

ВТОМНА ДОВГОВІЧНІСТЬ ЗРАЗКІВ ПІСЛЯ ЗНОСОСТІЙКОГО ВИГОТІВНОГО ТА РЕМОНТНОГО НАПЛАВЛЕННЯ

І.О. Рябцев¹, В.В. Книш¹, А.А. Бабінець¹, С.О. Соловей¹, В.М. Демєнков²

¹ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України. 03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua
²Державне підприємство «Державний науково-технічний центр з ядерної та радіаційної безпеки». 03142, м. Київ, вул. Василя Стуса, 35-37. E-mail: vm_demenkov@sstc.com.ua

Досліджено циклічну довговічність зразків, наплавлених порошковим дротом ПП-Нп-25Х5ФМС, що забезпечує одержання наплавленого металу типу інструментальної полутеплостійкої сталі. Конструкція наплавлених зразків і методика їх випробувань імітували умови експлуатації прокатних валків, для наплавлення яких широко використовується порошковий дріт ПП-Нп-25Х5ФМС. Оцінювали циклічну довговічність зразків безпосередньо після наплавлення, а також ефективність використання ремонтного наплавлення для збільшення залишкової циклічної довговічності зразків, які в процесі попередніх випробувань мали в наплавленому зносостійкому шарі втомні тріщини. Чисельним методом проводили визначення напружено-деформованого стану та розрахунок коефіцієнта інтенсивності напружень по фронту ненаскрізної кутової втомної тріщини, що розвивалася в зразку сталі 40Х з зносостійким наплавленим шаром, при трьохточковому віднольовому циклічному навантаженні. Показано, що максимальні значення коефіцієнта інтенсивності напружень по фронту тріщини знаходяться на відстані близько 1 мм від вертикальної бокової грані в найближшій точці фронту тріщини і під час руйнування досягають величини $52 \dots 64 \text{ МПа} \sqrt{\text{м}}$. У процесі досліджень встановлено, що застосування ремонтного наплавлення до виробів з втомними тріщинами після їх тривалої експлуатації не призводить до суттєвого збільшення циклічної довговічності після ремонту. Це пов'язано з тим, що після тривалої експлуатації бездефектний шар наплавленого металу має значний рівень накопичених втомних пошкоджень, тому виконання ремонту ділянки виробу, пошкодженої тріщиною втоми, без повного видалення наплавленого шару металу неефективно. Отримані в даній роботі результати будуть використані в подальшому в якості базових при проведенні порівняльної оцінки впливу техніки та технології наплавлення, а також наплавочних матеріалів, на втомну довговічність зразків. Бібліогр. 17, табл. 3, рис. 9.

Ключові слова: дугове наплавлення, виготівне наплавлення, ремонтне наплавлення, втома, втомна довговічність, тріщини втоми, коефіцієнт інтенсивності напружень

У металургії та машинобудуванні широко застосовуються інструменти й оснащення для гарячого деформування металів і сплавів, які в процесі експлуатації зазнають впливу циклічних механічних і термічних навантажень. Прикладами таких важко-навантажених деталей можуть служити різні прокатні валки, ролики МНЛЗ та ін. При цьому проблема оцінки втомної довговічності подібних деталей стає особливо гострою, коли потрібно оцінювати відновлені різними методами деталі, в тому числі і методами електродугового наплавлення [1–5].

Такі деталі вже пройшли певний період експлуатації й вичерпали частину свого ресурсу, закладеного при їх конструюванні та виготовленні. В результаті наступних ремонтів методами наплавлення, через нерівномірний розподіл температури по перетину деталі, в ній часто формуються несприятливі залишкові напруження розтягу [6–8]. Крім того, чим більша кількість ремонтів і, відповідно, кількість наплавлених шарів, тим більша ймовірність появи в наплавленому металі дефектів у вигляді несплавлень, зашлаковок, пор і т. п. [4–10].

Найнебезпечнішими ділянками прокатних валків, у яких можуть з'явитися тріщини, є цен-

тральні області, зміщені від осі валка убік змінних сумарних напружень, що мають ненульову амплітуду [5]. Також до підвищення ймовірності утворення тріщин і збільшення швидкості їх росту призводить зниження коефіцієнта асиметрії циклу та значний розмах коефіцієнта інтенсивності напружень (КІН) у зоні крайового ефекту [5].

У процесі експлуатації всі ці фактори несприятливо позначаються на загальній втомній довговічності, що може призвести до появи і розвитку тріщин механічної втоми та, як наслідок, до аварійного руйнування деталей.

Таким чином, при розробці технології ремонтного наплавлення таких деталей необхідно ретельно оцінювати вплив попереднього напруження, хімічного складу й властивостей наплавочних матеріалів, а також технологічних параметрів процесу дугового наплавлення на залишковий ресурс експлуатації відновленої деталі.

Мета роботи – встановлення втомної довговічності наплавлених зразків після виготівного і ремонтного наплавлення, а також оцінка впливу розробленої технології ремонтного наплавлення на загальну довговічність деталі.

