

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

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

ІЕЗ ім. Є. О. Патона НАН України. 03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11. E-mail: [office@paton.kiev.ua](mailto:office@paton.kiev.ua)

Досліджено опір втомному руйнуванню сталі 40Х після зносостійкого наплавлення порошковим дротом ПП-Нп-25Х5ФМС з підшаром з низьковуглецевого пластичного матеріалу, сформованим дротом Св-08А. Конструкція наплавлених зразків і методика їх випробувань імітували умови експлуатації прокатних валків, для наплавлення яких широко використовується порошковий дріт ПП-Нп-25Х5ФМС. Комплексна методика оцінки опору багатошарового матеріалу втомному руйнуванню включала три етапи: встановлення циклічної довговічності зразків після виготовного наплавлення; дослідження циклічної тріщиностійкості різних шарів металу; визначення втомної довговічності зразків, які в процесі попередніх випробувань мали в напавленому шарі втомні тріщини, після ремонтного наплавлення. Встановлено, що циклічна довговічність зразків з вуглецевої сталі 40Х, наплавлених порошковим дротом ПП-Нп-25Х5ФМС з підшаром з низьковуглецевої сталі 08кп перевищує циклічну довговічність зразків, наплавлених без підшару, приблизно в 2 рази. Максимальні значення КІН ( $140 \dots 180 \text{ МПа}\sqrt{\text{м}}$ ), отримані на зразках з багатошаровим наплавленням з підшаром, в 2...3 рази перевищують максимальні значення КІН, отримані на зразках без підшару, що свідчить про доцільність застосування низьковуглецевого підшару для підвищення тріщиностійкості багатошарового матеріалу із зносостійким наплавленням. Показано, що виконання ремонтного наплавлення за схемою видалення та наступного заплатавання лише ділянок металу із втомними тріщинами тривало експлуатованих деталей не призводить до суттєвого збільшення циклічної довговічності після ремонту. Це пов'язано з тим, що після тривалої експлуатації бездефектний шар напавленого металу має значний рівень накопичених втомних пошкоджень, тому для підвищення ефективності ремонтного наплавлення рекомендовано видаляти не тільки метал навколо виявлених втомних тріщин, а весь напавлений шар на глибину виявлених втомних тріщин із подальшим відновлювальним наплавленням. Бібліогр. 18, табл. 4, рис. 7.

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

Більшість деталей та вузлів промислового обладнання металургійної та машинобудівної галузей експлуатуються в умовах дії змінного циклічного навантаження [1]. Одними з таких деталей є валки прокатних станів які, в залежності від режимів роботи, виходять із ладу через втому, поверхнєве зношування або поєднання перерахованих факторів. Наприклад, валки чорнових клітей зазнають впливу термічної втоми, що призводить до появи на поверхні валків сітки дрібних тріщин, які в подальшому можуть розвиватися як втомні тріщини. Передбачити момент зародження та швидкість розповсюдження дефектів такого роду досить складно, тому це може призвести до руйнування валка [1–6]. Щорічно на заміну зношених деталей та елементів обладнання витрачається до 5...30 % від сукупної вартості виготовленої продукції [5]. Знизити цей показник можна подовженням ресурсу пошкоджених великогабаритних деталей за рахунок проведення ремонтно-відновлювальних робіт із застосуванням наплавлення шару металу з поліпшеними експлуатаційними властивостями відносно основного металу.

Технологія виготовного чи ремонтного наплавлення може виконуватися як без наплавлення про-

міжного шару металу (підшару), так і з ним. Так, у роботі [7] приведені дані щодо технології наплавлення зразків з вуглецевої сталі 40Х, які імітують конструкцію прокатного валка, порошковим дротом ПП-Нп-25Х5ФМС без підшару. Авторами було експериментально встановлено циклічну довговічність та характеристики тріщиностійкості металу наплавлених зразків. Проте відомо, що для поліпшення зварюваності основного та зносостійкого металу, а також з метою зменшення залишкових напружень доцільно попередньо на основний метал напавляти підшар із проміжним значенням коефіцієнту температурного розширення. З цією метою часто застосовують наплавлення проміжного шару з низьковуглецевих та низьколегованих матеріалів типу Св-08А, Св-08Г2С та ін. [8]. Для визначення найбільш ефективної технології наплавлення (з підшаром або без підшару) необхідно провести порівняльну оцінку втомної довговічності багатошарових наплавлених деталей і зразків з підшаром та без підшару.

