

ВПЛИВ ВИСОКОЧАСТОТНОЇ ПРОКОВКИ ТА АТМОСФЕРИ ПОМІРНОГО КЛІМАТУ НА ЦИКЛІЧНУ ДОВГОВІЧНІСТЬ ТАВРОВИХ ЗВАРНИХ З'ЄДНАНЬ З ПОВЕРХНЕВИМИ ВТОМНИМИ ТРІЩИНАМИ

В.В. Книш, С.О. Соловей, Л.І. Ниркова, А.О. Гришанов, В.П. Кузьменко

ІЕЗ ім. С.О. Патона НАН України. 03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

Приведено результати досліджень ефективності застосування технології високочастотної механічної проковки для збільшення залишкової довговічності таврових зварних з'єднань сталі 15ХСНД з поверхневими втомними тріщинами та корозійними пошкодженнями, характерними конструкціям після тривалої експлуатації в умовах помірного клімату центральних областей України. Корозійні пошкодження на поверхні з'єднань отримували експонуванням у гідростаті Г4 при підвищеній температурі та відносній вологості протягом 1200 год. Експериментально встановлено, що зміцнення технологією високочастотної механічної проковки таврових зварних з'єднань з поверхневими тріщинами втоми довжиною до 10 мм та характерними корозійними пошкодженнями збільшує їх залишкову циклічну довговічність до 10 разів. Показано, що застосування технології високочастотної механічної проковки до зварних з'єднань, які містять тріщини втоми довжиною 20 мм і більше, не призводить до підвищення циклічної довговічності і є неефективним. Бібліогр. 10, табл. 2, рис. 5.

Ключові слова: таврове зварне з'єднання, корозійне середовище, втома, прискорені корозійні випробування, високочастотна механічна проковка, підвищення циклічної довговічності

Для підвищення характеристик опору втоми зварних з'єднань металоконструкцій тривалого строку служби (мости, шляхопроводи, морські платформи та ін.) як у вихідному стані, так і при ремонтно-відновлювальних роботах, широко застосовуються способи поверхневого пластичного деформування (ППД) металу, в тому числі технологія високочастотної механічної проковки (ВМП) [1–4]. Експериментальними дослідженнями встановлена висока ефективність застосування технології ВМП зварних з'єднань не тільки з накопиченими втомними пошкодженнями, але і з корозійними пошкодженнями внаслідок тривалого впливу кліматичних факторів зовнішнього середовища [5]. З аналізу літературних даних [6–10] відомо, що застосування методів ППД сприяє підвищенню циклічної довговічності елементів конструкцій навіть з втомними тріщинами. Показано, що ефективність методів ППД залежить від виду зміцнюючої обробки та глибини тріщини. Наприклад, після застосування обробки пневмомолотом залишкова циклічна довговічність таврових зварних з'єднань з поверхневими втомними тріщинами глибиною 1,0...1,5 мм збільшується у 10 разів, з поверхневими втомними тріщинами глибиною біля 3,0 мм – у 1,1...1,25 разів, а з поверхневи-

ми втомними тріщинами глибиною більш 5,0 мм – циклічна довговічність не збільшується [8]. При зміцненні технологією ВМП таврових зварних з'єднань з поверхневими втомними тріщинами глибиною до 1,0 мм залишкова довговічність збільшується у 10 разів, з поверхневими втомними тріщинами глибиною 2,0 мм – у 5 разів, а з поверхневими втомними тріщинами глибиною біля 4,5 мм – циклічна довговічність не збільшується [10]. Проте, на даний час відсутні дані щодо ефективності застосування технології ВМП до зварних з'єднань металоконструкцій, які експлуатуються в умовах впливу кліматичних факторів зовнішнього середовища та містять поверхневі втомні тріщини незначної глибини.

Мета даної роботи – дослідити залишкову циклічну довговічність таврових зварних з'єднань з поверхневими тріщинами втоми та корозійними пошкодженнями, характерними зварним металоконструкціям після тривалої експлуатації в умовах помірного клімату центральних областей України, після їх зміцнення технологією ВМП.