Рябцев І.О. – <https://orcid.org/0000-0001-7180-7782>, Книш В.В. – <https://orcid.org/0000-0003-1289-4462>
 Бабінець А.А. – <https://orcid.org/0000-0003-4432-8879>, Соловей С.О. – <https://orcid.org/0000-0002-1126-5536>
 Демєнков В.М. – <https://orcid.org/0000-0002-2000-0783>
 © І.О. Рябцев, В.В. Книш, А.А. Бабінець, С.О. Соловей, В.М. Демєнков, 2020

Таблиця 1. Хімічний склад основного й наплавленого металів, мас. % [11]

| Марка сталі | C | Mn | Si | Cr | V | Mo | S | P |
|----------------|-------------|-----------|-------------|-----------|-----------|-----------|--------|--------|
| 40X | 0,36...0,40 | 0,5...0,8 | 0,17...0,37 | 0,8...1,1 | - | - | ≤0,035 | ≤0,035 |
| ПП-Нп-25X5ФМС* | 0,20...0,32 | 0,5...1,0 | 0,80...1,30 | 4,6...5,8 | 0,2...0,6 | 0,9...1,5 | ≤0,04 | ≤0,04 |
| 4X5МФС** | 0,32...0,40 | 0,2...0,5 | 0,90...1,20 | 4,5...5,5 | 0,3...0,5 | 1,2...1,5 | ≤0,04 | ≤0,04 |

Таблиця 2. Механічні властивості основного й наплавленого металів [11]

| Марка сталі | Механічні властивості (після нормалізації) | | | | | |
|-------------|--|--------------------------------|--|--|---|--------------|
| | Умовна межа текучості $\sigma_{0,2}$, МПа | Межа міцності σ_b , МПа | Відносне подовження після розриву δ , % | Відносне звуження після розриву ψ , % | Ударна в'язкість KCU , Дж/см ² , для зразків при $t = 20$ °C | Твердість |
| 40X | 345 | 590 | 12,5 | 52 | 7,5 | HB 174...217 |
| 4X5МФС** | 1570 | 1710 | 12 | 54 | 51 | HRC 48...50 |

Примітки до табл. 1 та 2:

* дана масова частка елементів у наплавленому металі.

** у літературі відсутні дані по механічних властивостях металу, наплавленого дротом ПП-Нп-25X5ФМС. Тому наведені дані для його аналогу, найбільш близького по хімічному складу й властивостям – сталі 4X5МФС.

Матеріали та методики досліджень. При виборі типу основного й наплавленого металу виходили з аналізу даних технічної літератури: у якості основного металу в прокатних валках звичайно використовують середньо- і високовуглецеві нелеговані або низьколеговані конструкційні сталі таких марок, як 45, 50, 40X, 50X, 50ХН та ін. Для наплавлення робочого зносостійкого шару прокатних валків і інших подібних деталей, найчастіше застосовують електродні матеріали, що забезпечують одержання наплавленого шару типу теплостійких або напівтеплостійких сталей. До таких матеріалів можна віднести порошкові дроти марок ПП-Нп-25X5ФМС, ПП-Нп-35В9Х3СФ, ПП-Нп-30Х4В2М2ФС і т. д. [1, 3, 5].

Виходячи із цих даних, у роботі для досліджень в якості основного металу була обрана сталь 40X. Для наплавлення робочого шару використовували порошковий дріт ПП-Нп-25X5ФМС, що широко використовується при наплавленні прокатних валків [8]. Хімічний склад і механічні властивості матеріалів, використаних у роботі, наведено в табл. 1 та 2.

На даний час не існує єдиної стандартизованої методики для втомних випробувань багатшарових наплавлених зразків з метою встановлення їх циклічної довговічності. Більшість дослідників використовують власні розроблені методики, які найкраще імітують форму і особливості конкретних деталей [6, 10, 12, 13]. Враховуючи велике різноманіття деталей, що експлуатуються в умовах втомного навантаження, такий підхід дає більш достовірні результати. Проте вищезгадані методики не дозволяють оцінити вплив наплавочних матеріалів і геометричних розмірів наплавлених зразків на їхню втомну довговічність. Авторами [14, 15] було запропоновано методику, яка дозволяє виправити ці недоліки і може успішно застосовуватися для порівняльної оцінки втомної довговічності наплавлених деталей, наочно де-

монструючи вплив хімічного складу наплавочних матеріалів, конструкції наплавлених шарів і схеми наплавлення на циклічну довговічність зразків.

Форма і розміри наплавлених зразків для втомних випробувань, технологія їх виготовлення, а також сама методика випробувань були обрані виходячи з розрахунків, рекомендацій і результатів попередніх випробувань, які наведені в роботах [14, 15]. Випробування за даною методикою з певним допущенням відтворюють силові навантаження, характерні для прокатних валків, і дозволяють у процесі випробувань проводити візуальну оцінку швидкості поширення втомної тріщини.

Враховуючи те, що авторами даної роботи заплановано проведення комплексних досліджень втомної довговічності деталей, наплавлених за різними технологіями, із використанням різних матеріалів основного та проміжного шарів, тому для проведення порівняльної оцінки втомної довговічності зразків після виготовного і ремонтного наплавлення використовували розроблену методику [14, 15] з описаними нижче вдосконаленнями.

За технологією наплавлення, описаною у роботах [14, 15], виготовляли 3 серії зразків по 3 зразки у кожній серії.

