

УДК 620.178.3:620.184.6:621.791.92

ОБҐРУНТУВАННЯ ВИБОРУ МАТЕРІАЛІВ ДЛЯ НАПЛАВЛЕННЯ НА ОСНОВІ ФРАКТОГРАФІЧНОГО АНАЛІЗУ ВТОМНИХ ЗЛАМІВ

І. О. РЯБЦЕВ¹, А. А. БАБІНЕЦЬ¹, О. З. СТУДЕНТ²,
В. В. КНИШ¹, С. О. СОЛОВЕЙ¹

¹ Інститут електрозварювання ім. Є. О. Патона НАН України, Київ;

² Фізико-механічний інститут ім. Г. В. Карпенка НАН України, Львів

Фрактографічно проаналізовано вплив типу матеріалів для одно- і багат шарового наплавлення зразків на їх схильність до експлуатації за багатоциклової втоми. Показано, що втомна витривалість та характер руйнування наплавлених зразків залежить від проміжного підшару та його матеріалу. Однорідний в'язкий волокнистий рельєф зламу переважав у межах наплавлених шарів і основного металу на зразках з підшаром із пластичної маловуглецевої сталі типу 08кп та зносостійким функціональним шаром (за складом і властивостями його прототип інструментальна сталь 25Х5ФМС). Використання для підшару сталі 12Х1МФ спричинило кристалічний рельєф зламу у всьому наплавленому шарі та високу неоднорідність на межі сплавлення робочого шару з підшаром, що знизило втомну витривалість таких зразків. Щоб підвищити втомну витривалість наплавлених деталей, рекомендовано перед формуванням функціонального шару наносити підшар з низьковуглецевих пластичних сталей.

Ключові слова: *дугове багат шарове наплавлення, пластичний підшар, руйнування, втомна витривалість, фрактографічний аналіз.*

The effect of the type of materials for single- and multilayer surfacing of specimens on their serviceability under fatigue loading is analyzed by the fractographic method. It is shown that the fatigue life and the fractographic features of the deposited specimens depend on the presence of an intermediate sublayer and the material used for its deposition. The homogeneous ductile fibrous-like relief of the fatigue fracture surface prevailed within the deposited layers and the base metal on specimens with a sublayer of 08kp plastic low-carbon steel and a wear-resistant functional layer (tool steel grade 25X5ФМС is its prototype in terms of composition and properties). Using the 12X1МФ steel for the sublayer leads to the emergence the crystal-like relief of the fracture surface inside all deposited layer and high inhomogeneity along the fusion line of the functional layer and sublayer, which causes low fatigue life of such specimens. To increase the fatigue life of the deposited parts, it is recommended to apply a sublayer of low-carbon plastic steels before the functional layer formation.

Keywords: *arc multilayer surfacing, plastic sublayer, fracture, fatigue life, fractographic analysis.*

Вступ. Для підвищення довговічності деталей та інструментів, експлуатованих за зносу [1], циклічних термомеханічних навантажень, на етапі їх виготовлення чи ремонтного відновлення на їх поверхню наплавають шари зносостійкого металу [2–6]. Зростання стійкості до корозійного впливу досягають наплавленням на робочі поверхні нержавних сталей типу 13Cr4Ni1Mo, 12Cr6Ni2Mo [7]. Найчастіше використовують електродні матеріали, завдяки яким отримують наплавлений метал, що за властивостями відповідає середньо- або високолегованим