Матеріал і методика досліджень. Експериментальні дослідження проводили на зразках таврових зварних з'єднань низьколегованої сталі 15ХСНД ($\sigma_T = 400$ МПа, $\sigma_B = 565$ МПа), яка ши-

В.В. Книш – <http://orcid.org/0000-0003-1289-4462>; С.О. Соловей – <http://orcid.org/0000-0002-1126-5536>;
Л.І. Ниркова – <http://orcid.org/0000-0003-3917-9063>; А.О. Гришанов – <http://orcid.org/0000-0003-1044-2374>;
В.П. Кузьменко – <http://orcid.org/0000-0002-9395-7455>

© В.В. Книш, С.О. Соловей, Л.І. Ниркова, А.О. Гришанов, В.П. Кузьменко, 2020

роко застосовується для виготовлення елементів металоконструкцій тривалої експлуатації (наприклад, в прогонових будовах залізничних і автомобільних мостів), має підвищену міцність, добре зварюється, стійка в атмосферних умовах і працездатна в діапазоні температур від -70 до 45 °С.

Заготовки під зразки зварних з'єднань вирізали з гарячекатаного листового прокату товщиною 12 мм 12 категорії в напрямку прокату. Таврові зварні з'єднання отримували шляхом приварки ручним дуговим зварюванням електродами марки УОНИ 13/55 поперечних ребер жорсткості (також зі сталі 15ХСНД) до заготовок розмірами 350×70 мм з двох сторін кутовими швами. Корінь (перший шов) виконували електродами діаметром 3 мм, другий шов формували електродами діаметром 4 мм. Форма і геометричні розміри зразків таврових зварних з'єднань наведено на рис. 1. Товщина зразка обумовлена широким застосуванням в інженерних зварних металоконструкціях прокату товщиною 12 мм, а ширину робочої частини 50 мм вибирали виходячи з потужності випробувального устаткування.

Всі дослідження на втому проводили на випробувальній сервогідравлічній машині УРС-20 при віднульовому змінному розтягуванні з асиметрією циклу $R_\sigma = 0$ і частотою 5 Гц при регулярному навантаженні. На першому етапі проводили втомні випробування при максимальних значеннях прикладених напружень циклу 180 МПа з метою ініціювання та розвитку на поверхні зразків втомних тріщин незначних розмірів. Даний рівень прикладених максимальних напружень близький до границі обмеженої витривалості даних з'єднань на базі

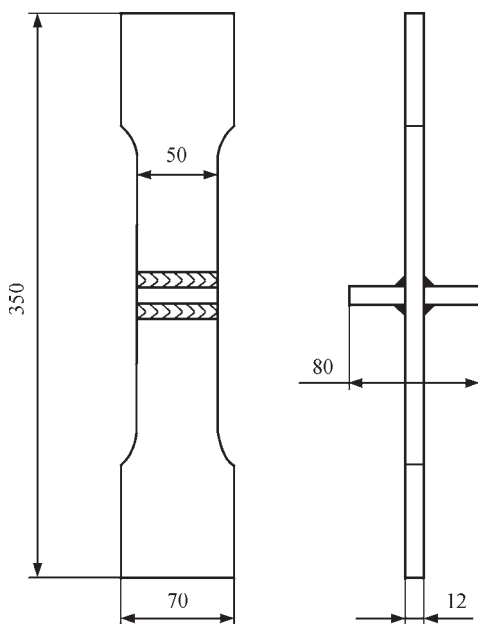


Рис. 1. Форма та геометричні розміри зразків таврового зварного з'єднання

$2 \cdot 10^6$ циклів змін напружень. Для уникнення складнощів, пов'язаних з достовірним визначенням глибини втомної тріщини під час досліджень, у якості критерію завершення втомних випробувань було вибрано досягнення тріщиною на поверхні зразка заданого розміру від 5 до 30 мм. Під час даних випробувань зразки в зоні зварного шва змащували індикаторною рідиною, що складалася з гасу та тонеру. Після утворення на поверхні зразка тріщини заданої довжини (всі тріщини утворювалися по лінії переходу металу шва на основний метал) залишки індикаторної рідини видаляли продуванням стиснутим повітрям. Індикаторну рідину при подальших випробуваннях зразків більш не застосовували, що дало змогу визначити чіткий фронт початкової тріщини на зламах зварних з'єднань. Після розвитку тріщин на поверхні зразків до заданого розміру проводили прискорені корозійні випробування в умовах, які моделюють вплив атмосфери помірного клімату центральних областей України, згідно методики [5]. Тобто зразки зварних з'єднань експонували в гідростаті Г4 при температурі 40 °С і відносній вологості повітря 100 % протягом 1200 год. Таким чином, внаслідок попередніх втомних та прискорених корозійних випробувань дослідні зразки мали пошкодження, характерні пошкодженням зварних з'єднань металоконструкцій після довготривалої експлуатації при змінному навантаженні в умовах помірного клімату.