Першу серію зразків випробовували на втому до їх повного руйнування. Дослідження на втому проводили на випробувальній сервогідравлічній машині УРС-20 при трьохточковому згинанні з асиметрією циклу $R_\sigma = 0$ і частотою 5 Гц при регулярному навантаженні. Максимальні напруження циклу становили 500 МПа, а відстань між опорами 250 мм.

На другій серії зразків оцінювали циклічну тріщиностійкість. Для ініціювання розвитку втомної тріщини в наплавленому металі по центру зразка (в зоні дії максимальних прикладених напружень) виконували V-подібний надріз глибиною 1,0...1,5 мм із радіусом 0,25 мм. Після цього при трьохточковому циклічному згинанні з макси-

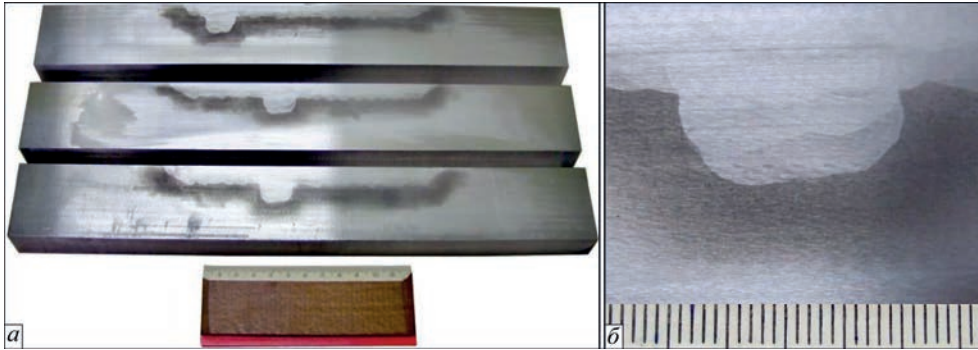


Рис. 3. Зовнішній вигляд зразків після шліфування (а) та зона ремонтного наплавлення (б)

лення зносостійкого шару порошковим дротом ПП-Нп-25Х5ФМС діаметром 1,8 мм під флюсом АН-26П.

Режим наплавлення для всіх зразків був однаковим: $I = 220...250$ А; $U = 26...28$ В; $v = 18$ м/год.; перекриття валиків ≈ 50 %. Після наплавлення зразки поміщали в прогріту до 250 °С термічну піч для повільного охолодження разом з нею. Такі заходи були направлені на зниження залишкових напружень в наплавлених зразках та ймовірності утворення тріщин.

Після повного остигання пакет відремонтованих зразків розрізався за допомогою абразивних кругів по технологічним вставкам на окремі зразки, які остаточно оброблювалися шліфуванням з чотирьох сторін (рис. 3) та знову встановлювалися у випробувальну машину.

Перед випробуванням на втому в відремонтованих наплавленнях зразках проводили вимірювання залишкових напружень неруйнівним акустичним методом за допомогою портативного ультразвукового пристрою контролю напружень [17]. Використовували ультразвукові кварцеві датчики поздовжніх та зсувних хвиль з базою виміру 7×7 мм.

Обговорення результатів. Випробуваннями на втому першої серії зразків встановлено, що їх

циклічна довговічність до руйнування при максимальних прикладених напруженнях 500 МПа знаходиться у діапазоні від 560800 до 1420100 циклів змін напружень.

Попереднім візуальним оглядом зразків із збільшенням $\times 10$ встановлено, що втомні тріщини переважно з'являються поблизу зони сплавлення двох сусідніх валиків, що може пояснюватися підвищенням рівня хімічної та структурної неоднорідності в цій зоні [5]. При цьому тріщина зазвичай розповсюджується майже прямолінійно, паралельно до напрямку прикладеного навантаження з невеликими бічними розгалуженнями. При цьому відмічено, що в «руслі» тріщини спостерігаються окремі згини та короткі надриви (рис. 4). В подальшому були вирізані ділянки металу з тріщинами втомні та виготовлені мікрошліфи. Дослідженнями мікрошліфів встановлено, що втомні тріщини переважно утворюються та поширюються поблизу зон перекриттів сусідніх наплавлених валиків, розповсюджуючись у напрямку осей утворення дендритів (рис. 5).

Таким чином було встановлено, що вид та характер утворення і подальшого розвитку втомних тріщин залежить від техніки та технології наплавлення, зокрема, від кроку при наплавленні сусідніх валиків. При цьому лінія сплавлення основ-