Розрахункове визначення втомної довговічності багатошарових наплавлених деталей досить ускладнено. Це пояснюється декількома факторами.

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

По-перше, наплавлення декількох шарів різного за хімічним складом металу призводить до складного напруженого стану в багатошарових зразках. Так, наприклад, внаслідок перерозподілу напружень при наплавленні послідуєчих шарів металу, первинно отримані залишкові напруження стиску можуть перетворитися в напруження розтягу, які негативно впливають на втомну довговічність [2, 9]. По-друге, зі збільшенням кількості наплавлених валиків і/або шарів на основний метал збільшується ймовірність утворення таких поодиноких дефектів як пори, включення, зашлаковки і т. д., які суттєво знижують втомну довговічність [10–12]. Тому для встановлення доцільності застосування підшару металу при наплавленні з метою підвищення довговічності багатошарових наплавлених зразків, доцільніше використовувати експериментальні методи оцінки втомної довговічності.

Таким чином, мета даної роботи – експериментальне дослідження впливу матеріалів та технологій виготовного і ремонтного наплавлення зносостійкого робочого шару та підшару на втомну довговічність багатошарових наплавлених деталей.

**Методики, технології та матеріали досліджень.** Для встановлення доцільності застосування підшару металу при наплавленні з метою підвищення втомної довговічності багатошарових наплавлених зразків використовували технологію наплавлення зразків без підшару, яка детально описана в роботах [7, 13]. Основними етапами технології виготовлення наплавлених зразків є: попередній підігрів заготовок зі сталі 40Х до 250...300 °С; автоматичне дугове наплавлення

спочатку матеріалу підшару загальною товщиною 4...5 мм та зносостійкого шару товщиною  $\approx 6$  мм; уповільнене охолодження наплавлених зразків разом з піччю.

Марки сталі основного металу і наплавленого зносостійкого шару металу (сталь 40Х та 25Х5ФМС, відповідно) при наплавленні зразків без підшару та з підшаром були однакові. Для наплавлення проміжного шару використовували суцільний низьковуглецевий дріт Св-08А, а для наплавлення зносостійкого шару – порошковий дріт ПП-Нп-25Х5ФМС діаметрами 1,8 мм. Режим наплавлення для всіх зразків був однаковим:  $I = 220...250$  А;  $U = 26...28$  В;  $V = 18$  м/год; перекриття валиків  $\approx 50$  %. За наведеною вище технологією виготовляли 3 серії призматичних зразків розмірами 350×40×20 мм по 3...5 зразків в кожній серії. Хімічний склад і механічні властивості матеріалів, використаних у роботі, наведено в табл. 1 і 2 [14].

Першу серію зразків випробували на втому до їх повного руйнування або до досягнення бази випробувань  $2 \cdot 10^6$  циклів змін напружень. Дослідження на втому проводили на випробувальній сервогідроліній машині УРС-20 при трьохточковому згинанні з асиметрією циклу  $R_\sigma = 0$  і частотою 5 Гц в умовах регулярного навантаження. Відстань між опорами складала 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 з радіусом 0,25 мм. Після цього при

Таблиця 1. Хімічний склад основного й наплавленого металів [14]

Марка матеріалу	Масова частка елементів, %							
	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	-	-	$\leq 0,035$	$\leq 0,035$
Св-08А*	0,05...0,12	0,2...0,4	$\leq 0,03$	$\leq 0,10$	-	-	$\leq 0,04$	$\leq 0,04$
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	$\leq 0,04$	$\leq 0,04$
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	$\leq 0,04$	$\leq 0,04$

Примітки. \*Дана масова частка елементів у наплавленому металі. \*\*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 механічними властивостями), відповідно сталей 08кп та 4Х5МФС.

Таблиця 2. Механічні властивості основного й наплавленого металів [14]

Марка матеріалу	Механічні властивості (після нормалізації)					
	Умовна межа плинності $\sigma_{0,2}$ , МПа	Межа міцності $\sigma_B$ , МПа	Відносне подовження $\delta$ , %	Відносне звуження $\psi$ , %	Ударна в'язкість KCU, Дж/см <sup>2</sup>	Твердість НВ
40X	345	590	12,5	52	7,5	174...217
08кп*	196	320	33	60	–	$\leq 131$
4Х5МФС*	1570	1710	12	54	51	444...478

Примітки. \*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 механічними властивостями), відповідно сталей 08кп та 4Х5МФС.