теплостійким інструментальним сталям (25X5ФМС, 30X4В2М2ФС, 35В9Х3СФ тощо) [6, 8]. Для підвищення когезії основного та наплавленого металів використовують підшари, наплавлені високопластичним матеріалом [2, 6]. Комплексно досліджено вплив наплавлення з підшаром на втомну довговічність зразків [6, 8, 9]. Так, за наплавлення сталі 40X дротом марки Св-08А в підшарі отримали пластичну низьковуглецеву сталь типу 08кп. Завдяки цьому втомна витривалість зразків із функціональним зносостійким шаром, наплавленим порошковим дротом ПП-Нп-25Х5ФМС, зросла в 2–2,5 рази порівняно зі зразками, наплавленими без підшару. Водночас втомна витривалість зразків з підшаром, наплавленим порошковим дротом ПП-Нп-12Х1МФ (метал підшару відповідав низьколегованій теплотривкій сталі 12Х1МФ), була нижчою порівняно зі зразками, наплавленими без підшару, або з підшаром, наплавленим дротом Св-08А [10, 11]. Можливо нижчі характеристики пластичності наплавленої сталі 12Х1МФ (зокрема її видовження) негативно вплинули на залишкові напруження у наплавленому шарі та на характер його руйнування. Крім того, хімічні та структурні макронеоднорідності, які утворюються вздовж ліній розмежування сталей 40Х (як основи) і 12Х1МФ (як підшару) та 25Х5ФМС (як функціонального шару), могли негативно впливати на втомну витривалість наплавлених зразків з таким підшаром. Отже, для апробації різних варіантів наплавлення поверхні валиків для виготовлення фасонної металлопродукції (зокрема роликів машин безперервного литва заготовок [12–14]), які експлуатують за умов активного зносу та циклічних термомеханічних навантажень, чи для їх відновлення після тривалого застосування важливо враховувати їхню пошкодженість [15–18] та оцінити її вплив на втомну витривалість як важливу характеристику робоздатності таких елементів. Проте вплив використаних матеріалів для підшару та технології його отримання на втомну витривалість наплавлених деталей вивчені ще недостатньо.

Мета роботи – встановити зв'язок макрофрактографічних особливостей втомного рельєфу зразків з наплавленим зносостійким функціональним шаром та їх втомною довговічністю з урахуванням способу його нанесення (безпосередньо на основу чи на підшар) та матеріалу підшару.

Методи досліджень. Утомні випробування виконували на сервогідролінійній машині УРС-20 за віднульового циклу навантаження частотою 5 Hz з максимальним напруженням не вищим за 500 МПа. Призматичні зразки 300×40×20 mm навантажували до їх руйнування за схемою триточкового згину (віддаль між опорами становила 250 mm). Перед наплавленням у центральній частині зразків зі сталі 40Х на довжині 150 mm вибирали метал на глибину до 10 mm (рис. 1). Отримане заглиблення наплавляли різними матеріалами з різною послідовністю нанесення шарів, після чого зразки шліфували з усіх боків. Методичні деталі випробувань та наплавлення детально описані раніше [8–10].

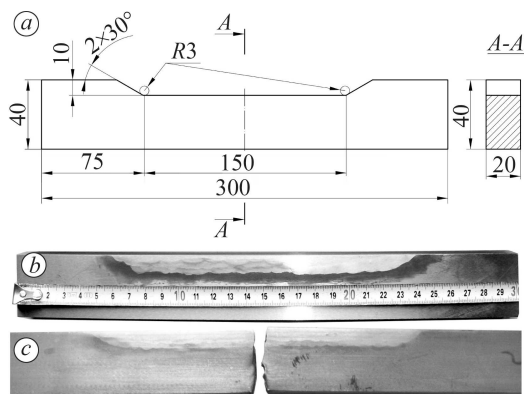


Рис. 1. Заготовка зразка з основного металу (сталь 40Х), підготованого для наплавлення (а) та вигляд зразків перед (b) та після (c) втомних випробувань.

Fig. 1. A specimen from the base metal (40X steel) prepared for surfacing (a) and the appearance of the specimens before (b) and after (c) fatigue tests.

Дослідили п'ять серій зразків: однорідні (без наплавлення) – № 1 зі сталі 40X (як прототип основного металу) і № 2 – зі сталі 4X5ФМС (як прототип наплавленого функціонального шару металу); № 3 – одношарові (без підшару) з наплавленням сталі 40X порошковим дротом ПП-Нп-25X5ФМС та № 4 і 5 – двошарові, наплавлені ПП-Нп-25X5ФМС поверху підшарів відповідно із низьковуглецевої сталі типу 08кп, наплавленої суцільним дротом Св-08А, або з низьколегованої сталі 12Х1МФ, наплавленої порошковим дротом ПП-Нп-12Х1МФ.