При підготовці зразків з поверхневими втомними тріщинами та корозійними пошкодженнями для випробувань на втому їх захватні частини повторно зачищали від корозійних пошкоджень. Зачистку зони шва від продуктів корозії до металевго блиску не проводили. Одну частину зразків залишали у незміцненому стані, а другу зміцнювали технологією ВМП. Зміцнення зварних з'єднань технологією ВМП виконували обладнанням USTREAT-1.0, в якому ручний компактний ударний інструмент з п'єзокерамічним перетворювачем з'єднаний з ультразвуковим генератором вихідною потужністю 500 Вт. При обробці зварних з'єднань технологією ВМП поверхневу пластичному деформуванню піддавали не тільки лінію сплавлення, яка містила тріщину втомі, а всі чотири лінії переходу металу шва на основний метал таврового з'єднання. У якості пристрою для зміцнення використовували однорядну чотирьохбойкову насадку з діаметром бойків 3 мм. Зміцнення проводили без попереднього очищення поверхні від продуктів корозії.

Таким чином, випробування на втому проводили на двох серіях зразків:

- зразки таврових зварних з'єднань з поверхневими втомними тріщинами довжиною 5...30 мм і корозійними пошкодженнями (перша серія);
- зразки таврових зварних з'єднань з поверхневими втомними тріщинами довжиною 5...30 мм і корозійними пошкодженнями, які зміцнювали технологією ВМП (друга серія).

Експериментальні дослідження залишкової довговічності даних зварних з'єднань проводили до повного руйнування зразків або перевищення бази випробувань $2 \cdot 10^6$ циклів змін напружень.

Результати випробувань. Результати втомних випробувань таврових зварних з'єднань сталі 15ХСНД з тріщинами втоми без зміцнення ВМП (перша серія) наведено в табл. 1 та на рис. 2. На рис. 2 також наведено дані таврових зварних з'єднань після напрацювання $2 \cdot 10^6$ циклів при прикладених максимальних напруженнях 150 МПа (без утворення тріщин втоми), корозійних випробувань у гідростаті Г4 протягом 1200 год без та

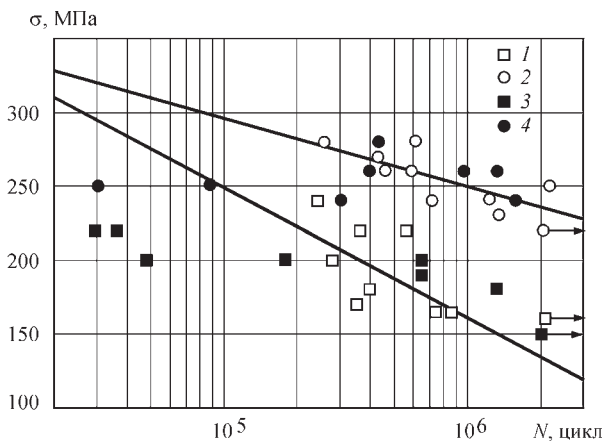


Рис. 2. Криві втоми таврових зварних з'єднань сталі 15ХСНД: 1 – після напрацювання 2 млн циклів та витримки у камері Г4 протягом 1200 год. [5]; 2 – після напрацювання 2 млн циклів, витримки у камері Г4 протягом 1200 год. та послідуєчого зміцнення технологією ВМП [5]; 3 – після напрацювання до утворення поверхневих тріщин втоми та витримки у камері Г4 протягом 1200 год.; 4 – після напрацювання до утворення поверхневих тріщин втоми, витримки у камері Г4 протягом 1200 год. та послідуєчого зміцнення технологією ВМП

Таблиця 1. Циклічна довговічність таврових зварних з'єднань з корозійними пошкодженнями та поверхневими тріщинами втоми

Номер зразка	$l_{тр}$, мм	$N_{тр}$, цикли	$\sigma_{max}^{незміц}$, МПа	$N_{тр}^{незміц}$, цикли	Результат
2272	7	1531300	150	2000000	Не зруйнувався
2277	10	1164000	180	1327500	Руйнування по лінії сплавлення
2279	10	826700	190	647600	–"
2278	12	811800	200	177800	–"
2275	15	1137800	220	35900	–"
2273	7	1735700	200	656300	–"
2274	25	853100	220	29500	–"
2276	20	1626800	200	48400	–"