трьохточковому циклічному згинанні з максимальним рівнем прикладених напружень в перерізі зразка 400 МПа вирощували втомну тріщину до досягнення на одній з бокових граней довжини 1 мм. Отриманий в результаті цього надріз з тріщиною приймали за вихідну втомну тріщину у випробувальному зразку, який в подальшому використовувався для досліджень кінетики втомного руйнування. При проведенні втомних випробувань на циклічну тріщиностійкість довжину втомної тріщини, що розвивалась, вимірювали за допомогою оптичного мікроскопа з ціною поділки рівною 0,01 мм на двох бокових гранях зразка та усереднювали. Випробування проводили до повного руйнування зразків.

На зразках третьої серії досліджували ефективність застосування ремонтного наплавлення для збільшення залишкової циклічної довговічності зразків, які мають в наплавленому зносостійкому шарі тріщини втоми. Зразки випробовували на втому при трьохточковому згинанні з асиметрією циклу  $R_{\sigma} = 0$  до утворення тріщини втоми глибиною 10...12 мм (коли тріщина пройшла крізь наплавлені шари і заглибилася в основний метал). Після цього проводили ремонт методом дугового наплавлення, який складається з повного механічного видалення втомної тріщини і металу навколо неї та наступного заплавлення утвореної розділки. Більш детально технологія ремонтного наплавлення описана в роботі [7].

Для дослідження характеру розповсюдження втомних тріщин у наплавлених зразках після їх ремонту використовували металографічний мікроскоп MIM-7, обладнаний відеоокуляром SIGETA CMOS 3100. Даний відеоокуляр поставляється разом із програмним забезпеченням Tourview, за допомогою якого виконували цифрову обробку отриманих фотографій та розрахунок розмірів тріщин при збільшеннях  $\times 0... \times 320$ . Перед проведенням вимірювань виконували калібрування мікроскопа за допомогою об'єкта-мікрометра.

Крім того, перед випробуванням на втому у зразках після ремонтного наплавлення проводили вимірювання залишкових напружень неруйнівним акустичним методом за допомогою портативного ультразвукового пристрою контролю напружень [15].

**Результати експериментів і їх обговорення.** Спочатку два зразки першої серії з вуглецевої сталі 40Х, наплавлених порошковим дротом ПП-Нп-25Х5ФМС з підшаром з низьковуглецевої сталі 08кп, випробовували при рівнях максимальних напружень 500 МПа, характерних зразкам, виготовленим без підшару [11]. Після напрацювання зразками  $2 \cdot 10^6$  циклів змін напружень тріщин втоми виявлено не було. При цьому слід відмітити, що

руйнування зразків без підшару при рівнях максимальних напружень 500 МПа відбувалося в діапазоні від 560800 до 1420100 циклів змін напружень [11]. Інші три зразки, наплавлені з підшаром, випробовували при підвищених до 600 МПа рівнях максимальних напружень. Результати випробувань на втому першої серії зразків наведено у табл. 3.

Передчасне руйнування зразка № 4 першої серії після 775100 циклів було обумовлено наявністю дефекту наплавлення в зоні переходу металу підшару на метал зносостійкого шару. Таким чином, бездефектні зразки з підшаром з низьковуглецевої сталі витримали більше  $2 \cdot 10^6$  циклів змін напружень при максимальних напруженнях 500...600 МПа. Отже, застосування підшару з низьковуглецевої сталі при наплавленні зносостійкого шару дозволило підвищити довговічність зразків після виготовлення наплавлення практично у 2 рази, в порівнянні з наплавленням зразків без пластичного підшару.

На трьох зразках другої серії від гострого надрізу в зносостійкому шарі металу вирощували вихідну тріщину 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  $N$ .

Встановлено, що магістральна тріщина переважно розповсюджується по межі сплавлення окремих валиків. В процесі втомного руйнування від змінних навантажень в зонах переходу одного шару металу в інший спостерігалися незначні бічні відгалуження від магістральної тріщини, які розвивалися вдовж лінії сплавлення зносостійкого шару металу з металом підшару (рис. 1) та вдовж лінії сплавлення металу підшару з основним металом (рис. 2). Після проходження тріщиною зносостійкого шару металу та підшару з низьковуглецевої сталі руйнування зразків відбувалося по основному металу.

