

ВТОМНА ДОВГОВІЧНІСТЬ ЗРАЗКІВ ЗІ СТАЛІ 40Х ПІСЛЯ ЗНОСОСТІЙКОГО НАПЛАВЛЕННЯ З ПІДШАРОМ З НИЗЬКОЛЕГОВАНОЇ СТАЛІ

В.В. Книш, С.О. Соловей, І.О. Рябцев, А.А. Бабінець

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

Досліджено опір втомному руйнуванню багат шарового матеріалу, зносостійкий шар якого наплавлений порошковим дротом ПП-Нп-25Х5ФМС з підшаром з низьколегованого матеріалу, наплавленого дротом ПП-Нп-12Х1МФ. Конструкція наплавлених зразків і методика їх випробувань імітували умови експлуатації сталевих прокатних валків. Комплексна методика оцінки опору втомному руйнуванню багат шарових наплавлених зразків включала три етапи: встановлення циклічної довговічності зразків після виготовлення наплавлення; дослідження циклічної тріщиностійкості різних наплавлених шарів; визначення втомної довговічності зразків, які в процесі попередніх випробувань мали в наплавленому шарі втомні тріщини, після ремонтного наплавлення. Встановлено, що циклічна довговічність зразків з вуглецевої сталі 40Х, наплавлених порошковим дротом ПП-Нп-25Х5ФМС з підшаром з низьколегованої сталі 12Х1МФ при рівні максимальних напружень 500 МПа знаходиться в діапазоні 346...716 тис. циклів. Виявлено особливості кінетики втомного руйнування досліджуваного багат шарового матеріалу. Встановлено, що в наплавленому металі (в зносостійкому шарі та в підшарі з низьколегованої сталі) втомна тріщина розвивається нестабільно, постійно змінюючи швидкість та напрям. Показано, що видалення втомних тріщин та наступне наплавлення місць їх видалення дозволяє відновити циклічну довговічність зразка до рівня вихідного стану, тобто збільшити загальну довговічність у 2 рази. Бібліогр. 16, табл. 4, рис. 7.

Ключові слова: дугове наплавлення, ремонтне наплавлення, підшар, втомна довговічність, тріщини втоми, коефіцієнт інтенсивності напружень.

Широко відомо, що в металургійній та машинобудівній галузях значна кількість деталей та інструментів експлуатуються в умовах дії циклічних механічних навантажень [1]. Такі складні умови експлуатації призводять, зокрема, до появи на поверхні деталей втомних тріщин, що, на прикладі прокатних валків, може призвести до браку металопрокатної продукції, виходу з ладу обладнання та, як наслідок, значних матеріальних втрат [1–6].

З метою підвищення довговічності таких деталей, які виготовляються з середньовуглецевих сталей типу 35ХМ, 45, 50, 40Х, 50Х та ін., часто застосовують виготовне або ремонтно-відновлювальне наплавлення на них зовнішнього зносостійкого шару металу. Найчастіше для цього застосовуються електродні матеріали, які забезпечують отримання наплавленого металу типу середньо- або високолегованих напівтеплостійких або теплостійких інструментальних сталей 25Х5ФМС, 30Х4В2М2ФС, 35В9Х3СФ та ін. [7, 8].

Широко відомо, що для поліпшення зварюваності основного та наплавленого металу, особливо, якщо вони відносяться до різнорідних класів металів, використовують наплавлення проміжного пластичного шару металу (підшару). Також при використанні матеріалу підшару з проміжним значенням коефіцієнта температурного розширення можна дещо знизити залишкові наплавочні напруження, що може позитивно вплинути на загальну втомну довговічність наплавленого зразка чи деталі [7, 8]. З практичного досвіду відомо, що в якості матеріалу підшару найчастіше

обирають низьковуглецеві, низьколеговані матеріали, які забезпечують отримання пластичного металу типу сталей 08кп, 08Г2С та ін. [8].

Так, в роботі [9] було показано, що застосування пластичного металу типу 08кп в якості підшару дозволило підвищити втомну довговічність дослідних зразків при циклічному механічному навантаженні у порівнянні з аналогічними зразками без підшару у 1,4 рази. В роботах [10, 11], в результаті комплексної оцінки втомної довговічності зразків з таким же матеріалом підшару, але наплавлених за іншою технологією, було встановлено, що при виготовленню наплавленні дротом Св-08А на сталь 40Х із наступним наплавленням зносостійкого та термостійкого шару сталі типу 25Х5ФМС, втомна довговічність зразків у 2 рази вища у порівнянні зі зразками, наплавленими без підшару.