Кількісний аналіз ознак утомного руйнування застосовують здебільшого на мікроскопічному рівні, зокрема, для оцінок характерних елементів рельєфу таких, як крок утомних боріздов [19]. Макрофрактографічні особливості руйнування зразків усіх п'яти серій досліджували після їх обстеження за оптичних збільшень. Зазвичай якісно аналізують: загальний вигляд і характер руйнування металу усіх зон; структурні ознаки зламів через недосконалість технології наплавлення; дефекти структури (неметалеві включення тощо); макродефекти, зумовлені технологією виготовлення металу (флокени, пори тощо) або утворені під час руйнування (шиферність, розшарування тощо); дендрити та ліквідаційні неоднорідності [19–24]. Під час аналізу рельєфу досліджуваних втомних зламів брали до уваги три основні ознаки [20]: волокнистість або кристалічність; неоднорідності в наплавленому металі; дефекти між суміжними наплавленими прошарками. Зони волокнистого рельєфу класифікували як матові, шорсткі, з ознаками пластичної деформації (витягування, гребені відриву) і пов'язували їх із високоенергетичним в'язким руйнуванням. Зони кристалічного рельєфу формувалися з блискучих крихких фасеток, обумовлених зернистою структурою металу [20–24]. Аналізували також відмінність рельєфів у межах кожної із цих зон за кольором і шорсткістю на переходах між ними.

Результати та їх обговорення. Відомо, що сталі з однорідним волокнистим рельєфом утомного зламу характеризуються високою ударною в'язкістю і пластичністю, а з кристалічним – низькою [20–24]. Причому, що більші за розмірами фасетки відколів на кристалічному зламі, то нижчі ці показники. Характер зламу залежить від кількісного і якісного вмісту елементів легування в сталі, які визначають схильність деталей до наскрізного прогартовування з утворенням структури мартенситу та мінімальною схильністю до оборотної відпускнуї крихкості. Серед елементів легування нікель найефективніше сприяє формуванню волокнистого зламу, а позитивний вплив хрому проявляється за його вмісту до 2%. Молибден і меншою мірою вольфрам сприяють прогартовуванню сталей та подрибненню аустенітного зерна в їх структурі та суттєво пригнічують розвиток оборотної відпускнуї крихкості. Тому молибден є обов'язковим елементом легування сталей, призначених для виробів з великим перерізом. Формування волокнистого рельєфу на втомному зламі ускладнюється з підвищенням вмісту кремнію й марганцю в сталі [20]. Такий аналіз дав змогу визначити якісний склад елементів легування, необхідних для забезпечення наплавленому шару необхідних функціональних властивостей. Механічні характеристики наплавлених матеріалів та їх однорідних прототипів наведено в табл. 1. Очевидно, що найвищі характеристики міцності (границі плинності $\sigma_{0,2}$ і міцності σ_B) та твердість *НВ* і практично найнижчі характеристики пластичності (відносні видовження δ та звуження ψ) має сталь 4X5ФМС (прототип функціонального шару), що мало би забезпечити необхідну зносостійкість наплавленому шару. Найвищу пластичність має матеріал підшару зі сталі 08кп, що забезпечить йому високу здатність до релаксації напружень та гальмування росту тріщин, які можуть виникнути у функціональному шарі. За пластичністю підшар зі сталі 12Х1МФ суттєво поступається підшару зі сталі 08кп.

Результати випробувань на втому зразків однорідних та з різними варіантами наплавлення наведені в табл. 2. Попри те, що зовнішній функціональний шар в усіх випадках наплавляли порошковим дротом ПП-Нп-25Х5ФМС, очевидно, що максимально позитивний вплив на втомну довговічність отримали за наплавлення з підшаром, нанесеним сталевим дротом 08кп, а мінімальний – з підшаром зі сталі 12Х1МФ. Найважливіше, що за довговічністю наплавлений підшар зі сталі 08кп забезпечив кращий результат, ніж сталь 40Х без наплавлення. Це свідчить про придатність такого технологічного підходу не лише для відновлення зношених, але і для підвищення роботоздатності нових деталей, для яких важливо забезпечити комплекс високих характеристик (міцність, зносостійкість, втомна довговічність, здатність релаксувати напруження і запобігати поширенню тріщин в основний метал).