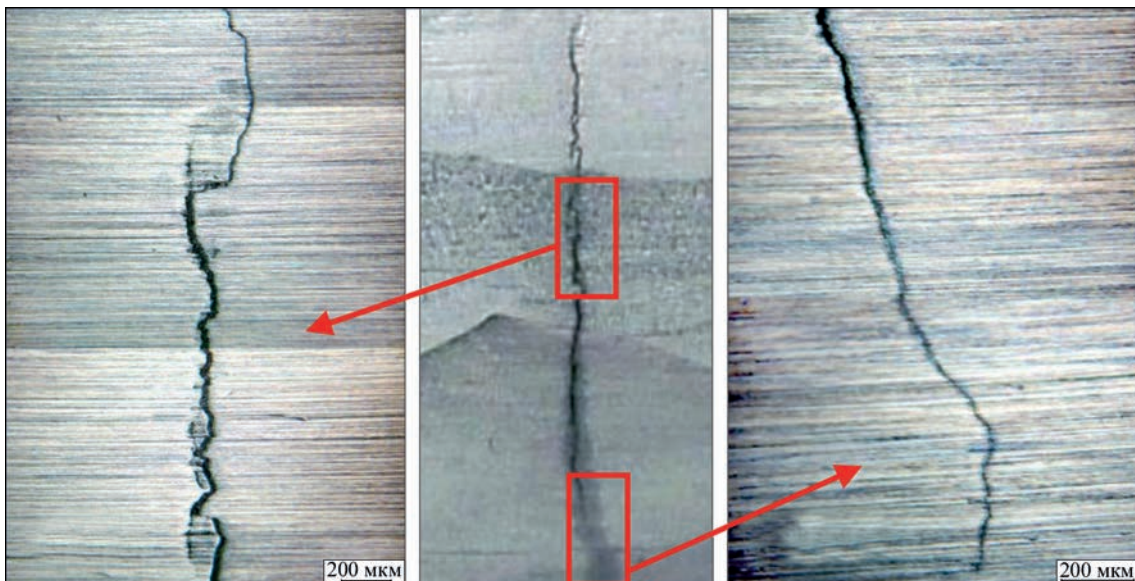


Рис. 4. Характер розповсюдження втомних тріщин у наплавлених зразках

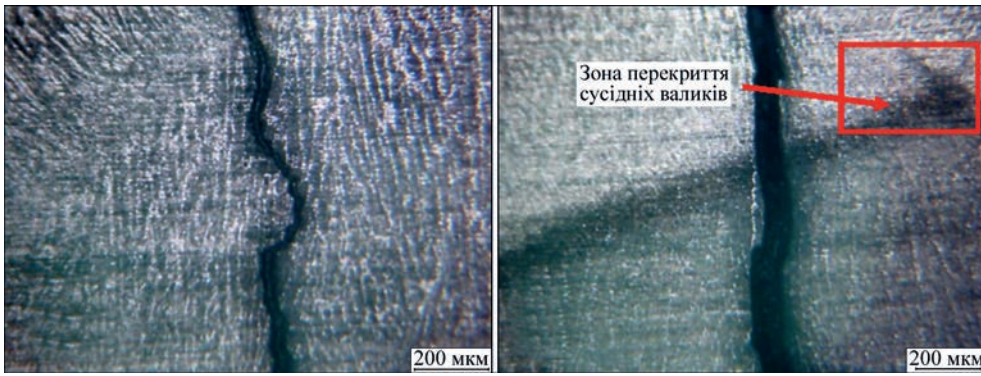


Рис. 5. Характер розповсюдження втомних тріщин у наплавленому металі

ного та наплавленого металів, а також характер лінії сплавлення окремих валиків та шарів відіграє важливу роль у процесі втомного руйнування наплавлених деталей, адже тріщини здебільшого розповсюджуються або по межі сплавлення окремих валиків, або безпосередньо біля цієї межі, де, ймовірно, розташована зона хімічної та структурної неоднорідності, що несприятливо впливає на втомну довговічність.

На зразках другої серії під час експериментальних досліджень тріщиностійкості визначали залежність розвитку втомної тріщини (глибини) від відповідного числа циклів змінного навантаження N . Після зародження всі тріщини втомі розвивалися як ненаскрізні (кутові) від одного з ребер зразка. Тому окрім глибини тріщини по вертикальній боковій грані зразка вимірювали також довжину тріщини на дні V-подібного надрізу за допомогою штангенциркуля з ціною поділки рівною 0,1 мм. Руйнування зразків при трьохточковому циклічному згинанні з максимальним рівнем

прикладених напружень 300 МПа відбувалося при досягненні тріщинами розмірів (глибина \times довжина): 23,6 \times 16,4, 12 \times 14 та 14 \times 16 мм.

Чисельним методом на основі МСЕ проводили визначення напружено-деформованого стану (рис. 6) та розрахунок КІН по фронту тріщини (рис. 7). На рис. 6 наведено напружено-деформований стан в модельному зразку на початку втомного руйнування (тріщина розміром 6 \times 4 мм, рис.6, а) та при досягненні тріщиною свого критичного значення 23,6 \times 16,4 (рис. 6, б).

На рис. 7 представлені дані зміни значень КІН по фронту тріщини (нульове значення по осі абсцис відповідає початку тріщини на вертикальній боковій грані зразка) по мірі розвитку кутової тріщини в двох зразках другої серії. Побудова скінченно-елементної моделі зразка та подальші розрахунки КІН виконувались засобами програмного комплексу ANSYS Workbench 2019R3. Розрахункова СЕ-сітка складалася з 20-ти вузлових гексагональних елементів та, безпосередньо по фронту тріщини, з

