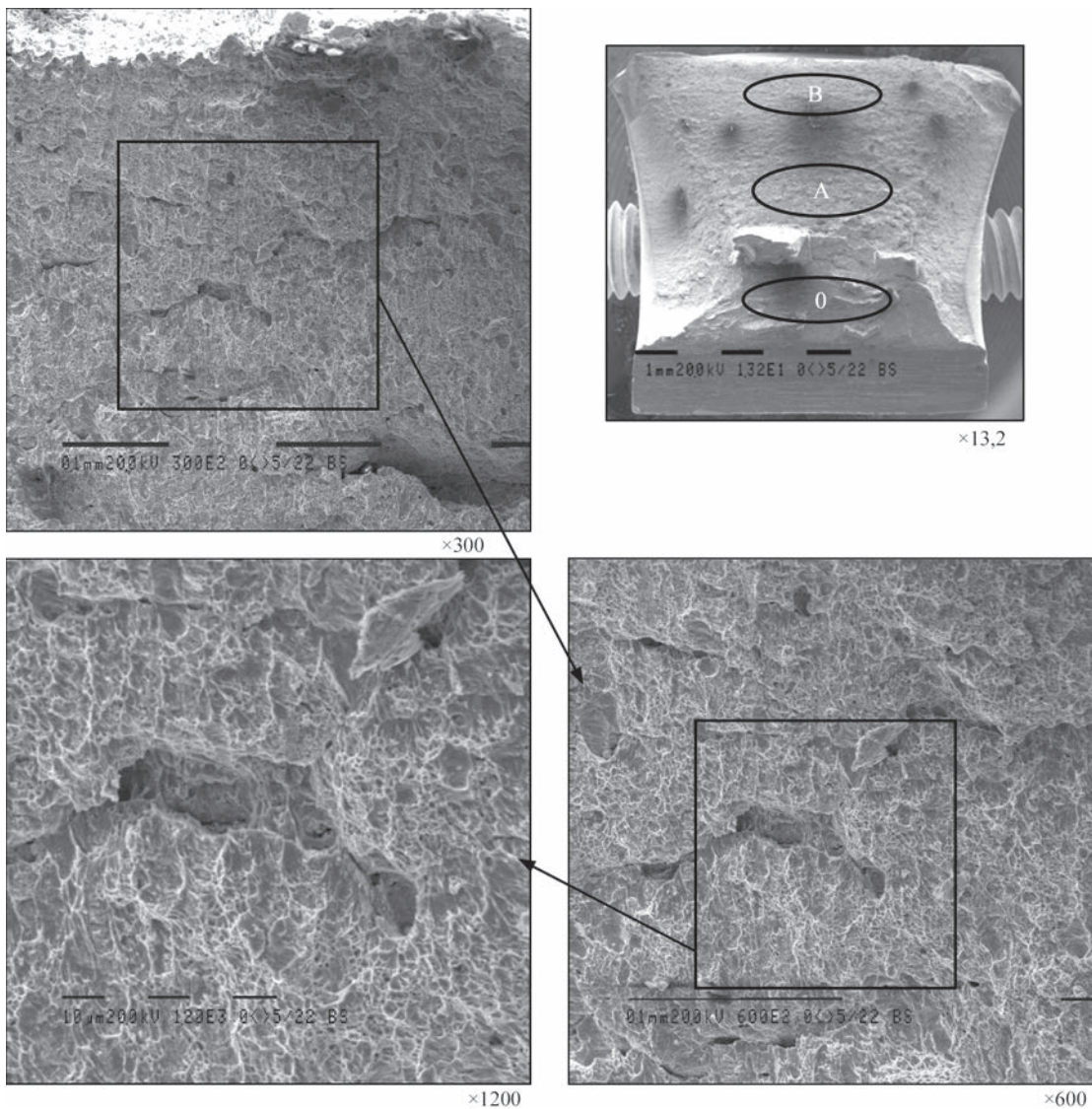


Рис. 2. Фото зламу зразків зварного з'єднання після випробування на ударний згин при температурі $+20 \text{ }^\circ\text{C}$ (зона повільного розвитку тріщини)

дислокацій і формування субструктурних складових, що буде, напевно, забезпечувати тріщиностійкість, а також зміцнення ділянки шва та ЗТВ.