Таблиця 1. Механічні властивості основного й напавленого металів [20]

Марка матеріалу	Механічні властивості (після нормалізації)					
	$\sigma_{0,2}$	σ_B	δ	ψ	$KCU, J/cm^2$	Твердість, HV
	MPa		%			
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 про механічні властивості металу, напавленого суцільним Св-08А та порошковим ПП-Нп-25Х5ФМС дротами. Тому ці результати стосуються сталей 08кп та 4Х5МФС як близьких за хімічним складом і механічними властивостями.

Таблиця 2. Утомна довговічність аналізованих варіантів зразків за максимального рівня напружень у циклі навантаження 500 МПа

Варіант напавлення	Тип напавлення зразка / матеріал	Кількість циклів навантаження зразків до руйнування, cycles
1	Однорідний / сталь 40Х	$1,1 \cdot 10^6 \dots 1,25 \cdot 10^6$
2	Однорідний / сталь 4Х5МФС	$6,2 \cdot 10^5 \dots 7,3 \cdot 10^5$
3	Одношаровий / сталь 40Х (основа) + 25Х5ФМС (напавлений функціональний шар)	$50 \cdot 10^4 \dots 59,8 \cdot 10^4$
4	Двошаровий / сталь 40Х (основа) + 12Х1МФ (підшар) + 25Х5ФМС (функціональний шар)	$34,6 \cdot 10^4 \dots 71,68 \cdot 10^4$
5	Двошаровий / сталь 40Х (основа) + 08кп (підшар) + 25Х5ФМС (функціональний шар)	$1,6 \cdot 10^6 \dots 1,825 \cdot 10^6$

На основі візуального огляду на зламах зразків виділяли три зони з характерним рельєфом: блискучу (“притерту”) як зону осередку зародження тріщини, зону її стабільного поширення та зону спонтанного руйнування (долам). Їх відрізняли за рельєфом, який був мінімальним у зоні зародження руйнування, наростає у перехідній зоні стабільного росту втомної тріщини і був максимальним у зоні її неконтрольованого росту. Зона докритичного руйнування найбільша на зразку з підшаром зі сталі 08кп, в якому стабільний ріст утомної тріщини відбувався не лише в зоні напавлення, але і в основному металі. Тоді як, використо-

вуючи інші варіанти наплавлення, попри однаковий високоміцний функціональний шар злам за переходу до основного металу практично відразу ставав крихким, що є ознакою спонтанного руйнування зразка.

Аналіз зламів однорідних та наплавлених зразків за оптичних збільшень засвідчив їх відмінності і за макрорельєфом, і за нерівномірністю розподілу виявлених морфологічних слідів поширення руйнування, пов'язаних зі структурними дефектами (рис. 2). Зокрема, на зламах однорідних зразків зі сталі 40X (основний метал) виявили два характерні рельєфи руйнування: волокнистий та кристалічний, частка яких досягала ~35 і ~65% відповідно від загальної площі зламу (рис. 2a). Площа бокових губ витягування досягала ~8%, що свідчить про значну пластичну деформацію під час руйнування. Від осередку зародження втомної тріщини (на зламі він зверху) руйнування поширювалося з формуванням півеліптичної зони, в якій на фоні волокнистого зламу виділялися характерні втомні лінії, пов'язані із гальмуванням росту тріщини на структурних дефектах чи через значну зміну режиму навантаження. Вся поверхня волокнистої частини зламу матова (без металевго блиску), темно-сірого кольору і її пов'язують із в'язким кризьзеренним руйнуванням. З поширенням руйнування волокнистий злам змінюється на кристалічний з чітким їх розмежуванням. Кристалічний злам пов'язують із крихким руйнуванням, яке відбувається або міжзеренно (тоді злам стає зернистим), або кризьзеренно вздовж кристалографічних площин спайності. В обох випадках за оптичних збільшень злам має характерний металевий блиск через відбивання світла фасетками між- і кризьзеренного відколу. В нижній частині зламу зразка спостерігали також смуги, обумовлені специфікою кристалізації сталі, які візуалізували геометрію фронту тріщини навіть на етапі її неконтрольованого поширення.