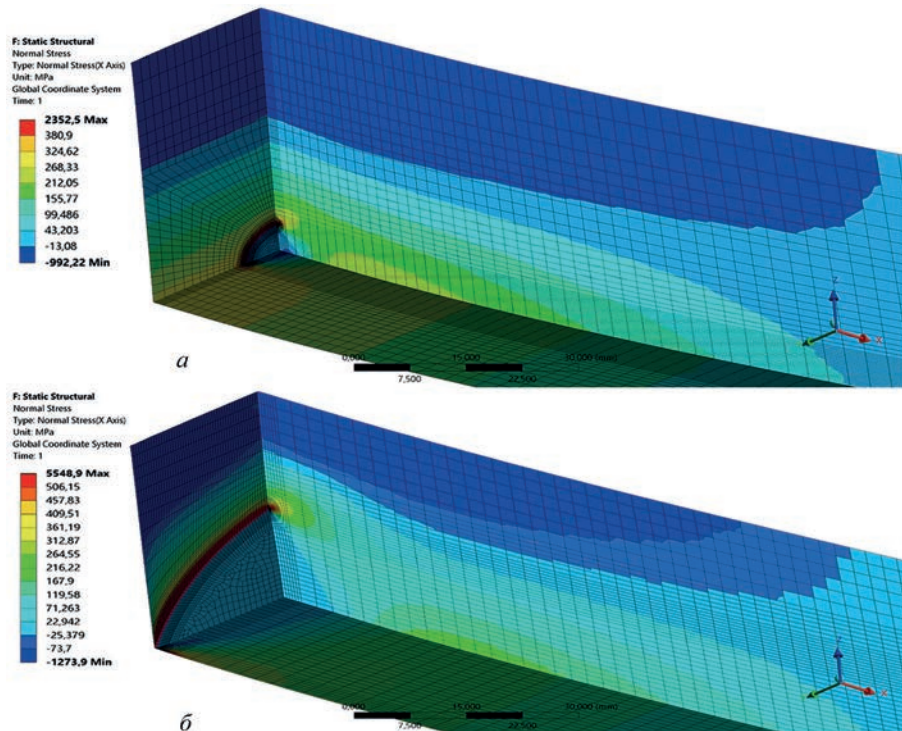


Рис. 6. Результати розрахунку напружено-деформованого стану для тріщин розмірами 6 \times 4 мм (а) та 23,6 \times 16,4 (б)

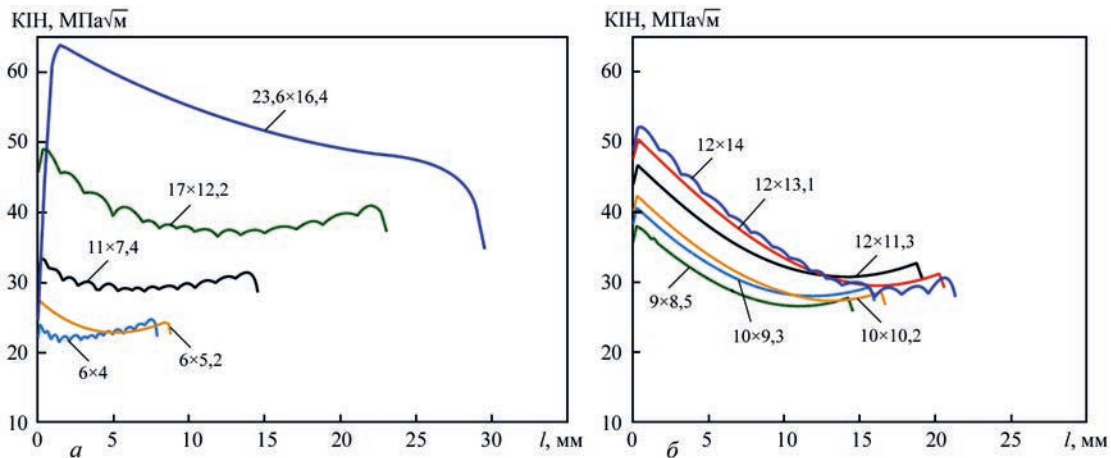


Рис. 7. Значення КІН по фронту тріщини по мірі її розвитку в першому (а) та другому (б) зразках другої серії

15-ти вузлових призматичних елементів. В області фронту тріщини була побудована сітка з концентричним розташуванням елементів, яка складалася з 16 шарів елементів в радіальному та 48 шарів в окружному напрямках, які рівномірно оточували фронт тріщини, що дозволило з необхідною точністю розв'язувати задачу механіки руйнування.

Встановлено, що максимальні значення КІН по фронту тріщини знаходяться на відстані близько 1 мм від вертикальної бокової грані в найглибшій точці фронту тріщини і під час руйнування досягають величини 52...64 МПа√м.

На зразках третьої серії після виконання ремонтного наплавлення за розробленою технологією проводили вимірювання залишкових напружень неруйнівним ультразвуковим методом. Схематичне зображення місць вимірювання залишкових напружень приведено на рис. 8, а епо-

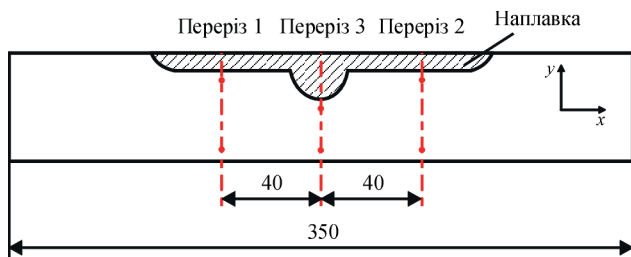


Рис. 8. Схематичне зображення місць вимірювання залишкових напружень в зразку після ремонтного наплавлення

ри розподілу залишкових напружень на рис. 9. Вимірювання залишкових напружень, орієнтованих вздовж та поперек зразка, проводили від лінії сплавлення (визначали за макроструктурою) вглиб металу. Приведені на епорах значення залишкових напружень є усередненими по товщині зразка.