Методом скануючої електронної мікроскопії виконано фрактографічні дослідження зварних з'єднань після випробувань на ударну в'язкість при температурах +20 °С, -20 °С і -40 °С для характерних зламів (біля надрізу – повільного роз-

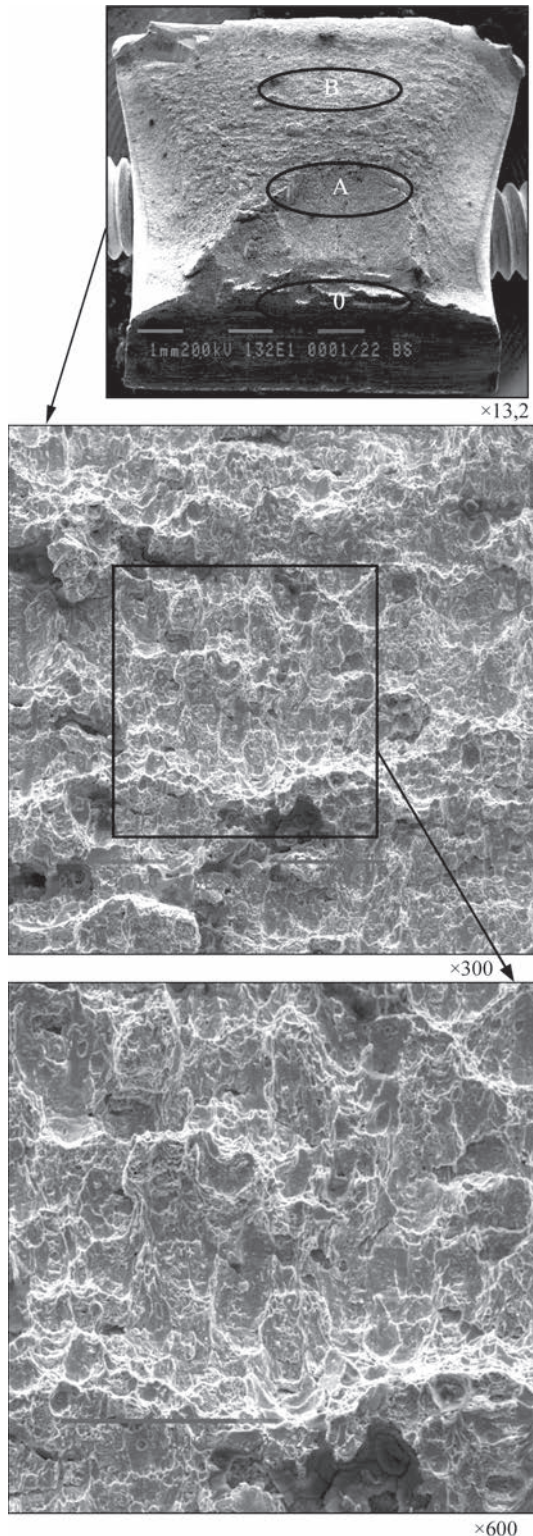


Рис. 3. Фото зламу зразків зварного з'єднання після випробування на ударний згин при температурі -40 °С (зона повільного розвитку тріщини)

витку тріщини; магістрального розвитку тріщини, долому та бокових скосів). Для всіх досліджуваних зламів показано наступне – руйнування проходило по металу ЗТВ, характер руйнування в'язкий з ямковим мікрорельєфом. У зонах повільного розвитку тріщини спостерігаються розшарування та одиничні вторинні мікротріщини (рис. 2, 3). У зонах магістрального розвитку тріщини, долому та бокових скосів дефектів не виявлено при всіх температурах випробувань. Це свідчить про високу тріщиностійкість металу та підтверджується високими показниками ударної в'язкості (див. таблицю). За результатами виконаних досліджень щодо опору крихкому руйнуванню встановлено наступне. У вихідному стані зварні з'єднання сталі S420NL, без обробки ВМП, при випробуваннях металу ЗТВ мають показники K_q на рівні 95,8 МПа $\sqrt{м}$ при температурі випробувань +20 °С, 92,4 МПа $\sqrt{м}$ при -20 °С і 86,7 МПа $\sqrt{м}$ при -40 °С (рис. 4). Дещо вищими є значення коефіцієнта інтенсивності напружень для металу ЗТВ після ВМП зварних з'єднань. У залежності від температури випробувань вони відповідно становлять 97,1, 93,5 і 89,1 МПа $\sqrt{м}$. Підвищення опору крихкому руйнуванню металу ЗТВ зварних з'єднань сталі S420NL у результаті дії ВМП знаходиться в межах до 2,5 %.