Мета роботи – експериментальне порівняльне дослідження впливу низьколегованого підшару металу на втомну довговічність багат шарового матеріалу при виготовленню та ремонтному (відновлювальному) зносостійкому наплавленню.

Методики, технології та матеріали досліджень. З метою порівняння впливу матеріалу підшару на втомну довговічність наплавлених зразків, в даній роботі використовували підшар з низьколегованої сталі типу 12Х1МФ. Сталь даної марки було обрано виходячи з її більш високих механічних властивостей у порівнянні зі сталлю 08кп (табл. 1).

Для встановлення доцільності застосування підшару з низьколегованої сталі з метою підви-

Книш В.В. – <https://orsid.org/0000-0003-1289-4462>, Соловей С.О. – <https://orsid.org/0000-0002-1126-5536>,

Рябцев І.О. – <https://orsid.org/0000-0001-7180-7782>, Бабінець А.А. – <https://orsid.org/0000-0003-4432-8879>

© В.В. Книш, С.О. Соловей, І.О. Рябцев, А.А. Бабінець, 2021

Таблиця 1. Механічні властивості основного й наплавленого металів [12]

Марка матеріалу	Механічні властивості (після нормалізації)					
	Умовна межа течучості $\sigma_{0,2}$, МПа	Межа міцності σ_b , МПа	Відносне подовження δ , %	Відносне звуження ψ , %	Ударна в'язкість КСУ, Дж/см ²	Твердість НВ
40Х	345	590	12,5	52	7,5	174...217
08кп*	196	320	33	60	-	≤ 131
12Х1МФ	255	470	21	55	98	≤ 217
4Х5МФС*	1570	1710	12	54	51	444...478

Примітка. * – у літературі відсутні дані по механічних властивостях металу, наплавленого дротами Св-08А та ПП-Нп-25Х5ФМС. Тому наведені дані для їх аналогів (найбільш близьких за хімічним складом і механічним властивостям), відповідно сталей 08кп та 4Х5МФС.

Таблиця 2. Хімічний склад основного й наплавленого металів [12]

Марка матеріалу	Масова частка елементів, %							
	С	Мn	Si	Cr	V	Mo	S	P
40Х	0,36...0,40	0,5...0,8	0,17...0,37	0,8...1,1	-	-	≤0,035	≤0,035
Св-08А**	0,05...0,12	0,2...0,4	0,1...0,3	-	-	-	≤0,04	≤0,04
08кп	0,05...0,12	0,25...0,5	≤0,3	≤0,10	-	-	≤0,035	≤0,04
12Х1МФ	0,10...0,15	0,4...0,7	0,17...0,37	0,9...1,2	0,15...0,3	0,25...0,35	≤0,025	≤0,035
ПП-Нп-25Х5ФМС**	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
4Х5МФС**	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

Примітка. ** – дана масова частка елементів у наплавленому металі.

щення втомної довговічності багат шарових наплавлених зразків, використовували раніше розроблену технологію наплавлення, яка детально описана в роботах [10, 11]. Для отримання достовірних результатів досліджень марки сталі основного металу і наплавленого зносостійкого шару металу (сталь 40Х та 25Х5ФМС, відповідно) при наплавленні зразків без підшару та з підшаром різних типів були однакові. Для наплавлення проміжного шару використовували дослідний порошковий дріт марки ПП-Нп-12Х1МФ діаметром 1,8 мм. Хімічний склад і механічні властивості матеріалів, використаних у роботі, наведено в табл. 1, 2 [12].

Дослідження виконували в три етапи, для кожного з яких було виготовлено по 3...5 призматичних зразків розмірами 350×40×20 мм, які в подальшому випробували використовуючи розроблену комплексну методику оцінки опору багат шарового матеріалу втомному руйнуванню [10, 11]. Дана методика включає наступні етапи: встановлення циклічної довговічності зразків після виготовлення наплавлення; дослідження циклічної тріщиностійкості різних шарів металу; визначення втомної довговічності зразків, які в процесі попередніх випробувань мали в наплавленому шарі втомні тріщини, після ремонтного наплавлення. Більш детально режими та технології наплавлення, а також методики досліджень описано в роботах [10, 11].

Результати експериментів і їх обговорення.
Зразки першої серії. Спочатку три зразки першої серії з вуглецевої сталі 40Х, наплавлених порошковим дротом ПП-Нп-25Х5ФМС з підшаром з низьколегованої сталі 12Х1МФ, випробували при рівнях максимальних напружень 600 МПа, характерних зразкам, виготовленим з підшаром з низьковуглецевої сталі [11]. Через наявність внутрішніх

дефектів у наплавленому шарі на них не вдалося отримати достовірні результати втомної довговічності, тому було виготовлено додаткові зразки та вирішено виконувати випробування при рівнях максимальних напружень 500 МПа, характерних зразкам, виготовленим без підшару [10]. Результати досліджень втомної довговічності зразків, наплавлених дротом ПП-Нп-25Х5ФМС з підшаром з низьколегованої сталі 12Х1МФ, наведено в табл. 3.