Примітка. $l_{тр}$ – довжина тріщини до корозійних випробувань, встановлена за методом газової проби; $N_{тр}$ – циклічна довговічність до зародження тріщини заданої довжини при максимальних прикладених напруженнях 180 МПа; $\sigma_{max}^{незміц}$ – максимальні напруження циклу, які прикладалися до зразка з тріщиною після корозійних випробувань у камері Г4 протягом 1200 год; $N_{тр}^{незміц}$ – залишкова циклічна довговічність зразка з тріщиною втоми заданої довжини та корозійними пошкодженнями.

з послідуєчим зміцненням технологією ВМП, отримані у роботі [5].

Залишкова циклічна довговічність таврових зварних з'єднань сталі 15ХСНД з поверхневими тріщинами довжиною до 10 мм після корозійних випробувань при підвищених температурі та відносній вологості протягом 1200 год знаходиться на рівні залишкової довговічності зварних з'єднань, які піддавали циклічним навантаженням $2 \cdot 10^6$ циклів при максимальних напруженнях 150 МПа (без утворення тріщин) та корозійним випробуванням. Зі збільшенням довжини початкової тріщини залишкова довговічність з'єднань знижується (див. табл. 1, рис. 2). Оскільки зразок 2272 не зруйнувався до $2 \cdot 10^6$ циклів змін напружень, то з метою встановлення розмірів (глибини та довжини) початкової тріщини зразка проводили його руйнування при циклічному навантаженні з підвищеними до 280 МПа рівнями максимальних прикладених напружень. Злами зразків таврових з'єднань з поверхневими тріщинами та корозійними пошкодженнями наведено на рис. 3. Як видно, запропонована методика дозволяє чітко визначити на зламах геометричні розміри початкової тріщини після руйнування зразків. Проте, встановлена довжина початкових втомних тріщин на поверхні виявилася на 2...3 мм довшою ніж при визначенні безпосередньо під час циклічного навантаження. Не дивлячись на те, що всі тріщини втоми зароджувалися по зоні сплавлення в центрі зразка, коефіцієнт стискання поверхневої тріщини (відношення глибини тріщини до напівдовжини) в них різний. Вважаємо, що це пов'язано з розвитком тріщин в різних полях залишкових зварювальних напружень, обумовлених порядком виконання кутових швів.

Результати втомних випробувань таврових зварних з'єднань сталі 15ХСНД після утворення поверхневих тріщин втоми, корозійних випробувань у гідростаті Г4 протягом 1200 год та з послідуєчого зміцненням технологією ВМП (дру-