Два типи рельєфу спостерігали також на зламах (прототип наплавленого функціонального металу) однорідних зразків зі сталі 4X5ФМС. Тут частка волокнистого рельєфу досягала ~25%, кристалічного – ~75%, а площа губ витягування була меншою, ніж у сталі 40X (~4%). Меж між зонами з різними рельєфами на зламі не виявили (рис. 2b). Ділянку з дещо відмінним рельєфом в центральній частині зламу зразка пов'язали із структурною неоднорідністю металу. На всій поверхні зламу цього зразка (разом із зоною його доламу) спостерігали також півеліптичні сліди поширення фронту тріщини. Відзначили, що співвідношення часток волокнистого та кристалічного рельєфу (25 і 75%) узгоджується із нижчою (порівняно зі сталлю 40X) втомною довговічністю зразка, наплавленого металом-прототипом (сталь 4X5ФМС).

Частка волокнистого рельєфу на зламі зразка зі сталі 40X з наплавленим функціональним шаром зі сталі 25X5ФМС (без підшару) становила ~33%, а кристалічного – ~67% (рис. 2c). Чітка лінія розмежування обох типів рельєфу розташовувалася нижче лінії сплавлення основного та наплавленого металів. Вздовж лінії сплавлення виявили дефекти у вигляді виривів та зони дрібнодисперсної кристалічної висипки. Її характерною ознакою є стовпчасті утворення з металевим блиском, які спостерігали також і у наплавленому шарі. Сукупно площа зон з таким рельєфом досягала 4...5%. Бокові губи витягування на поверхні цього зламу відсутні. Таким чином, хоч площа зламу з волокнистим рельєфом у такому наплавленому зразку дещо перевищувала відповідну площу в однорідному зразку-прототипі, проте значна неоднорідність на ділянці волокнистого рельєфу з кристалічно обумовленою структурою могла негативно вплинути на його втомну довговічність. Відсутність бокових губ витягування на поверхні зламу зразка з одношаровим наплавленням також узгоджується із його низькою довговічністю.

Злам зразка сталі 40X з двошаровим наплавленням (функціональний шар зі сталі 25X5ФМС наносили на підшар з низьколеговою сталлю 12X1МФ) проде-

монстрував очевидні ознаки неоднорідності (рис. 2*d*). Частки площ кристалічного та волокнистого рельєфів становили відповідно ~65 та ~35%. Великі за площею ділянки з характерними ознаками кристалічної висипки зі стовпчастою морфологією кристалічних утворень виділялися на фоні волокнистого рельєфу. Ці зони спостерігали здебільшого у зовнішніх прошарках функціонального наплавленого шару, а також вздовж межі його сплавлення з підшаром. Сукупно площа таких зон досягала ~10%. Ці морфологічно неоднорідні зони на фоні волокнистого рельєфу спричинили анізотропію механічних властивостей наплавленого металу. Найпомітніше знизилася ударна в'язкість і відносне видовження наплавленого металу. Вважали, що ділянки кристалічної висипки на зразках, виготовлених за такою схемою, зумовлені нерівномірним розподілом вуглецю та хрому в наплавленому металі.