Випробуваннями на втому першої серії зразків, наплавлених дротом ПП-Нп-25Х5ФМС з підшаром з низьколегованої сталі, встановлено, що їх циклічна довговічність до руйнування при максимальних прикладених напруженнях 500 МПа знаходиться в діапазоні 346000...716800 циклів.

Слід відмітити, що руйнування зразків без підшару при рівнях максимальних напружень 500 МПа відбувалося в діапазоні від 560800 до 1420100 циклів змін напружень [10], а зразки з підшаром з низьковуглецевої сталі витримали більше 2000000 циклів змін напружень [11].

На зразках другої серії від гострого надрізу в зносостійкому шарі металу вирощували вихідну трі-

Таблиця 3. Результати втомних випробувань зразків першої серії

Номер зразка	Максимальні напруження циклу, МПа	Циклічна довговічність до руйнування, цикли
1	600	18000*
2	->-	72400*
3	->-	261000
4	500	716800
5	->-	381800
6	->-	528700
7	->-	346000

Примітка. * – в зразках були знайдені дефекти, які утворилися під час наплавлення

щину глибиною 1 мм при рівнях максимальних напружень 400 МПа. При подальших випробуваннях зразка також при рівнях максимальних напружень 400 МПа фіксували довжину втомної тріщини та відповідне число циклів змінного навантаження N .

Експериментальні дослідження особливостей розвитку втомних тріщин в даних зразках підтвердили отримані раніше дані, що зона сплавлення окремих валиків та шарів відіграє важливу роль у процесі втомного руйнування наплавлених деталей, адже тріщини здебільшого розвиваються або по межі сплавлення окремих валиків, або близько до цієї межі (рис. 1).

Для побудови кінетичних діаграм втомного руйнування (КДВР) проводили розрахунок значень розмаху коефіцієнта інтенсивності напружень (КІН) для призматичного зразка з поперечною крайовою тріщиною при трьохточковому згинанні за виразами, приведеними в [13]. Експериментальна залежність швидкості росту втомної тріщини від розмаху КІН в різних шарах металу багатошарового зразка приведена у вигляді відповідної КДВР, отриманої за результатами випробування трьох зразків (рис. 2). Окремо, на рис. 3 наведено кінетичну діаграму втомного руйнування основного металу сталі 40Х.

В наплавленому металі (в зносостійкому шарі та в підшарі з низьколегованої сталі) втомна тріщина розвивається нестабільно. Так, в інтервалі розмаху КІН 45...60 МПа $\sqrt{м}$, коли тріщина розвивалася в металі зносостійкого шару, її швидкість постійно змінювалася в діапазоні значень $10^{-8} \dots 10^{-7}$ м/цикл. При подальшому розвитку в металі підшару швидкість росту втомної тріщини підвищується на порядок до $2 \cdot 10^{-7} \dots 2 \cdot 10^{-6}$ м/цикл в інтервалі розмаху КІН 60...100 МПа $\sqrt{м}$. В основному металі тріщина стабільно розвивалася з постійно зростаючою швидкістю від $6 \cdot 10^{-7}$ до $7 \cdot 10^{-6}$ м/цикл до руйнування зразка при значеннях розмаху КІН 160...180 МПа $\sqrt{м}$, що відповідає встановленій КДВР сталі 40Х.

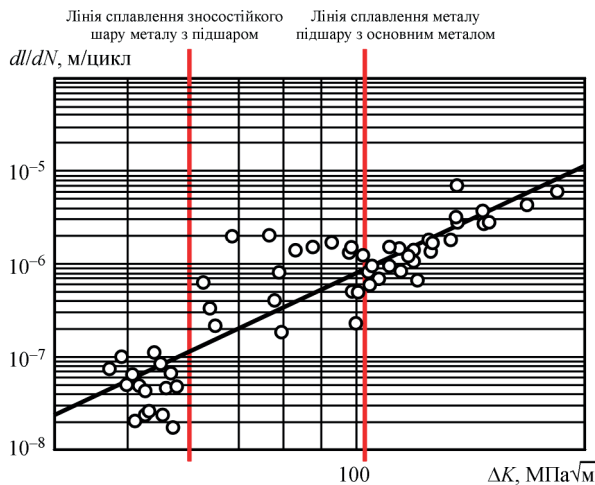


Рис. 2. Кінетична діаграма втомного руйнування багатошарового матеріалу, сформованого зносостійким наплавленням з використанням підшару з низьколегованої сталі