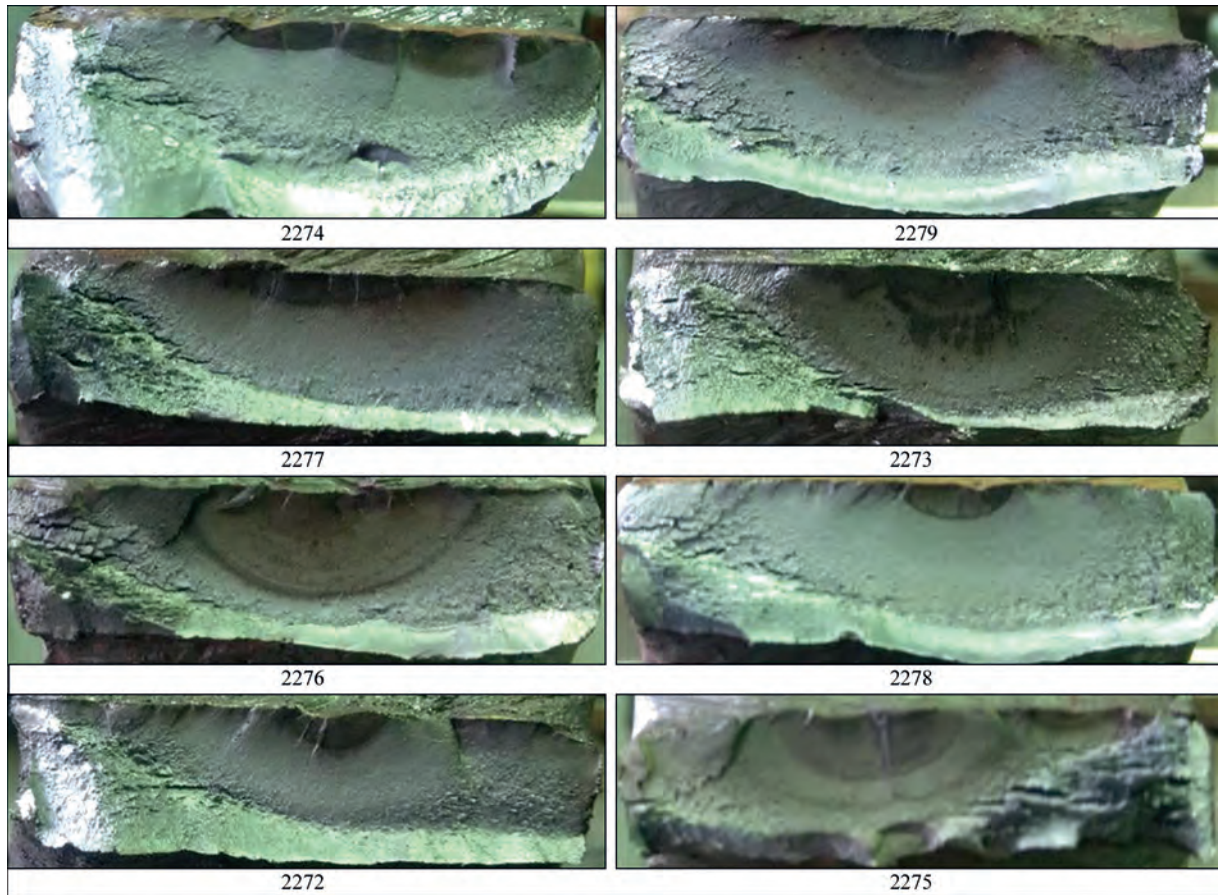


Рис. 3. Втомні злами зразків таврових зварних з'єднань сталі 15XCHND з поверхневими тріщинами втоми, які не зміцнювали ВМП після витримки у камері Г4 на протязі 1200 год. (див. табл. 1.)

га серія) приведені у табл. 2 та рис. 2. Отримані експериментальні дані вказують на те, що ефективність застосування технології ВМП до зразків другої серії фактично визначається геометричними розмірами тріщини втоми, яка утворилася до обробки. Так, зміцнення за технологією ВМП таврових зварних з'єднань з поверхневими тріщинами втоми довжиною до 10 мм збільшує їх циклічну довговічність до 10 разів. Розкид експе-

риментальних даних таких з'єднань знаходиться в межах розкиду з'єднань без тріщин втоми, зміцнених ВМП при заданому рівні втомно-корозійних пошкоджень (напрацювання $2 \cdot 10^6$ циклів змін напружень + камера Г4 протягом 1200 год). Застосування технології ВМП до зварних з'єднань, які містять тріщини втоми довжиною 20 мм і більше, не призводить до підвищення циклічної довговічності і є неефективним (табл. 2). Три зразки

Таблиця 2. Циклічна довговічність таврових зварних з'єднань з корозійними пошкодженнями та поверхневими тріщинами втоми після їх зміцнення технологією ВМП

Номер зразка	$l_{тр}$, мм	$N_{тр}$, цикли	$\sigma_{max}^{зміц}$, МПа	$N_{тр}^{зміц}$, цикли	Результат
2155	5	432200	260	1335200	Руйнування по основному металу на відстані 25 мм від шва
2156	5	292900	260	972700	Руйнування по основному металу на відстані 40 мм від шва
2175	10 + 10*	960700	280	434200	Руйнування по лінії сплавлення
2180	10 + 8 + 6*	401800	260	396000	-?-
2177	20	1138000	250	30700	-?-
2178	5	261100	240	1588100	Руйнування по основному металу в захватній частині зразка
2179	10	643500	240	306400	Руйнування по лінії сплавлення
2176	30	463900	250	88000	-?-

Примітка: де $l_{тр}$ – довжина тріщини до корозійних випробувань, встановлена за методом газової проби; $N_{тр}$ – циклічна довговічність до зародження тріщини заданої довжини; $\sigma_{max}^{зміц}$ – максимальні напруження циклу, які прикладалися до зразка з тріщиною після корозійних випробувань у камері Г4 протягом 1200 год. та зміцнення за технологією ВМП; $N_{тр}^{зміц}$ – залишкова циклічна довговічність зразка з тріщиною заданої довжини та корозійними пошкодженнями після зміцнення технологією ВМП; * – зразки, які мали кілька окремих поверхневих тріщин вздовж однієї лінії сплавлення.