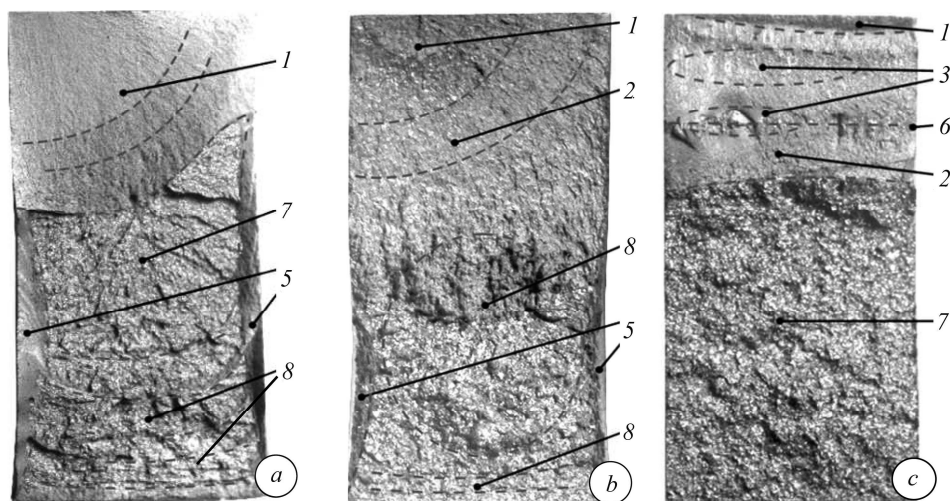


Рис. 2. Фрактограми поверхонь утомних зламів: *a, b* – однорідні зразки зі сталей 40X (основний метал) та 4X5ΦMC (прототип наплавленого функціонального металу); *c–e* – зразки, наплавлені сталлю 25X5ΦMC без (*c*) та з підшарами (*d, e*) зі сталей 12X1MΦ (*d*) та 08kp (*e*). Наплавлені шари розташовані зверху. Виділені зони: 1 – зародження тріщини; 2 – волокнистий злам із втомними лініями; 3 – кристалічна висипка; 4 – розмежування функціональний шар / підшар; 5 – губи витягування; 6 – розмежування підшар / основний метал; 7, 8 – кристалічні злам та смуги.

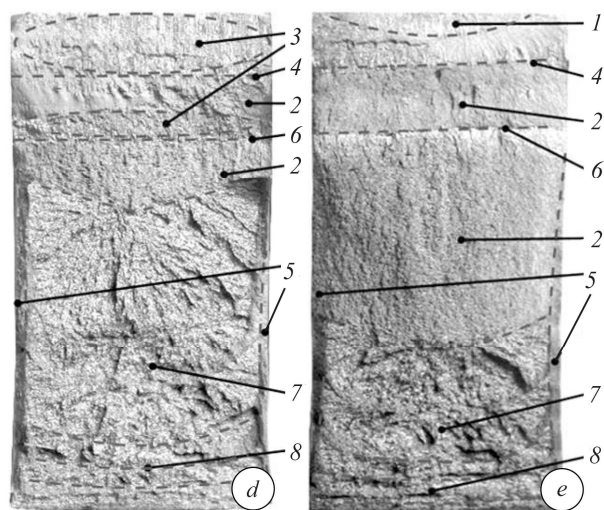


Fig. 2. Fractograms of the fatigue fracture surfaces: *a, b* – homogeneous specimens of 40X (as base metal) and 4X5ΦMC steels (as a prototype of welded layer); *c–e* – specimens clad with 25X5ΦMC steel without (*c*) and with sublayers (*d, e*) of 12X1MΦ (*d*) and 08kp (*e*) steels. The welded layers are located on top. Highlighted zones: 1 – crack initiation; 2 – fibrous fracture with fatigue lines; 3 – crystalline rash; 4 – demarcation of the functional layer with the sublayer; 5 – tightening lips; 6 – demarcation of the sublayer with the base metal; 7, 8 – crystalline fractures and strips.

Злам зразка зі сталі 40X з двошаровим наплавленням на підшарі зі сталі 08кп доволі однорідний з волокнистим рельєфом на ~64% площі зламу (рис. 2e). Такий характер зламу домінував у наплавленому шарі, але на його фоні виявили незначну ділянку з кристалічною висипкою (здебільшого у поверхневому шарі наплавленого металу, де вміст елементів легування зазвичай є найвищим). Площа губ витягування з обох боків зламу досягала 6%, що вказує на в'язкий характер руйнування зразка з цим варіантом наплавлення. Водночас сукупна частка кристалічного крихкого рельєфу на його зламі становила ~36% і він переважав лише в зоні доламу зразка. Загалом морфологія зламу двошарового зразка такого типу відповідає його найвищій втомній довговічності.