Результати проведених досліджень опору втоми свідчать, що зразок зварного з'єднання сталі S420NL у вихідному стані уразила тріщина втоми критичної довжини 3 мм вже після 1420000 циклів навантаження. Натомість зразки, які піддали ВМП, залишилися незруйнованими після $N = 2,1 \cdot 10^6$ циклів навантаження. Можна припустити, що підвищення опору втоми зварних з'єднань сталі S420NL відбулося в результаті змін у структурі в приповерхневому шарі на лінії сплавлення та в металі ЗТВ.

З літературних джерел [11–13] і з практики експлуатації зварних конструкцій різного призначення з'ясовано, що в найбільш навантажених вузлах можуть накопичуватись втомні пошкодження, які призводять до передчасної появи тріщин, що, в свою чергу, істотно знижує циклічну довговічність пошкоджених елементів у конструкції в цілому. Тому

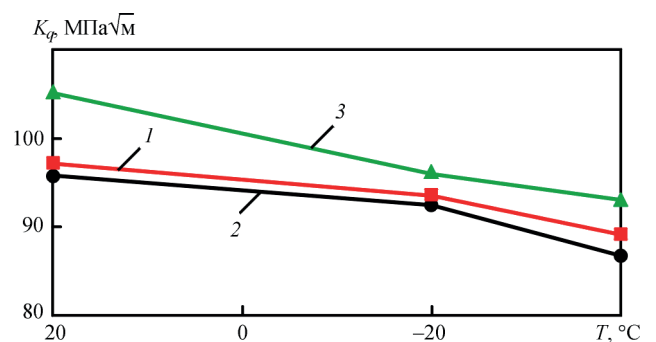


Рис. 4. Залежність значень критичного коефіцієнту інтенсивності напружень K_q від температури випробувань металу ЗТВ зварних з'єднань сталі S420NL: 1 – ВМП; 2 – без ВМП; 3 – основний метал для порівняння

в роботі також досліджували вплив рівня накопичених втомних пошкоджень на опір крихкому руйнуванню металу ЗТВ стикових зварних з'єднань, виконаних вищевказаними зварювальними матеріалами. Відмінність від випробувань, про які йшла мова раніше, полягала в тому, що попередньо зразки піддавали циклічному навантаженню з різною кількістю циклів. У нашому випадку вона складала $N = 800000$ та $N = 1200000$, що становить 60 і 80 % від загальної кількості циклів навантажень, при яких (див. вище) утворюються тріщини втоми (1420000 циклів). За результатами досліджень встановлено, що зі збільшенням рівня накопичених пошкоджень значення коефіцієнта інтенсивності напружень K_q дещо зменшується, але залишається на високому рівні (рис. 5). Так, при температурі випробувань $+20$ °С зі збільшенням рівня накопичених пошкоджень від 60 до 80 % від значення коефіцієнта зменшуються від 96 до 94,5 МПа $\sqrt{м}$, а при температурі -40 °С — з 83,5 до 81,9 МПа $\sqrt{м}$ відповідно.

Очевидно, що зниження опору крихкому руйнуванню металу ЗТВ зварних з'єднань відбувається в результаті змін у структурі металу при тривалих навантаженнях.

Проведені дослідження структури свідчать, що в результаті тривалого циклічного навантаження в структурі металу ЗТВ зварного з'єднання сталі S420NL відбулися певні зміни, які пов'язані з утворенням локальних смугових структур. Це свідчить про розвиток процесів перерозподілу дислокацій у цій зоні. У той же час змін у фазовому складі, розмірі зерен і мікротвердості не відбувається. Так, як вище зазначалось, на ділянці перегріву ЗТВ з'єднань присутня структура бейніту, мікротвердість якого складає 1870...2450 МПа, розмір пакетів становить 40...200 мкм.