Використання ультразвукових кварцових датчиків поздовжніх та зсувних хвиль з базою виміру 7×7 мм не дозволило провести вимірювання напружень ближче ніж 2,5 мм до лінії сплавлення. Проте, дослідження полів залишкових орієнтованих вздовж σ_x зразка (співпадають за напрямом з прикладеними робочими напруженнями при випробовуванні зразків на втому) показало, що зона залишкових напружень розтягу після ремонтного наплавлення не перевищує 6...7 мм від лінії сплавлення вглиб основного металу. Максимальні залишкові напруження розтягу σ_x знаходяться безпосередньо в зоні виконання ремонтного наплавлення і складають біля 120 МПа на відстані в 2,5 мм від лінії сплавлення (рис. 9, б). По мірі віддалення від місця проведення ремонтного наплавлення залишкові напруження розтягу σ_x на відстані в 2,5 мм від лінії сплавлення знижуються до 40...80 МПа (рис. 9, а, в). Починаючи з відстані 6...7 мм від лінії сплавлення вглиб металу формується зона залишкових напружень стиску, які досягають значень до -60...-80 МПа.

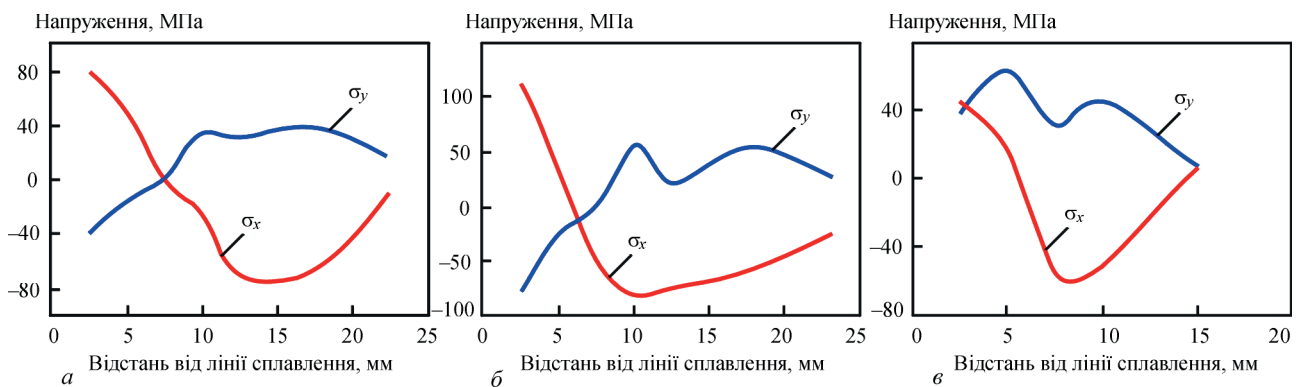


Рис. 9. Розподіл залишкових напружень, орієнтованих вздовж σ_x та поперек σ_y зразка після ремонтного наплавлення в перерізі 1 (а), перерізі 2 (б) та перерізі 3 (в)

Таблиця 3. Результати втомних випробувань зразків третьої серії

| Номер зразка | Максимальні напруження циклу, МПа | Циклічна довговічність до утворення тріщини 10 мм, цикли | Циклічна довговічність після виконання ремонтного наплавлення, цикли | Загальна циклічна довговічність, цикли |
|--------------|-----------------------------------|--|--|--|
| 7 | 500 | 688700 | 963000 | 1651700 |
| 8 | 500 | 132800* | 1021200 | 1154000 |
| 9 | 500 | 1381800 | 128000 | 1509800 |

*Дефект у вигляді несплавлення між валиками.

Ці дані також будуть використані в якості базових при подальших порівняльних дослідженнях втомної довговічності зразків, наплавлених за іншими технологіями.

Після вимірювання залишкових напружень зразки третьої серії піддавали втомним випробуванням. Результати випробувань на втому зразків третьої серії до та після ремонтного наплавлення наведено в табл. 3.

Передчасне зародження тріщини втоми у зразку № 8 (табл. 3) відбулося всередині зразка на відстані 8 мм від поверхні (біля лінії сплавлення з основним металом) внаслідок несплавлення між валиками. При цьому усунення ремонтним наплавленням тріщин втоми, поява яких обумовлена випадковими технологічними дефектами в попередньо наплавленому шарі, не призводить до зниження довговічності у порівнянні з бездефектним наплавленням. Після виконання ремонтного наплавлення зародження та розвиток тріщин втоми в усіх зразках третьої серії відбувалося віддалік від місця ремонту. Втомними випробуваннями зразків третьої серії встановлено, що загальна циклічна довговічність зразків при максимальних прикладених напруженнях 500 МПа знаходиться в діапазоні від 1154000 до 1651700 циклів змін напружень.