Отримані експериментальні результати щодо втомної довговічності усіх аналізованих зразків (табл. 2) та кількісних фрактографічних оцінок їх зламів (рис. 3) показали ефективність використання проміжного підшару з пластичної нелегованої низьковуглецевої сталі перед наплавленням на нього високоміцного функціонального шару для підвищення втомної витривалості деталей, які експлуатують за циклічних термомеханічних навантажень.

ВИСНОВКИ

Порівняльним макрофрактографічним аналізом зламів утомних зразків з двошаровим наплавленням показано, що внаслідок циклічних навантажень у наплавленому підшарі зі сталі 08кп і у зносостійкому функціональному шарі зі сталі 25X5МФС формувався однорідний волокнистий рельєф, який продовжувався і в основному металі, що відповідає найкращим показникам втомної довговічності таким способом сформованого шаруватого матеріалу.

З іншого боку, на макрозламах зразків з двошаровим наплавленням з використанням такого ж зносостійкого функціонального шару зі сталі 25X5МФ, але з підшаром, наплавленим низьколегованою сталлю 12Х1МФ, виявлено переважно кристалічний рельєф і високу неоднорідність зламу на ділянці наплавленого металу з великою кількістю кристалічних елементів зі стовпчастою морфологією. Такий характер зламів відповідає низькій утомній довговічності зразків з двошаровим наплавленням, нанесеним за цією схемою.

1. Study of wear processes of weld clads / J. Brezinová, A. Guzanová, P. Maruschak, D. Lorincová // Acta. Metallurgica Slovaca. – 2014. – 20(2). – P. 167–176. <https://doi.org/10.12776/ams.v20i2.293>.
2. Особливості формування та руйнування наплавлених шарів з порошкових дротів системи Fe–Cr–B–C за ударних навантажень / А. А. Войтович, Г. В. Похмурська, М. М. Студент, О. З. Студент // Проблеми трибології України. – 2015. – № 4. – С. 105–113.
3. Mechanical characteristics and wear resistance of the cladding layers obtained by melting of cored wires with simultaneous vibration of substrate / M. Student, A. Voitovych, H. Pokhmurs'ka, O. Maruschak, O. Student, P. Maruschak // Strojnický Casopis. – 2019. – 69, № 1. – P. 109–122. DOI: <https://doi.org/10.2478/scjme-2019-0009>.

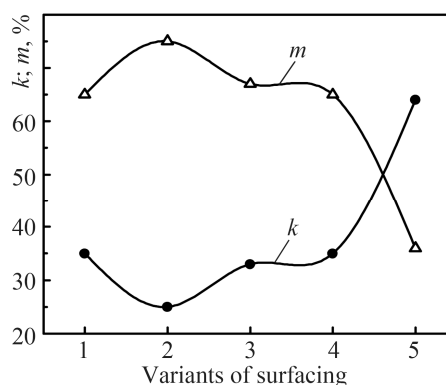


Рис. 3. Кількісні фрактографічні показники (волокниста k і кристалічна m частка площі зламів) п'яти варіантів наплавлення зразків (табл. 2) з різною утомною довговічністю.

Fig. 3. Quantitative fractographic indicators (fibrous k and crystalline m components of the fracture surfaces) of five variants of specimen surfacing (Table 2) with different fatigue life.