Методом растрової електронної мікроскопії досліджено характер руйнування металу зварних з'єднань після накопичення втомних ушкоджень за кількістю 1200000 циклів навантаження при температурах від $+20$ °С до -40 °С.

При температурі $+20$ °С у зоні магістрального розвитку тріщини характер руйнування в основ-

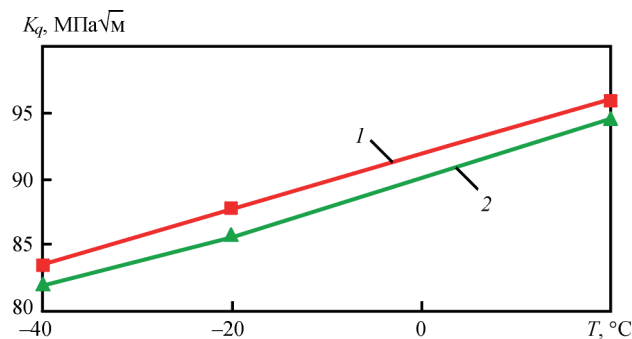


Рис. 5. Вплив накопичення втомних пошкоджень на опір крихкому руйнуванню металу ЗТВ зварних з'єднань сталі S420NL: 1 – 60 % накопичених пошкоджень ($N = 800000$ циклів); 2 – 80 % накопичених пошкоджень ($N = 1200000$ циклів)

ному в'язкий ($V_q = 85...90$ %). На поверхні відсутні як дрібні ямки розміром $d_a = 0,5...5$ мкм, так і великі $d_a = 8...30$ мкм. Також є ділянки квазікрихкого руйнування ($V_q = 10...15$ %) з розміром фасеток квазісколу $d_\phi \approx 5...25$ мкм.

При зниженні температури випробування до -20 °С об'ємна частка крихкого руйнування підвищується до $V_q = 30...35$ %, розмір фасеток квазісколу не змінюється.

При температурі випробування -40 °С об'ємна частка крихкого руйнування збільшується до $V_q = 60...65$ %, розмір фасеток квазісколу не змінюється ($d_\phi \approx 5...25$ мкм). Також в металі присутні протяжні вторинні тріщини $L_{тр} = 20...110$ мкм.

Отже, при зниженні температури випробування до -40 °С у ділянці магістрального розвитку тріщини маємо переважно крихкий тип руйнування (60...65 %). Це підтверджується незначним зниженням (на 12 %) в'язкості руйнування від $K_q = 94,5$ МПа $\sqrt{м}$ ($T_{випр} = 20$ °С) до $K_q = 82...85$ МПа $\sqrt{м}$ (при мінусових температурах), що свідчить про достатню тріщиностійкість зварних з'єднань сталі S420NL в умовах експлуатаційних циклічних навантажень.

У підготовці та проведенні випробувань брали участь В.Д. Рябоконт та В.А. Яцук.

Висновки

1. Металографічними дослідженнями встановлено, що під дією ВМП на глибині 125 мкм від поверхні зразка відбувається подрібнення бейнітної структури металу ЗТВ зварного з'єднання, спостерігаються невеликі градієнти щодо щільності дислокацій і формування субструктурних складових, при цьому зростають значення твердості у порівнянні з вихідним станом. Також після ВМП дещо вищими є показники ударної в'язкості металу ЗТВ зварних з'єднань сталі S420NL, ніж у стані без проковування.

2. Встановлено, що застосування ВМП для зварних з'єднань сталі S420NL призводить до підвищення опору металу ЗТВ крихкому руйнуванню, про що свідчить незначне зростання коефіцієнта інтенсивності напружень K_q у межах до 0,5 %.

3. Оцінено вплив рівня накопичених пошкоджень на опір зварних з'єднань сталі S420NL крихкому руйнуванню. Отримані дані свідчать, що зі збільшенням рівня пошкоджень з 60 до 80 % від загальної кількості навантажень, при яких утворюються тріщини втоми, значення коефіцієнта K_q зменшується на 1,5...2,0 %. Це можна пояснити певними змінами в структурі металу ЗТВ зварних з'єднань (без зміни фазового складу), пов'язаними з утворенням локальних смугових структур і розвитком процесів перерозподілу дислокацій у цій зоні.