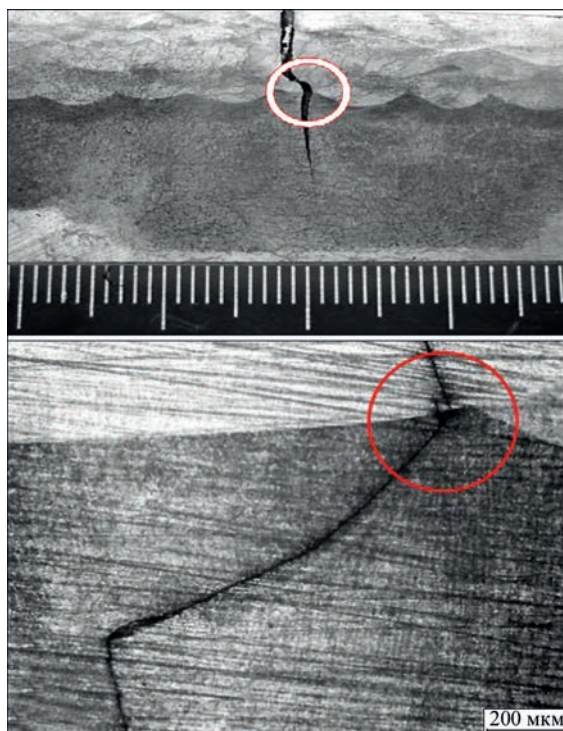


Рис. 1. Характер розповсюдження втомної тріщини в зразках зі сталі 40Х, наплавлених дротом ПП-Нп-25Х5ФМС з підшаром з низьколегованої сталі 12Х1МФ

На зразках третьої серії спочатку моделювали зародження та розвиток втомних тріщин від можливих дефектів в наплавленому зносостійкому шарі металу. Тобто зразки випробовували при циклічному навантаженні до утворення тріщин втоми глибиною 10...12 мм, які в подальшому підлягали усуненню за допомогою ремонтного наплавлення. Після виконання ремонтного наплавлення проводили вимірювання залишкових напружень неруйнівним ультразвуковим методом [14]. Даний метод не дозволяє проводити вимірювання залишкових напружень у литому металі, тому вимірювання залишкових напружень, орієнтованих вздовж та поперек зразка, проводили на відстані від лінії сплавлення низьковуглецевого підшару з основним металом (визначали за макроструктурою) вглиб металу. Приведені на епюрах значення залишкових напружень є усередненими по товщині

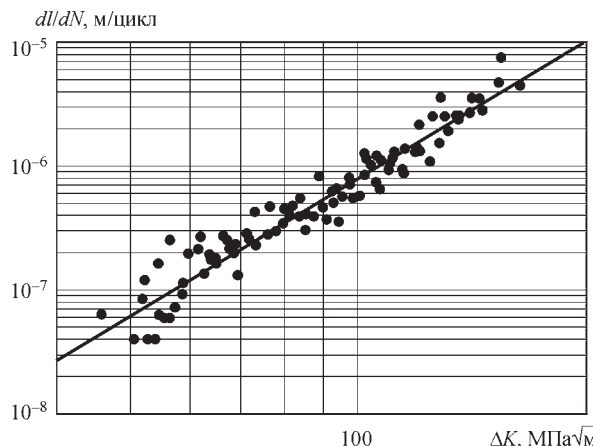


Рис. 3. Кінетична діаграма втомного руйнування основного металу сталі 40Х

зразка. Схематичне зображення місць вимірювання залишкових напружень приведено на рис. 4, а епюри розподілу залишкових напружень у вихідному стані та після ремонтного наплавлення на рис. 5, 6.

Приведені на рис. 5 дані вимірів залишкових напружень в зразку сталі 40Х з наплавленням зносостійким шаром з підшаром з сталі 12Х1МФ показують, що максимальні напруження розтягу σ_x , які орієнтовані вздовж зразка (співпадають за напрямом з прикладеними робочими напруженнями при випробуванні зразків на втому) на 20 % вищі у порівнянні з максимальними залишковими напруженнями розтягу σ_x , сформованими в багатшаровому матеріалі з підшаром з сталі 08кп [11].

Після ремонтного наплавлення максимальні залишкові напруження розтягу σ_x в перетинах 1 та 2 зразка фактично залишаються незмінними, в той час, як в перетині 3 суттєво зменшуються до 60 МПа (рис. 6).