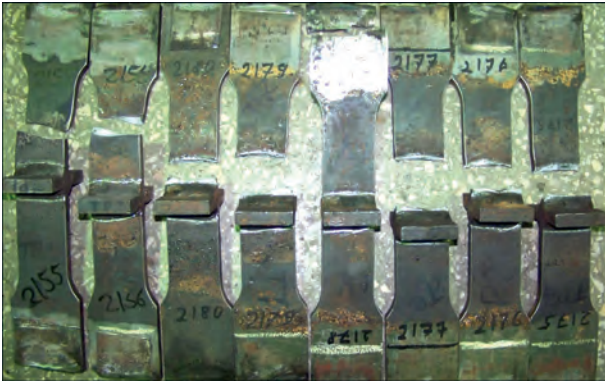


Рис. 4. Випробувані на втому зразки таврових зварних з'єднань сталі 15ХСНД з поверхневими втомними тріщинами, які зміцнювали ВМП після витримки у камері Г4 на протязі 1200 год.

(2155, 2156 та 2178), які містили тріщини втоми довжиною 5 мм, після зміцнення ВМП зруйнувалися віддалік від зварного шва по основному металу (рис. 4). Зародження тріщин в зразках 2155 та 2156 відбулось від каверн у поверхневому гарячекатаному шарі металу, а в зразку 2178 – від насічки на захватній частині зразка, що утворюється під час його затискання у випробувальній машині (рис. 5). Інші зразки руйнувалися по лінії сплавлення від тріщин втоми, які піддавалися зміцненню (див. рис. 4 та рис. 5).

Таким чином, встановлена висока ефективність застосування технології ВМП для підвищення циклічної довговічності таврових зварних з'єднань

металоконструкцій, які внаслідок тривалої експлуатації в умовах помірного клімату центральних областей України містять поверхневі тріщини втоми довжиною до 10 мм та характерні корозійні пошкодження.

Висновки

1. Експериментально досліджено залишкову довговічність таврових зварних з'єднань сталі 15ХСНД з поверхневими тріщинами втоми та корозійними пошкодженнями, характерними металоконструкціям після тривалої експлуатації в умовах помірного клімату центральних областей України. Тривалий вплив атмосфери помірного клімату моделювали експонуванням з'єднань в гідростаті Г4 при температурі 40 °С і відносній вологості повітря 100 % протягом 1200 год. Підтверджено, що зі збільшенням довжини початкової тріщини залишкова довговічність з'єднань знижується.

2. Встановлено, що зміцнення технологією ВМП таврових зварних з'єднань з поверхневими тріщинами втоми довжиною до 10 мм та корозійними пошкодженнями, характерними металоконструкціям після тривалої експлуатації в умовах помірного клімату центральних областей України, збільшує їх залишкову циклічну довговічність до 10 разів. При цьому значення залишкової довговічності знаходяться в межах розкиду експери-