4. Встановлено, що підвищити опір втоми зварних з'єднань сталі S420NL можливо за рахунок використання ВМП після їх зварювання. При цьо-

му після ВМП зварне з'єднання залишається неушкодженим після $N = 2,1 \cdot 10^6$ циклів навантажень, тоді як без ВМП тріщина в томи критичної довжини утворюється вже після 1420000 циклів.

Список літератури

1. Кудрявцев В.И., Наумченков Н.Е. (1976) *Усталость сварных конструкций*. Москва, Машиностроение.
2. Труфяков В.И. (1998) Повышение сопротивления усталости сварных соединений и конструкций. *Автоматическая сварка*, **11**, 11–19.
3. Похмурський В.І., Хома М.С. (2008) *Корозійна втома металів і сплавів*. Львів, СПОЛОМ.
4. Кныш В.В., Соловей С.А., Кирьян В.И., Ныrkova Л.И., Осадчук С.А. (2017) Применение высокочастотной проковки для повышения эксплуатационных характеристик стыковых сварных соединений в условиях умеренного климата. *Автоматическая сварка*, **4**, 15–20. DOI: <https://doi.org/10.15407/as2017.04.03>
5. Дегтярев В.А. (2011) Оценка влияния режимов высокочастотной проковки сварных соединений на их сопротивление усталости. *Проблемы прочности*, **2**, 61–70. <http://dspace.nbuv.gov.ua/handle/123456789/112756>
6. Нехорошков, О.Н., Першин В.П., Семухин Б.С. (2006) Применение метода ультразвуковой ударной обработки для сварных соединений конструкционных сталей. *Вестник ТГАСУ*, **2**, 120–125.
7. Кныш В.В., Кузьменко А.З., Войтенко О.В. (2006) Повышение сопротивления усталости сварных соединений высокопрочной механической проковкой. *Автоматическая сварка*, **1**, 43–47.
8. Zhang, H., Wang, D., Xia, L. et al. (2015) Effects of ultrasonic impact treatment on pre-fatigue loaded high-strength steel welded joints. *International J. of Fatigue*, **80**, 278–287. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2015.06.017>
9. Панин В.Е., Каблов Е.Н., Плешанов В.С. (2006) Влияние ультразвуковой ударной обработки на структуру и сопротивление усталости сварных соединений высокопрочной стали ВКС-12. *Физическая мезомеханика*, **3**, 85–96.
10. Лобанов Л.М., Кирьян В.И., Кныш В.В., Прокопенко Г.И. (2006) Повышение сопротивления усталости сварных соединений сварных металлоконструкций высокочастотной механической проковкой (Обзор). *Автоматическая сварка*, **9**, 3–11.
11. Кныш В.В., Соловей С.А., Кузьменко А.З. (2011) Влияние предварительного циклического нагружения на эффективность упрочнения сварных соединений высокопрочной проковкой. *Автоматическая сварка*, **10**, 44–48.
12. Кныш В.В., Соловей С.А., Кузьменко А.З. (2012) Повышение сопротивления усталости сварных соединений с накопленной повреждаемостью при многоступенчатых и блочных нагружениях. *Автоматическая сварка*, **7**, 24–28.

13. Кныш В.В., Кузьменко А.З., Соловей С.О. (2009) Накопичення втомних пошкоджень в таврових зварних з'єднаннях в початковому і зміщеному високочастотним проковуванням станах при блочному навантаженні. *Машинознавство*, **9**, 27–31.