Після вимірювання залишкових напружень зразки третьої серії випробовували на втому при трьохточковому віднульовому циклічному згинанні. Циклічну довговічність зразків до та після ремонтного наплавлення наведено в табл. 4. При цьому слід відзначити, що всі зразки після ремонту при втомних випробуваннях зруйнувалися більш ніж в 20 мм від перерізу 3, тобто в місцях з більш високими залишковими напруженнями розтягу σ_x .

Після виконання ремонтного наплавлення, як і у випадку виготівного наплавлення, зародження та

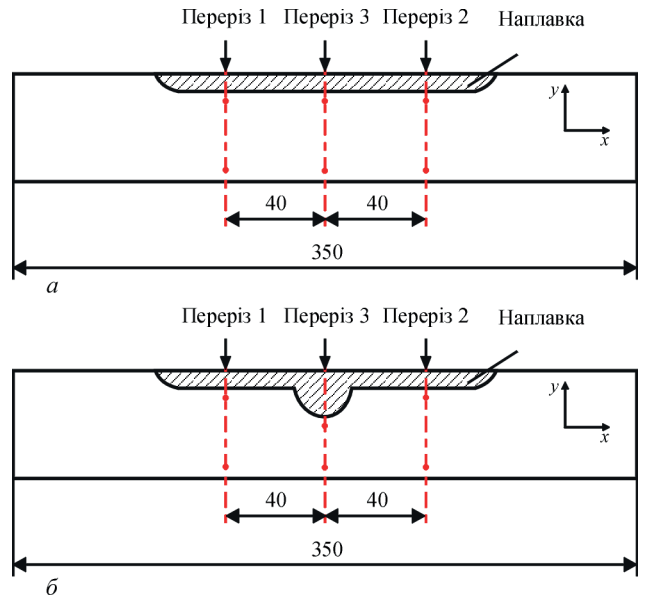


Рис. 4. Схематичне зображення місць вимірювання залишкових напружень в зразку до (а) та після (б) ремонтного наплавлення

розвиток тріщин втомі в усіх зразках третьої серії відбувалося або по межі сплавлення окремих валиків, або безпосередньо біля цієї межі, очевидно, внаслідок хімічної та структурної неоднорідності в даній зоні (рис. 7, а). Сумарно зразки, наплавлені з підшаром з низьколегованої сталі, після попереднього напрацювання до моменту утворення тріщини, ремонтного наплавлення та наступного циклічного навантаження витримали в середньому близько

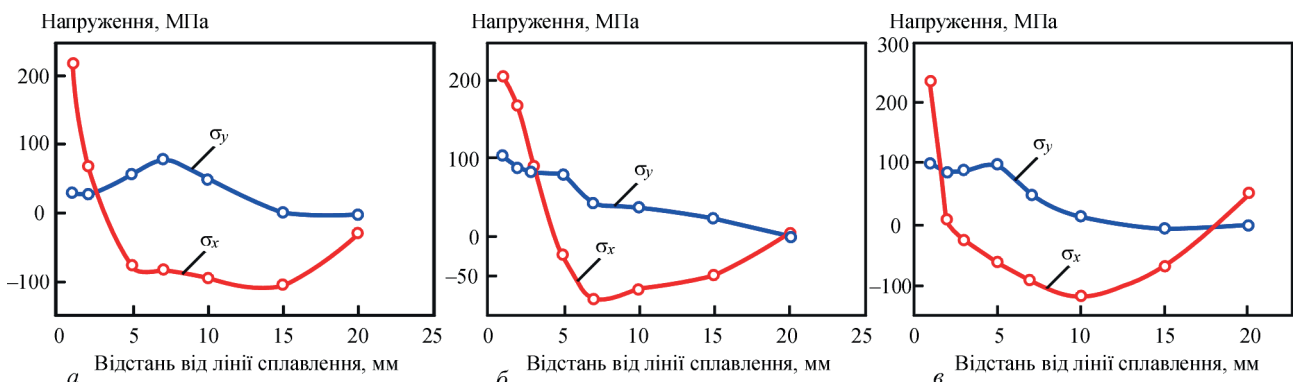


Рис. 5. Розподіл залишкових напружень, орієнтованих вздовж σ_x та поперек σ_y зразка до ремонтного наплавлення, в перерізі 1 (а), перерізі 2 (б) та перерізі 3 (в) за рис. 4, а