Це може бути пояснене декількома факторами. По-перше, в зоні перекриття сусідніх наплавлених валиків розташована зона хімічної та структурної неоднорідності, що негативно впливає на властивості матеріалу [1]. По-друге, при багатоваликовому

**Таблиця 3. Результати втомних випробувань зразків першої серії**

Номер зразка	Максимальні напруження циклу, МПа	Циклічна довговічність до руйнування, цикли
1	500	>2000000
2	500	>2000000
3	600	>2000000
4	600	775100*
5	600	>2000000

\*Дефект у зоні сплавлення між підшаром та зносостійким шаром.



багатошаровому наплавленні можуть виникати гострі кути на межі сплавлення сусідніх валиків і шарів, які будуть концентраторами напружень та, відповідно, ініціювати зародження бічних тріщин по лінії сплавлення [16, 17]. Після проходження тріщиною зносостійкого шару металу та підшару з низьковуглецевої сталі руйнування зразків відбувалося по основному металу. Отже, як і для зразків, наплавлених без підшару, встановлено, що лінії сплавлення окремих валиків та шарів відіграють важливу роль у процесі втомного руйнування наплавлених деталей, оскільки тріщини здебільшого розповсюджуються або по межі сплавлення окремих валиків, або безпосередньо біля цієї межі (рис. 2). Єдина відмінність цих двох технологій наплавлення стосовно розвитку втомних тріщин полягає в утворенні незначних бічних відгалужень від магістральної тріщини (рис. 1, 2).

Для побудови кінетичних діаграм втомного руйнування (КДВР) проводили розрахунок значень коефіцієнту інтенсивності напружень (КІН) за виразами для трьохточкового навантаження призматичного зразка з поперечною крайовою тріщиною [18]. Експериментальна залежність швидкості росту втомних тріщин від розмаху КІН в різних шарах металу багатошарового зразка приведена у вигляді КДВР (рис. 3). Отримані дані свідчать, що при заданих рівнях максимальних напружень 400 МПа діапазон зміни швидкості росту втомних тріщин в багатошаровому матеріалі від-

повідає лінійній ділянці КДВР, а відповідно, може бути описаний степеневою залежністю Периса  $dl/dN = C(\Delta K)^m$  з параметрами  $C = 5,75 \cdot 10^{-17}$  та  $m = 4,87$ . Встановлені максимальні значення КІН (140...180 МПа $\sqrt{м}$ ) на зразках з багатошаровим наплавленням з підшаром в 2...3 рази перевищують максимальні значення КІН, отримані на зразках без підшару [7], що свідчить про доцільність застосування низьковуглецевого підшару для підвищення тріщиностійкості багатошарового матеріалу зі зносостійким наплавленням.

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 втомної глибиною 10...12 мм, які в подальшому підлягали усуненню за допомогою ремонтного наплавлення. Після виконання ремонтного наплавлення проводили вимірювання залишкових напружень неруйнівним ультразвуковим методом. 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. Вимірювання залишкових напружень, орієнтованих вздовж та поперек зразка, проводили від лінії сплавлення низьковуг-

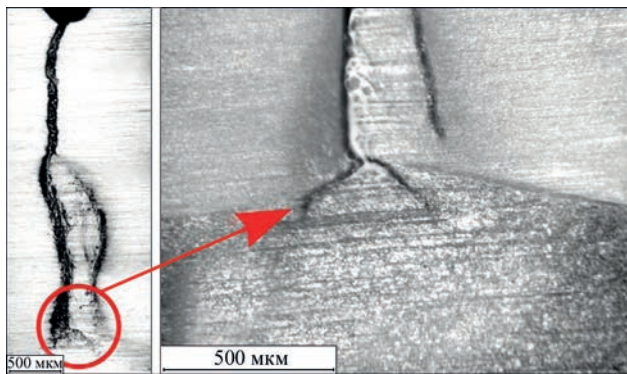


Рис. 1. Розгалуження втомної тріщини в зоні сплавлення зносостійкого шару та пластичного підшару

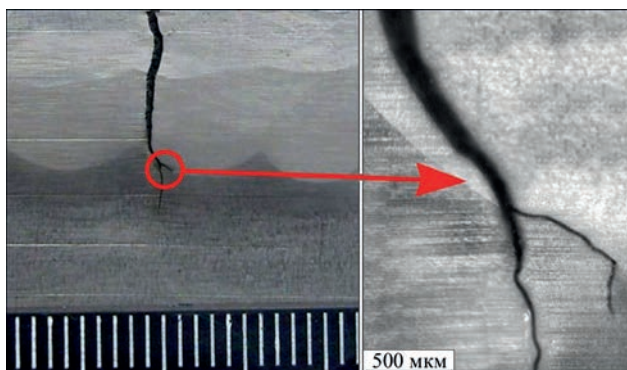


Рис. 2. Розгалуження втомної тріщини в зоні сплавлення підшару з основним металом