References

1. Kudryavtsev, V.I., Naumchenkov, N.E. (1976) *Fatigue of welded structures*. Moscow, Mashinostroenie [in Russian].
2. Trufyakov, V.I. (1998) Increasing the fatigue resistance of welded joints and structure. *Avtomatich. Svarka*, **11**, 11–19 [in Russian].
3. Pokhmursky, V.I., Khoma, M.S. (2008) *Corrosion resistance of metals and alloys*. Lviv, SPOLOM [in Ukrainian].
4. Knysh, V.V., Solovej, S.A., Kyrian, V.I., Nyrkova, L.I., Osadchuk, S.A. (2017) Application of high-frequency peening to improve the performance of butt welded joints in the atmosphere of temperate climate. *The Paton Welding J.*, **4**, 14–18. DOI: <https://doi.org/10.15407/tpwj2017.04.03>
5. Degtyarev, V.A. (2011) Assessment of the high-frequency mechanical forging mode effect on fatigue strength of welded joints. *Strength Mater.*, **43**, 154–160. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11223-011-9281-1>
6. Nekhoroshkov, O.N., Pershin V.P., Semukhin B.S. (2006) Application of the method of ultrasonic impact treatment for welded joints of structural steels. *Bulletin of TSUACE*, **2**, 120–125 [in Russian].
7. Knysh, V.V., Kuzmenko A.Z., Vojtenko O.V. (2006) Increasing fatigue resistance of welded joints by high-frequency mechanical peening. *The Paton Welding J.*, **1**, 30–33.
8. Zhang, H., Wang, D., Xia, L., Lei, Z., Li, Y. (2015) Effects of ultrasonic impact treatment on pre-fatigue loaded high-strength steel welded joints. *Int. J. of Fatigue*, **80**, 278–287. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2015.06.017>
9. Panin, V.E., Kablov, E.N., Pleshano, V.S. (2006) Effect of ultrasonic impact treatment on the structure and fatigue resistance of welded joints of high-strength steel VKS-12. *Fizicheskaya Mezomechanika*, **3**, 85–96 [in Russian].
10. Lobanov, L.M., Kirian, V.I., Knysh, V.V., Prokopenko, G.I. (2006) Improvement of fatigue resistance of welded joints in metal structures by high-frequency mechanical peening (Review). *The Paton Welding J.*, **9**, 2–8.
11. Knysh, V.V., Solovej, S.A., Kuzmenko, A.Z. (2011) Influence of preliminary cyclic loading on effectiveness of welded joint strengthening by high-frequency peening. *The Paton Welding J.*, **10**, 36–39 [in Ukrainian].
12. Knysh, V.V., Solovej, S.A., Kuzmenko, A.Z. (2012) Improvement of fatigue resistance of welded joints with accumulated damage under multistage and block loading. *The Paton Welding J.*, **7**, 19–23.
13. Knysh, V.V., Kuzmenko, A.Z., Solovej, S.A. (2009) Accumulation of fatigue damage in tee welded joints in as-welded and after high-frequency peening under block loading. *Machynoznavstvo*, **9**, 27–31.

IMPACT OF ARC WELDING AND HIGH FREQUENCY MECHANICAL PEENING ON THE MECHANICAL PROPERTIES AND RESISTANCE TO BRITTLE FRACTURE OF WELDED JOINTS OF S420NL STEEL

S.L. Zhdanov¹, O.A. Haivoronsky¹, V.D. Poznyakov¹, Baudin T.², A.V. Zavdoveev¹, A.M. Gerasymenko¹, R.V. Bogodist¹

¹E.O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine. 11 Kazymyr Malevich Str., 03150, Kyiv, Ukraine.

E-mail: patonlab48@ukr.net

²Université Paris-Saclay, CNRS, Institut de chimie moléculaire et des matériaux d'Orsay, 91405, Orsay, France

The paper considers the regularities of phase-structural transformations in welded joints of low-alloy steel S420NL in as-welded, after high-frequency mechanical peening and accumulation of fatigue damage. Welded joints were obtained by mechanized metal arc welding in a carbon dioxide environment with flux-cored wire Filarc PZ 6114 S. The grain, subgrain and dislocation structure of welded joints was studied by light and transmission electron microscopy (TEM). Experimental data were obtained as to the influence of the structure on the change of values of impact toughness (*KCV*) and brittle fracture resistance (*K_q*) of untreated welded joints after fatigue damage accumulation. The efficiency of increasing their fatigue resistance due to the use of high-frequency mechanical peening is shown. 13 Ref., 1 Tabl., 5 Fig.

Keywords: low-alloy steel, arc welding, welded joints, structure, high-frequency mechanical peening, fatigue damage, brittle fracture

Отримано 29.01.2025

Отримано у переглянутому вигляді 04.03.2025

Прийнято 22.04.2025