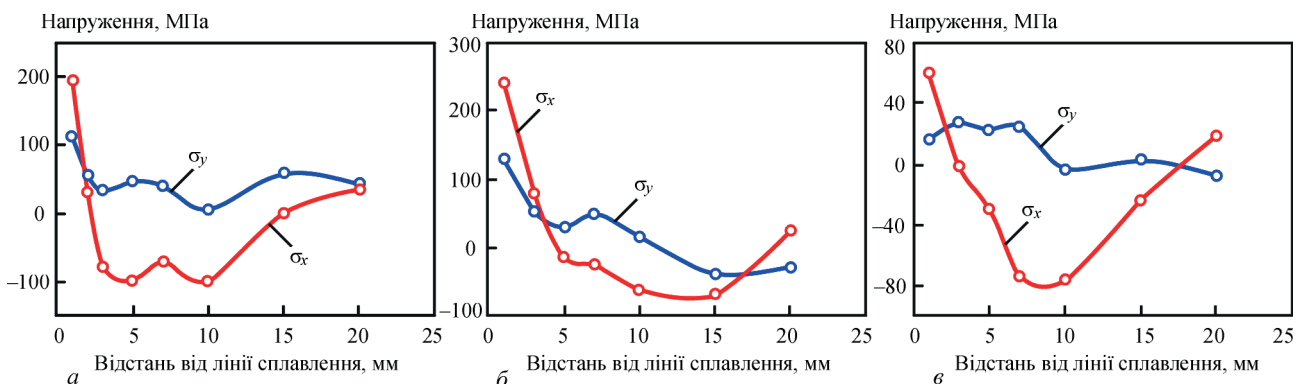


Рис. 6. Розподіл залишкових напружень, орієнтованих вздовж σ_x та поперек σ_y зразка після ремонтного наплавлення, в перерізі 1 (а), перерізі 2 (б) та перерізі 3 (в) за рис. 4, б

Таблиця 4. Результати втомних випробувань зразків третьої серії

Номер зразка	Максимальні напруження циклу, МПа	Циклічна довговічність до утворення тріщини 10...12 мм, цикли	Циклічна довговічність після виконання ремонтного наплавлення, цикли	Загальна циклічна довговічність, цикли
11	500	285600	256400	542000
12	500	333300	144900	478200
13	500	283100	448200	731300

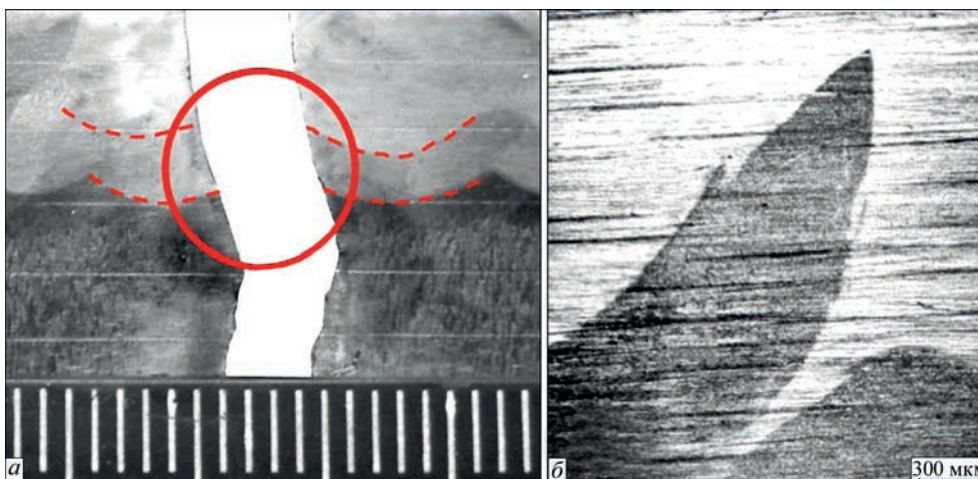


Рис. 7. Зовнішній вигляд ділянки зразка після ремонтного наплавлення із втомною тріщиною, яка проходить по межі між сусідніми наплавленими валиками (а) та зона макронеоднорідності – межа між «старим» наплавленим металом, та металом, який був наплавлений в ході ремонту (б)

≈ 600 тис. циклів. Тобто довговічність зразків після виготовного та після ремонтного наплавлення приблизно однакова і становить ≈ 300 тис. циклів.

Окрему увагу слід приділити і технології ремонтного наплавлення, адже при виконанні розділки згідно з визначеними раніше параметрами і наступному її заплавленні, на межі між новим наплавленим металом і «старим» можуть утворюватися несприятливі зони макронеоднорідності (рис. 7, б), що також може несприятливо впливати на втомну довговічність зразка.