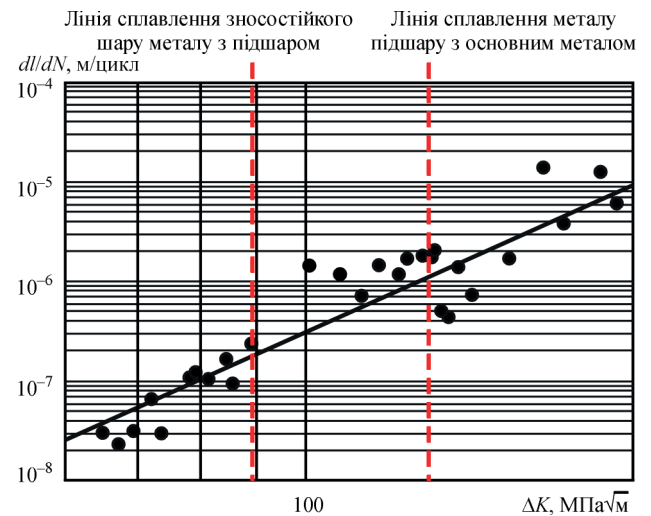


Рис. 3. Кінетична діаграма втомного руйнування багатошарового матеріалу, сформованого зносостійким наплавленням з використанням підшару з низьковуглецевої сталі

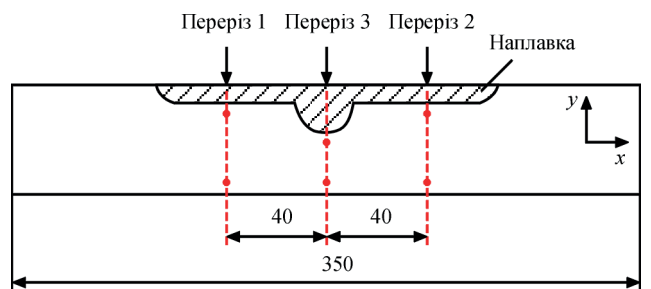


Рис. 4. Схематичне зображення місць вимірювання залишкових напружень в зразку після ремонтного наплавлення

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
9	500	2127600	616300	2743900
10	600	461600	86900	1331100
11	600	2024700	109600	2134300

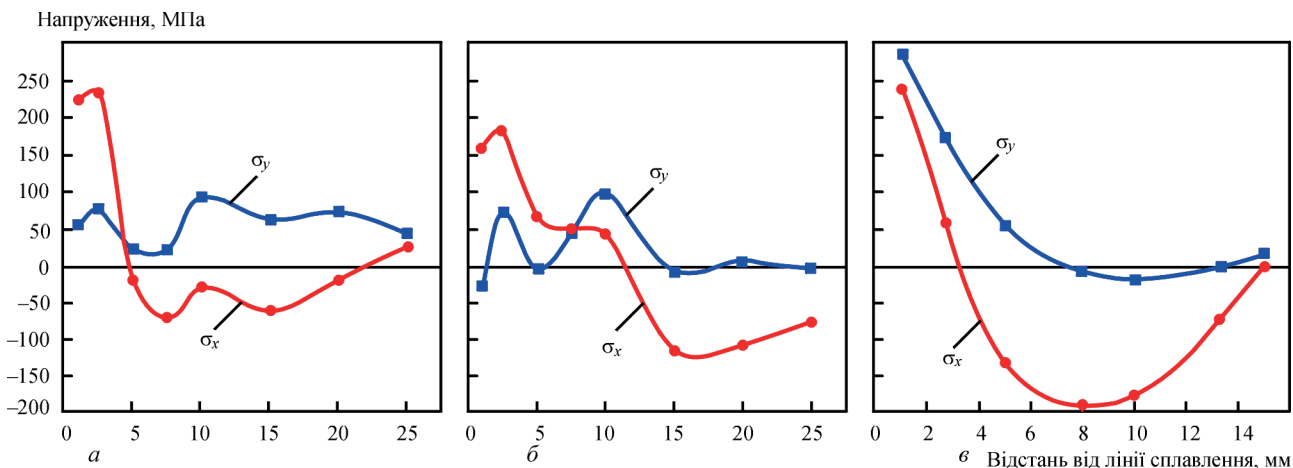


Рис. 5. Розподіл залишкових напружень, орієнтованих вздовж  $\sigma_x$  та поперек  $\sigma_y$  зразка після ремонтного наплавлення в перерізі 1 (а), 2 (б) та 3 (в)

лецевого підшару з основним металом (визначали за макроструктурою) вглиб металу. Приведені на епюрах значення залишкових напружень є усередненими по товщині зразка.