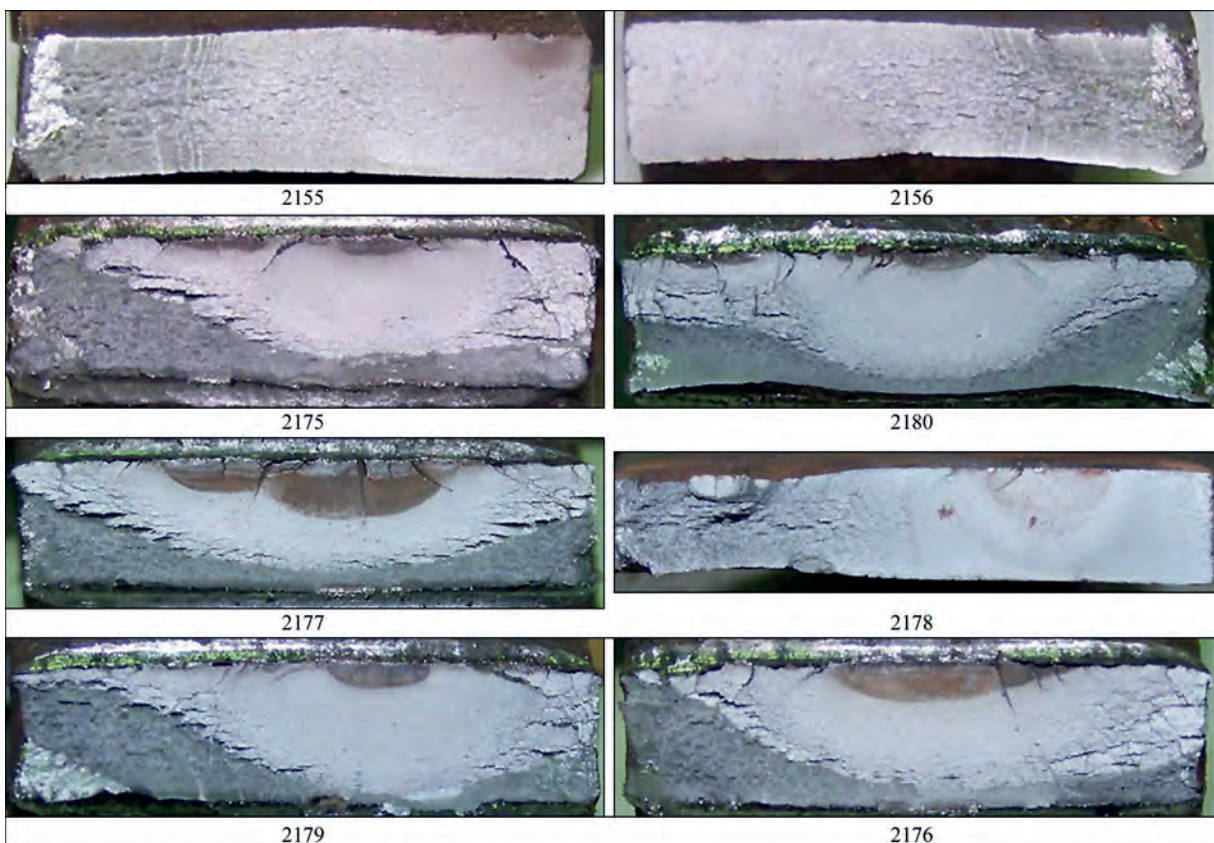


Рис. 5. Втомні злами зразків таврових зварних з'єднань сталі 15ХСНД з поверхневими тріщинами втоми, які зміцнювали ВМП після витримки у камері Г4 на протязі 1200 год. (див. табл. 2)

ментальних значень з'єднань без тріщин втоми, зміцнених технологією ВМП при заданому рівні накопичених втомних і корозійних пошкоджень (напрацювання $2 \cdot 10^6$ циклів змін напружень при максимальних напруженнях 150 МПа та експонування у гідростаті Г4 протягом 1200 год). Показано, що застосування технології ВМП до зварних з'єднань, які містять тріщини втоми довжиною 20 мм і більше, не призводить до підвищення циклічної довговічності і є неефективним.

Список літератури / References

1. Kudryavtsev Y., Kleiman J., Lugovskoy A. et al. (2007) Rehabilitation and repair of welded elements and structures by ultrasonic peening. *Welding in the World*, **51**, 7-8, 47–53.
2. Vilhauer B., Bennett C.R., Matamoros A.B., Rolfe S.T. (2012) Fatigue behavior of welded coverplates treated with ultrasonic impact treatment and bolting. *Engineering Structures*, **34**, **1**, 163–172.
3. Abston S. (2010) The technology and applications of ultrasonic impact technology. *Australasian Welding Journal*, **55**, 20–21.
4. Kuhlmann U., Dürr A., Günther P. et al. (2005) Verlängerung der lebensdauer von schweißkonstruktion aus höher festen baustählen durch Anwendung der UIT-technologie. *Schweißen und Schneiden*, **57**, **8**, 384–391.
5. Книш В.В., Осадчук С.О., Соловей С.О. та ін. (2019) Методика прискорених корозійних випробувань для моделювання тривалого впливу атмосфери помірного клімату на зварні з'єднання. *Автоматическая сварка*, **11**, 52–58.
6. Knysh, V.V., Osadchuk, S.O., Solovei, S.O. et al. (2019) Procedure of accelerated corrosion testing for modeling the long-term effect of moderate climate atmosphere on welded joints. *The Paton Welding J.*, **11**, 44-48.
7. Turnbull A., Rios E.R., Tait R.B. et al. (1998) Improving the fatigue crack resistance of waspaloy by shot peening. *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, **21**, 1513–1524.
8. Branko C.M., Infante V., Bartista R. (2004) Fatigue behaviour of the welded joints with cracks, repaired by hammer peening. *Fatigue Fract. Engng. Mater. Struct.*, **27**, 785–798.
9. Farrahi G.H., Majzooobi G.H., Hosseinzadeh F., Harati S.M. (2006) Experimental evaluation of the effect of residual stress field on crack growth behaviour in C(T) specimen. *Eng. Fract. Mech.*, **73**, 1772–1782.
10. Кныш В.В., Соловей С.А., Кузьменко А.З. (2009) Повышение циклической долговечности сварных тавровых соединений с поверхностными трещинами. *Автоматическая сварка*, **1**, 38–43.