Узагальнення результатів. Порівняння даних, отриманих для зразків сталі 40Х, наплавлених без підшару [10], з підшарами з низьковуглецевої сталі 08кп [11] та низьколегованої сталі 12Х1МФ вказує на те, що найбільшу довговічність як до так і після ремонтного наплавлення мають зразки, наплавлені з підшаром з більш пластичної низьковуглецевої сталі 08кп. Це може бути пояснено декількома факторами. По-перше, це пов'язано з більш високими межами міцності та текучості сталі 12Х1МФ у порівнянні зі сталлю 08кп і, водночас, більш низьким відносним подовженням (див. табл. 1), що призвело до формування більш високих рівнів залишкових напружень розтягу в наплавленому металі (див. рис. 5, 6). По-друге, причиною негативного впливу на втомну довговічність матеріалу 12Х1МФ можуть бути хімічні чи структурні неоднорідності, які утворилися в зонах переходу основа – підшар – робочий шар [5, 15, 16].

Очевидно, що при ремонтному наплавленні, коли видаляється та заново заплавляється лише ділянка металу навколо втомної тріщини, додають-

ся труднощі в забезпеченні рівномірного хімічного й макроструктурного стану через порушення первісного порядку укладання та структури наплавлених валиків. Крім того, при багатошаровому наплавленні середньо- та високовуглецевими електродними матеріалами, через повторні нагриви, у зонах перекриттів сусідніх валиків може відбуватися додаткове утворення карбідів, що збіднює навколишню матрицю й приводить до утворення хімічної та структурної неоднорідності. Ці області можуть стати джерелами виникнення тріщин в умовах механічного циклічного навантаження, а отже, наведені вище фактори необхідно враховувати при розробленні техніки та технології як виготовного так і, особливо, ремонтного наплавлення.

Висновки

1. Розроблено технологію виготовного та ремонтного наплавлення зразків з вуглецевої сталі 40Х, наплавлених порошковим дротом ПП-Нп-25Х5ФМС з підшаром з низьколегованої сталі 12Х1МФ. Неруйнівним ультразвуковим методом вимірювання напружень встановлено, що при цьому максимальні повздовжні залишкові напруження розтягу досягають значень 220...240 МПа. Після виконання ремонтного наплавлення максимальні залишкові напруження розтягу σ_x зменшуються до 60 МПа, в той же час в інших перетинах зразка рівні залишкових напружень розтягу фактично залишаються незмінними.

2. В наплавленому металі (в зносостійкому шарі та в підшарі з низьколегованої сталі) втомна тріщина розвивається нестабільно. Так, в інтер-

валі розмаху КІН $45 \dots 60$ МПа $\sqrt{\text{м}}$, коли тріщина розвивалась в металі зносостійкого шару, її швидкість постійно змінювалася в діапазоні значень $10^{-8} \dots 10^{-7}$ м/цикл. При подальшому розвитку в металі підшару швидкість росту втомної тріщини підвищується на порядок до $2 \cdot 10^{-7} \dots 2 \cdot 10^{-6}$ м/цикл в інтервалі розмаху КІН $60 \dots 100$ МПа $\sqrt{\text{м}}$. В основному металі тріщина стабільно розвивалась з постійно зростаючою швидкістю від $6 \cdot 10^{-7}$ до $7 \cdot 10^{-6}$ м/цикл до руйнування зразка при значеннях розмаху КІН $160 \dots 180$ МПа $\sqrt{\text{м}}$, що відповідає встановленій КДВР сталі 40Х.

3. Встановлено, що циклічна довговічність зразків з вуглецевої сталі 40Х, наплавлених порошковим дротом ПП-Нп-25Х5ФМС з підшаром з низьколегованої сталі 12Х1МФ в 2...3 рази нижча циклічної довговічності зразків, наплавлених без підшару. Так, циклічна довговічність зразків без підшару при рівнях максимальних напружень 500 МПа, знаходиться в діапазоні 561...1420 тис. циклів змін напружень, а циклічна довговічність бездефектних зразків з підшаром 12Х1МФ – 346...716 тис. циклів.

5. Показано, що виконання ремонтного наплавлення за схемою видалення та наступного наплавлення лише ділянок металу із втомними тріщинами дозволяє відновити циклічну довговічність до рівня вихідного стану, тобто збільшити загальну довговічність у 2 рази. При цьому руйнування відновлених зразків відбувалося віддалік від місця ремонтного наплавлення.