Також показано (зразок № 9, табл. 3), що застосування ремонтного наплавлення до виробів з втомними тріщинами після їх тривалої експлуатації не призводить до суттєвого збільшення циклічної довговічності після ремонту. Це пов'язано з тим, що після тривалої експлуатації бездефектний шар наплавленого металу має значний рівень накопичених втомних пошкоджень, тому виконання ремонту ділянки виробу, пошкодженої тріщиною втоми, без повного видалення наплавленого шару металу не ефективно. Отже, при ремонті тривало експлуатованих виробів з метою суттєвого підвищення загальної довговічності рекомендується видаляти не тільки метал навколо виявлених втомних тріщин, а весь наплавлений шар на глибину виявлених втомних тріщин із подальшим відновлювальним наплавленням.

Висновки

1. Вдосконалено конструкцію наплавлених зразків та методику проведення порівняльних досліджень їх втомної довговічності, а також встановлено базові втомні характеристики наплавленого зразка, що імітує конструкцію прокатних валків.

2. Встановлено, що вид та характер утворення і подальшого розвитку втомних тріщин у наплавлених зразках залежить від техніки та технології наплавлення, зокрема, від кроку при наплавленні сусідніх валиків. При цьому лінія сплавлення основного та наплавленого металів, а також характер лінії сплавлення окремих валиків та шарів відіграє важливу роль у процесі втомного руйнування наплавлених деталей, адже тріщини здебільшого розповсюджуються або по межі сплавлення окремих валиків, або безпосередньо біля цієї межі, де, ймовірно, розташована зона хімічної та структурної неоднорідності, що несприятливо впливає на втомну довговічність.

3. Чисельно на основі МСЕ визначені значення КІН по фронту ненаскрізної кутової втомної тріщини, що розвивалася в призматичному модельному зразку сталі 40X з зносостійким наплавленим шаром металу, при трьохточковому віднольовому циклічному згинанні. Встановлено, що максимальні значення КІН по фронту тріщини знаходяться на відстані близько 1 мм від вертикальної бокової грані в найглибшій точці фронту тріщини і під час руйнування досягають величини 52...64 МПа√м.

4. Експериментально встановлено, що на ранніх стадіях експлуатації виробу усунення ремонтним наплавленням тріщин втоми, поява яких обумовлена випадковими технологічними дефектами в попередньо наплавленому шарі, не призводить до зниження довговічності у порівнянні з бездефектним наплавленням.

5. Показано, що застосування ремонтного наплавлення до виробів з втомними тріщинами після їх тривалої експлуатації не призводить до суттєвого збільшення циклічної довговічності після ремонту. Це пов'язано з тим, що після тривалої експлуатації бездефектний шар наплавленого металу має значний рівень накопичених втомних пошкоджень, тому виконання ремонту ділянки виробу, пошкодженої тріщиною втоми, без повного видалення наплавленого шару металу недостатньо ефективно.

Список літератури/References

- Gao, F., Zhou, J., Zhou, J. et al. (2017) Microstructure and properties of surfacing layers of dies manufactured by bimetal-gradient-layer surfacing technology before and after service. *The Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, 88, 1289–1297. doi:10.1007/s00170-016-8679-0
- Zhang, J., Zhou, J., Tao, Y. et al. (2015) The microstructure and properties change of dies manufactured by bimetal-gradi-

- ent-layer surfacing technology. *Ibid.*, 80, 1807–1814 (2015). doi:10.1007/s00170-015-7170-7
3. Ahn, D.-G. (2013) Hardfacing technologies for improvement of wear characteristics of hot working tools: A review. *Int. J. of Precision Engineering and Manufacturing*, 14, 7, 1271–1283. doi:10.1007/s12541-013-0174-z
 4. Jhavar, S., Paul, C.P., Jain, N.K. (2013) Causes of failure and repairing options for dies and molds: A review. *Engineering Failure Analysis*, 34, 519–535. DOI: 10.1016/j.engfailanal.2013.09.006
 5. Du, Toit, M., Van, Niekerk J. (2010) Improving the life of continuous casting rolls through submerged arc cladding with nitrogen-alloyed martensitic stainless steel. *Welding in the World*, 54, 11–12, 342–349. doi:10.1007/bf03266748
 6. Shao, C., Cui, H., Lu, F., Li, Z. (2019) Quantitative relationship between weld defect characteristic and fatigue crack initiation life for high-cycle fatigue property. *Int. J. of Fatigue*, 123, 238–247. doi:10.1016/j.ijfatigue.2019.02.028
 7. Korotkov, V.A. (2017) More efficient surfacing. *Russian Engineering Research*, 37, 701–703. doi:10.3103/S1068798X17080093
 8. Rjabcev, I.A., Senchenkov, I.K., Turyk, Je.V. (2015) *Surfacing. Materials, technologies, mathematical modeling*. Gliwice, Wydawnictwo politechniki slaskiej [in Russian].
 9. Liu, H., Yang, S., Xie, C. et al. (2018) Mechanisms of fatigue crack initiation and propagation in 6005A CMT welded joint. *J. of Alloys and Compounds*, 741, 188–196. doi:10.1016/j.jallcom.2017.12.374
 10. Zerbst, U., Madia, M., Beier, H. T. (2017) Fatigue strength and life determination of weldments based on fracture mechanics. *Procedia Structural Integrity*, 7, 407–414. doi:10.1016/j.prostr.2017.11.106
 11. Oberg, E. et al. (1996) *Machinery's Handbook* (25th ed.), Industrial Press Inc.
 12. Zhang, D., Liu, Y., Yin, Y. (2016) Preparation of plasma cladding gradient wear-resistant layer and study on its impact fatigue properties. *J. Thermal Spray Technol.*, 25, 535–545. doi:10.1007/s11666-015-0370-8
 13. Ganesh, P., Moitra, A., Tiwari, P. et al. (2010) Fracture behavior of laser-clad joint of Stellite 21 on AISI 316L stainless steel. *Mater. Sci. & Engin.*, 527, 16–17, 3748–3756. doi:10.1016/j.msea.2010.03.017
 14. Babinets, A.A., Ryabtsev, I.A. (2016) Fatigue life of multilayer hard-faced specimens. *Welding Int.*, 30, 4, 305–309. https://doi.org/10.1080/01431161.2015.1058004
 15. Рябцев І. О., Книш В. В., Бабінець А. А., Соловей С. О., Сенченков І. К. (2019) Методики і зразки для порівняльних досліджень опору втомі деталей з багатошаровим наплавленням. *Автоматическая сварка*, 2, 36–42. Ryabtsev, I.A., Knysh, V.V., Babinets, A.A. et al. (2019) Methods and specimens for comparative investigations of fatigue resistance of parts with multilayer surfacing. *The Paton Welding J.*, 2, 29–34. https://doi.org/10.15407/tpwj2019.02.05
 16. Мураками Ю. (1990) *Справочник по коэффициентам интенсивности напряжений: в 2-х томах*. Москва, Мир. Murakami, Yu. (1990) *Reference book on stress intensity coefficients*. In: 2 Vol. Moscow, Mir [in Russian].
 17. (2004) *Пристрій контролю механічних напружень та деформацій в твердих середовищах*. Патент UA 71637 C2. (2004) *Device for control of mechanical stresses and strains in solid media*. Pat. UA 71637 C2 [in Ukrainian].