Knysh, V.V., Kuzmenko, A.Z, Solovej, A.S. (2009) Increase of cyclic fatigue life of tee welded joints with surface cracks. *The Paton Welding J.*, **1**, 29-33.

IMPACT OF HIGH-FREQUENCY PEENING AND MODERATE CLIMATE ATMOSPHERE ON CYCLIC FATIGUE LIFE OF TEE WELDED JOINTS WITH SURFACE FATIGUE CRACKS

V.V. Knysh, S.O. Solovej, L.I. Nyrkova, A.O. Grishanov, V.P. Kuzmenko

E.O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine, 11 Kazymyr Malevych Str., 03150, Kyiv, Ukraine.
E-mail: office@paton.kiev.ua

The paper presents the results of investigations of the effectiveness of application of the technology of high-frequency mechanical peening to improve the residual fatigue life of tee welded joints of 15KhSND steel with surface fatigue cracks and corrosion damage characteristic for structures after long-term service under the conditions of moderate climate of the central regions of Ukraine. Corrosion damage on the surface of joints was obtained by exposure in G4 hydrostat at higher temperature and relative humidity of air for 1200 h. It is experimentally established that strengthening by the technology of high-frequency mechanical peening of tee welded joints with surface fatigue cracks of up to 10 mm length and characteristic fatigue damage increases their cyclic fatigue life by up to 10 times. It is shown that application of the technology of high-frequency mechanical peening of welded joints, which contain fatigue cracks of 20 mm and greater length, does not lead to improvement of cyclic fatigue life and is not effective. 10 Ref., Tabl. 2, Fig. 5.

Keywords: tee welded joint, corrosive environment, fatigue, accelerated corrosion testing, high-frequency mechanical peening, improvement of cyclic fatigue life

Надійшла до редакції 06.11.2019

Cutting World 2020
Ярмарка профессиональных технологий резки

С 28 по 30 апреля 2020 г. Cutting World будет открыта в Messe Essen. Это единственная выставка, которая концентрируется на всей технологической цепочке на тему резки. Многочисленные экспоненты уже воспользовались возможностью, чтобы обеспечить зоны стендов в новом зале 8. В их число входят следующие компании: Assfalg, Boschert, Cam Concept, Eckelmann, Kjellberg, MGM, ProCom and Rosenberger, Air Liquide Deutschland, BKE, IHT Automation, NUM, STM Waterjet and Yamazaki Mazak. Заинтересованные участники могут найти регистрационные документы на www.cuttingworld.de. Крайний срок регистрации 30 ноября 2019 г.

В 2020 г. Cutting World впервые пройдет в модернизированном зале 8 в Messe Essen. Экспоненты и посетители попадут в зал через новое, залитое светом стеклянное фойе. Восточный конгресс-центр расположен в непосредственной близости и будет принимать Немецкий конгресс по резке и Немецкую конференцию по газопламенной резке. Кроме того, участники Cutting World получат выгоду от благоприятного для инвестиций климата, потому что рынок режущих установок находится в состоянии постоянного изменения. Почти половине существующих металлорежущих станков уже более семи лет, и в этом секторе все больше требуются современные процедуры создания сетей и взаимосвязи последующих и начальных процессов обработки. Благодаря технологиям Industry 4.0 эксперты ожидают дополнительный потенциал получения прибыли в диапазоне миллиардов Еуро для машиностроения в Германии в ближайшие годы.