Список літератури/References

1. 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
2. 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: <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2013.09.006>
3. Ahn, D.-G. (2013) Hardfacing technologies for improvement of wear characteristics of hot working tools: A Review. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 14(7), 1271–1283. Doi:10.1007/s12541-013-0174-z

4. Zhang, J., Zhou, J., Tao, Y. et al. (2015) The microstructure and properties change of dies manufactured by bimetal-gradient-layer surfacing technology. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 80, 1807–1814 (2015). DOI: <https://doi.org/10.1007/s00170-015-7170-7>
5. 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 International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 88, 1289–1297. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00170-016-8679-0>
6. Vundru, C., Paul, S., Singh, R., Yan, W. (2018) Numerical analysis of multi-layered laser cladding for die repair applications to determine residual stresses and hardness. *Procedia Manufacturing*, 26, 952–961. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2018.07.122>
7. Рябцев И.А., Сенченков И.К. (2013) *Теория и практика наплавочных работ*. Киев, Екотехнологія.
8. Ryabtsev, I.A., Senchenkov, I.K. (2013) *Theory and practice of surfacing works*. Kiev, Ekotekhnologiya [in Russian].
9. Rjabcev, I.A., Senchenkov, I.K., Turyk, Je.V. (2015) *Naplavka. Materialy, tehnologii, matematicheskoe modelirovanie* [Surfacing. Materials, technologies, mathematical modeling]. Gliwice, Wydawnictwo politechniki slaskiej [in Russian].
10. Babinets, A.A., Ryabtsev, I.A. (2016) Fatigue life of multilayer hard-faced specimens. *Welding International*, 30, 4, 305–309. DOI: <https://doi.org/10.1080/01431161.2015.1058004>
11. Ryabtsev, I.O., Knysh, V.V., Babinets, A.A. et al. (2020) Fatigue life of specimens after wear-resistant, manufacturing and repair surfacing. *The Paton Welding J.*, 9, 19–25. DOI: <https://doi.org/10.37434/tpwj2020.09.03>
12. Ryabtsev, I.O., Knysh, V.V., Babinets, A.A., Solovej, S.O. (2021) Fatigue life of steel 40Kh specimens after wear-resistant surfacing with a sublayer of low-carbon steel. *Ibid*, 3, 2–8. DOI: <https://doi.org/10.37434/tpwj2021.03.01>
13. Oberg, E. et al. (1996) *Machinery's Handbook* (25th ed.), Industrial Press Inc.
14. Murakami, Yu. (1990) *Reference book on stress intensity coefficients*. In: 2 Vol. Moscow, Mir [in Russian].
15. (2004) *Пристрій контролю механічних напружень та деформацій в твердих середовищах*. Пат. UA 71637 C2.
16. Kaierle, S., Overmeyer, L., Alfred, I. et al. (2017) Single-crystal turbine blade tip repair by laser cladding and remelting. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 19, 196–199. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cirpj.2017.04.001>
17. Kim, D.-Y., Kim, D., Kang, M., Kim, Y.-M. (2017) Improvement of fatigue strength of lap fillet joints by using tandem MAG welding in a 590-MPa-grade galvanized steel sheet. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 93(9-12), 4379–4387. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00170-017-0828-6>.

FATIGUE LIFE OF SPECIMENS FROM 40KH STEEL AFTER WEAR-RESISTANT SURFACING WITH A LOW-ALLOY STEEL SUBLAYER

V.V. Knysh, S.O. Solovej, I.O. Ryabtsev, A.A. Babinets

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

E-mail: office@paton.kiev.ua

Studied was the fatigue fracture resistance of a multilayer material, in which the wear-resistant layer was deposited with PP-Np-25Kh5FMS flux-cored wire with a sublayer from a low-alloy material, deposited with PP-Np-12Kh1MF wire. The surfaced specimens design and their testing procedure simulated the operating conditions of steel mill rolls. The integrated procedure of evaluation of fatigue fracture resistance of multilayer surfaced specimens included three stages: determination of cyclic fatigue life of the specimens after fabrication surfacing; studying the cyclic crack resistance of different deposited layers; determination of fatigue life of specimens, having fatigue cracks in the deposited layer during previous testing, after their repair surfacing. It is found that the cyclic fatigue life of specimens from 40Kh carbon steel, surfaced with PP-Np-25Kh5FMS flux-cored wire with a sublayer of 12Kh1MF low-alloy steel is in the range of 346...716 thous. cycles at maximum stress level of 500 МПа. Features of fatigue fracture kinetics of the studied multilayer material were determined. It was established that the fatigue crack propagates in an unstable manner in the deposited metal (in the wear-resistant layer and low-alloy steel sublayer), constantly changing its rate and direction. It is shown that cutting out fatigue cracks and subsequent surfacing of their removal areas allows restoring the cyclic fatigue life of the specimen to the initial level, i.e. doubling the total life. 16 Ref., 4 Tabl., 7 Fig.

Keywords: arc surfacing, repair surfacing, sublayer, fatigue life, fatigue crack, stress intensity factor.

Надійшла до редакції 09.06.2021