FATIGUE LIFE OF SAMPLES AFTER WEAR-RESISTANT, FABRICATION AND REPAIR SURFACING

I.O. Ryabtsev¹, V.V. Knysh¹, A.A. Babinets¹, S.O. Solovej¹, V.M. Demenkov²

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

E-mail: office@paton.kiev.ua

²State Company «State Scientific and Technical Center for Nuclear and Radiation Safety».

35-37 Vasyl-Stys Str., 03142, Kyiv, Ukraine. E-mail: vm_demenkov@sstc.com.ua

Cyclic fatigue life of specimens surfaced by flux-cored wire PP-Np-25Kh5FMS that provides deposited metal of the type of tool semi-heat-resistant steel was studied. The design of the surfaced specimens and procedure of their testing simulated the operating conditions of mill rolls, for surfacing which flux-cored wire PP-Np-25Kh5FMS is widely used. Cyclic fatigue life of the specimens directly after surfacing was evaluated, as well as the effectiveness of application of repair surfacing to increase the residual cyclic fatigue life of specimens, in which preliminary testing revealed fatigue cracks in the deposited wear-resistant layer. The numerical method was used to determine the stress-strain state and calculate the stress intensity factor on the front of a nonthrough-thickness crotch corner fatigue crack that propagated in a specimen of 40Kh steel with a wear-resistant deposited layer at three-point zero-to-load cyclic loading. It is shown that the maximum values of the stress intensity factor along the crack front are located at approximately 1 mm distance from the vertical side face in the deepest point of the crack front and during fracture they reach the value of 52...64 MPa√m. During investigations it was shown that application of repair surfacing to products with fatigue cracks after their long-term service does not result in a significant extension of their cyclic fatigue life after repair. This is related to the fact that after long-term service the defect-free layer of the deposited metal has a considerable level of accumulated fatigue damage. That is why performance of repair of the product region damaged by a fatigue crack, is not effective without complete removal of the deposited metal layer. Results obtained in this work will be further used as base ones during performance of comparative assessment of the impact of surfacing technique and technology, as well as surfacing materials, on the fatigue life of specimens. 17 Ref., 3 Tabl., 9 Fig.

Keywords: arc surfacing, manufacturing surfacing, repair surfacing, fatigue, fatigue life, fatigue cracks, stress intensity factor

Надійшла до редакції 24.07.2020

НОВА КНИГА

Рябцев И.А., Демченко Ю.В., Панфилов А.И. Износостойкий и коррозионностойкий биметалл. – Киев: Институт электросварки им. Е.О. Патона НАН Украины, 2020. – 224 с.

Наведено класифікацію багатошарових металів, описано основні способи їх виробництва, охарактеризовано структура і властивості матеріалів, які застосовуються в якості основного і плакуючого шарів. Висвітлено питання теорії і практики отримання багатошарових матеріалів, наведено методики оцінки якості і властивостей багатошарових матеріалів, отриманих різними способами. Велику увагу приділено особливостям їх зварювання і застосування в різних галузях промисловості.

Книга розрахована на інженерно-технічних працівників, зайнятих в області наплавного і ремонтного виробництва. Може бути корисною викладачам, аспірантам і студентам технічних університетів.

Замовлення на книгу прохання надсилати в редакцію журналу «Автоматичне зварювання».