Використання ультразвукових кварцових датчиків поздовжніх та зсувних хвиль з базою виміру  $7 \times 7$  мм не дозволило провести вимірювання напружень ближче ніж 1 мм до лінії сплавлення низьковуглецевого підшару з основним металом. Максимальні повздовжні залишкові напруження розтягу  $\sigma_x$  знаходяться безпосередньо в зоні виконання ремонтного наплавлення і складають біля 240 МПа на відстані 1 мм від лінії сплавлення (рис. 5, б). На відстані 40 мм від місця проведення ремонтного наплавлення залишкові повздовжні напруження розтягу  $\sigma_x$  на відстані 1 мм від лінії сплавлення знаходяться у діапазоні 160...220 МПа (рис. 5, а, в). З подальшим віддаленням від лінії сплавлення вглиб металу формується зона залишкових напружень стиску, які досягають значень до  $-70...-120$  МПа в перерізах 1, 2 та до  $-200$  МПа в перерізі 3 (в зоні виконання ремонтного наплавлення). Значний об'єм наплавленого металу при виконанні ремонтного наплавлення призводить до формування в цій зоні більш високих, у порівнянні з виготовковим наплавленням, поперечних залишкових напружень розтягу на рівні 280 МПа (рис. 5).

Після вимірювання залишкових напружень зразки третьої серії випробовували на втому при трьохточковому віддільному циклічному згинанні. Циклічну довговічність зразків до та після ремонтного наплавлення наведено в табл. 4.

Після виконання ремонтного наплавлення зародження та розвиток тріщин втоми в усіх зразках третьої серії відбувалося віддалік від місця ремонту. Як і у випадку виготовного наплавлення, процес втомного руйнування відновлених наплавленням деталей відбувався або по межі сплавлення окремих валиків, або безпосередньо біля цієї межі, очевидно, внаслідок хімічної та структурної неоднорідності в даній зоні (рис. 6, а).

Низька циклічна довговічність зразка № 10 до утворення наскрізної тріщини довжиною 10...12 мм (табл. 4) обумовлена технологічним дефектом наплавлення, який сприяв передчасній появі тріщини всередині зразка (на відстані 5 мм від поверхні) в зоні сплавлення між окремими шарами металу (рис. 7). В подальшому тріщина спочатку розвивалася в зносостійкому металі до виходу на поверхню, а потім – в низьковуглецевому підшарі. Після виконання ремонтного наплавлення зразка № 10 зародження та розвиток нової тріщини втоми відбулося в 10...20 мм від місця ремонту.

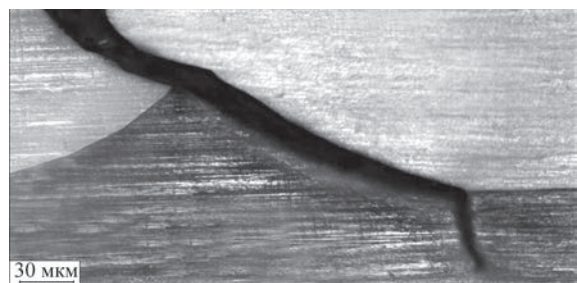


Рис. 6. Зовнішній вигляд ділянки зразка після ремонтного наплавлення з утвореною втомною тріщиною, яка проходить по межі між сусідніми наплавленими валиками

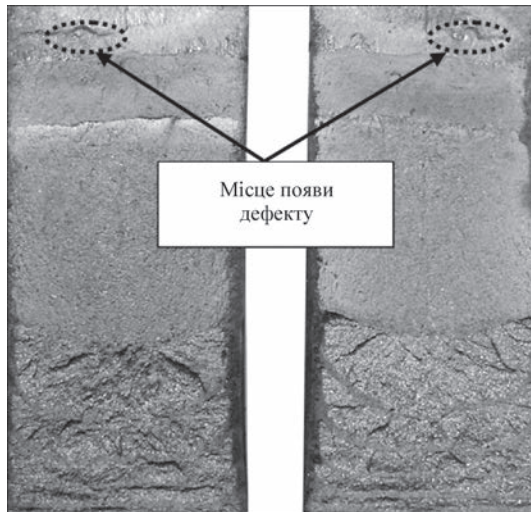


Рис. 7. Зовнішній вигляд поверхні зламу зразка №10 із дефектом по межі сплавлення між окремими шарами наплавленого металу, від якого утворилася втомна тріщина

В цілому на зразках № 9 та № 11 (табл. 4) підтверджено, 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 лише ділянки виробу, пошкодженої тріщиною втоми, без повного видалення наплавленого шару металу неефективно.

Втім, якщо розглянути повний цикл існування наплавленої деталі (виготовне наплавлення, експлуатація, ремонтне наплавлення, експлуатація), запропонована технологія ремонтного наплавлення із застосуванням пластичного підшару дозволила збільшити загальну довговічність наплавленого зразка приблизно у 1,4 рази у порівнянні зі зразками, наплавленими без підшару [7].

Не зважаючи на це, враховуючи отримані вище дані, для підвищення ефективності ремонтного наплавлення при ремонті тривало експлуатованих виробів та 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. Розроблено технологію виготовного та ремонтного наплавлення зразків з вуглецевої сталі 40Х, наплавлених порошковим дротом ПП-Нп-25Х5ФМС з підшаром з низьковуглецевої сталі 08кп. Неруйнівним ультразвуковим методом вимірювання напружень встановлено, що максимальні повздовжні залишкові напруження розтягу знаходяться безпосередньо в зоні виконання ремонтного наплавлення і

складають біля 240 МПа на відстані 1 мм від лінії сплавлення низьковуглецевого підшару з основним металом. На відстані 40 мм від місця проведення ремонтного наплавлення повздовжні залишкові напруження розтягу на відстані в 1 мм від лінії сплавлення знаходяться в діапазоні 160...220 МПа. Значний об'єм наплавленого металу при виконанні ремонтного наплавлення призводить до формування в цій зоні більш високих, у порівнянні з виготовним наплавленням, поперечних залишкових напружень розтягу на рівні 280 МПа.

2. Встановлено, що магістральна тріщина переважно розповсюджується по межі сплавлення окремих валиків. В процесі втомного руйнування в зонах переходу одного шару металу в інший спостерігалися незначні бічні відгалуження від магістральної тріщини, які розвивалися вдовж лінії сплавлення зносостійкого шару металу з металом підшару та вдовж лінії сплавлення металу підшару з основним металом. Вважаємо, що така поведінка спричинена наявністю зони хімічної та структурної неоднорідності в місцях перекриття сусідніх наплавлених валиків, яка негативно впливає на властивості матеріалу та концентраторів напружень, обумовлених геометрією наплавлених сусідніх валиків, що необхідно враховувати при розробленні техніки та технології виготовного та ремонтного наплавлення.

3. Експериментально досліджено швидкість росту втомних тріщин в різних шарах металу багатошарового матеріалу та побудована кінетична діаграма втомного руйнування (КДВР). Встановлено, що діапазон зміни швидкості росту втомних тріщин в багатошаровому матеріалі відповідає лінійній ділянці КДВР, а відповідно може бути описаний степеневною залежністю Периса  $dl/dN = C(\Delta K)^m$  з параметрами  $C = 5,75 \cdot 10^{-17}$  та  $m = 4,87$ . Максимальні значення КІН (140...180 МПа $\sqrt{м}$ ), отримані на зразках з багатошаровим наплавленням з підшаром, в 2...3 рази перевищують максимальні значення КІН, отримані на зразках без підшару, що свідчить про доцільність застосування низьковуглецевого підшару для підвищення тріщиностійкості багатошарового матеріалу із зносостійким наплавленням.

4. Встановлено, що циклічна довговічність зразків з вуглецевої сталі 40Х, наплавлених порошковим дротом ПП-Нп-25Х5ФМС з підшаром з низьковуглецевої сталі 08кп перевищує циклічну довговічність зразків, наплавлених без підшару приблизно в 2 рази. 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 при рівнях максимальних напружень 500...600 МПа перевищує 2000 тис. циклів.



5. Показано, що виконання ремонтного наплавлення за схемою видалення та наступного заплавлення лише ділянок металу із втомними тріщинами тривало експлуатованих деталей 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 для підвищення ефективності ремонтного наплавлення рекомендовано видаляти не тільки метал навколо виявлених втомних тріщин, а весь наплавлений шар на глибину виявлених втомних тріщин із подальшим відновлювальним наплавленням.

### 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: <https://doi.org/10.1007/bf03266748>
2. 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>
3. Gao, F., Zhou, J., Zhou, J. et al. (2017) Microstructure and properties of surfacing layers of dies manufactured by bi-metal-gradient-layer surfacing technology before and after service. *The International J. of Advanced Manufacturing Technology*, 88, 1289–1297. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00170-016-8679-0>
4. Zhang, J., Zhou, J., Tao, Y. et al. (2015) The microstructure and properties change of dies manufactured by bi-metal-gradient-layer surfacing technology. *Ibid*, 80, 1807–1814 (2015). DOI: <https://doi.org/10.1007/s00170-015-7170-7>
5. Ahn, D.-G. (2013) Hardfacing technologies for improvement of wear characteristics of hot working tools: A Review. *International J. of Precision Engineering and Manufacturing*, 14 (7), 1271–1283. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12541-013-0174-z>
6. 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>
7. 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>
8. 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].
9. Korotkov V.A. (2017) More efficient surfacing. *Russian Engineering Research*, 37, 701–703. DOI: <https://doi.org/10.3103/S1068798X17080093>
10. 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. *International J. of Fatigue*, 123, 238–247. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2019.02.028>
11. 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: <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2017.12.374>
12. Zerst, 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: <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2017.11.106>
13. 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. DOI: <https://doi.org/10.15407/tpwj2019.02.05>
14. Oberg, E. et al. (1996) *Machinery's Handbook (25th ed.)*, Industrial Press Inc.
15. (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].
16. Kaierle, S., Overmeyer, L., Alfred, I. et al. (2017) Single-crystal turbine blade tip repair by laser cladding and remelting. *CIRP J. of Manufacturing Sci. and Technology*, 19, 196–199. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cirpj.2017.04.001>
17. Caccese, V., Blomquist, P. A., Berube et al. (2006) Effect of weld geometric profile on fatigue life of cruciform welds made by laser/GMAW processes. *Marine Structures*, 19 (1), 1–22. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.marstruc.2006.07.002>
18. Murakami, Yu. (1990) *Reference book on stress intensity coefficients*. In: 2 Vol. Moscow, Mir [in Russian].

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

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

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

E-mail: [office@paton.kiev.ua](mailto:office@paton.kiev.ua)

The resistance to fatigue fracture of steel 40Kh after wear-resistant surfacing using PP-NP-25Kh5FMS flux-cored wire with a sublayer of a low-carbon plastic material formed by Sv-08A wire was investigated. The design of the deposited specimens and the procedure of their testing simulated the operating conditions of the mill rolls, for the surfacing of which PP-NP-25Kh5FMS flux-cored wire is widely used. A comprehensive procedure for evaluating the resistance of multilayer material to fatigue fracture included three stages: establishment of cyclic life of specimens after manufacturing surfacing; study of cyclic crack resistance of different metal layers; determination of fatigue life of specimens, which in the course of preliminary tests had fatigue cracks in the deposited layer after repair surfacing. It was established that the cyclic life of the specimens of carbon steel 40Kh, deposited using PP-NP-25Kh5FMS flux-cored wire with a sublayer of low-carbon steel 08kp (rimmed) exceeds the cyclic life of the specimens deposited without a sublayer, approximately by 2 times. The maximum values of SIF (140...180 MPa√m) obtained on the specimens with a multilayer surfacing with a sublayer, are 2... 3 times higher than the maximum values of SIF obtained on the specimens without a sublayer, which indicates the feasibility of using a low-carbon sublayer to increase the crack resistance of a multilayer material with wear-resistant surfacing. It was shown that performance of repair surfacing according to the scheme of removal and a subsequent surfacing of only areas of the metal with fatigue cracks of long-term operating parts does not lead to a significant increase in the cyclic life after repair. This is related to the fact that after long operation, the defect-free layer of deposited metal has a significant level of accumulated fatigue damages. Therefore, to increase the efficiency of repair surfacing, it is recommended to remove not only the metal around the detected fatigue cracks, but the entire deposited layer to the depth of detected fatigue cracks with the subsequent restoration surfacing. 18 Ref., 4 Tabl., 7 Fig.

*Keywords:* arc surfacing, repair surfacing, plastic sublayer, fatigue life, fatigue cracks, stress intensity factor

Надійшла до редакції 05.02.2021