4. *Microstructure and abrasive-wear resistance of the vibration-deposited metal of core wires of the basic Fe–Cr–B system* / A. A. Voitovych, H. V. Pokhmurs'ka, M. M. Student, O. Z. Student // *Materials Science*. – 2016. – **52**, № 3. – P. 365–370. DOI:10.1007/s11003-016-9965-6.
5. *Influence of vibration in the course of surfacing of a protective layer on its microstructure and impact-abrasive wear* / H. V. Pokhmurs'ka, M. M. Student, O. S. Lanets', A. A. Voitovych // *Materials Science*. – 2015. – **51**, № 3. – P. 412–417. DOI:10.1007/s11003-015-9856-2.
6. *Рябцев И. А., Сенченков И. К., Турык Э. В.* Наплавка. Материалы, технологии, математическое моделирование. – Гливице: Изд-во Силезск. политехн. ин-та, 2015. – 589 с.
7. *Repair and maintenance weld overlay solutions for steel mills*. – Tailor-Made Protectivity™, UTP Maintenance, 2018. – 28 p.
8. *Babinets A. A. and Ryabtsev I. A.* Fatigue life of multilayer hard-faced specimens // *Welding Int.* – 2016. – **30**, № 4. – P. 305–309. <https://doi.org/10.1080/01431161.2015.1058004>.
9. *Fatigue life of specimens after wear-resistant, manufacturing and repair surfacing* / I. O. Ryabtsev, V. V. Knysh, A. A. Babinets, S. O. Solovej, V. M. Demenkov // *The Paton Weld. J.* – 2020. – № 9. – P. 19–25.
10. *Fatigue life of steel 40Kh specimens after wear-resistant surfacing with a sublayer of low-carbon steel* / I. O. Ryabtsev, V. V. Knysh, A. A. Babinets, S. O. Solovej // *The Paton Weld. J.* – 2021. – № 3. – P. 2–8. <https://doi.org/10.37434/tpwj2021.03.01>.
11. *Chudzicki J., Horn B. D., and Tsai C.* Mechanisms of surface deterioration – Cladded rolls for continuous slab casting. – Phase 1 // 36th Mechanical Working and Steel Proc. Conf., (16–19 Oct. 1994). – Baltimore, Maryland, 1994. – P. 67–77.
12. *Sanz A.* New Coatings for continuous casting rolls // *Surf. and Coat. Techn.* – 2004. – **177–178**. – P. 1–11. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2003.06.024.
13. *Korotkov V. A., Mikhailov I. D., and Babailov D. S.* Examination of deposited layers on support rollers of continuous casting installations // *Weld. Int.* – 2007. – **21**, № 7. – P. 540–542. <https://doi.org/10.1080/0950711070510451>.
14. *Машины непрерывного литья заготовок. Теория и расчет* / Л. В. Буланов, Л. Г. Корзунин, Е. П. Парфенов, Н. А. Юровский, В. Ю. Авдонин / Под. общ ред. Г. А. Шалаева. – Екатеринбург: Уральский центр ПР и рекламы, 2003. – 320 с.
15. *Ясній П. В., Маруцак П. О.* Ролики МБЛЗ: Деградація і тріщиностійкість матеріалів. – Тернопіль: Джура, 2009. – 232 с.
16. *Degradation of renovation layers deposited on continuous steel casting rollers by submerged arc welding* / J. Viňáš, J. Brezinová, A. Guzanová, J. Svetlík // *Proc. of the Institution of Mechanical Eng., Part B: J. Eng. Manufact.* – 2013. – 227(12). – P. 1841–1848. DOI: 10.1177/0954405413493405.
17. *Viňáš J., Brezinová J., Guzanová A.* Analysis of the quality renovated continuous steel casting roller, Sadhana // *Academy Proc. in Eng. Sci.* – 2013. – 38(3). – P. 477–490. DOI: 10.1007/s12046-013-0119-3.
18. *Evaluation of the quality of cladding deposited on continuous steel casting rolls* / J. Viňáš, J. Brezinová, A. Guzanová, P. Balog // *Int. J. of Mat. Res.* – 2013. – 104(2). – P. 183–191. DOI:10.3139/146.110842.
19. *Estimation of fatigue crack growth rate in heat-resistant steel by processing of digital images of fracture surfaces* / P. Maruschak, R. Vorobel, O. Student, I. Ivasenko, H. Krechkovska, O. Berehulyak, T. Mandziy, L. Svirska, and O. Prentkovskis // *Metals*. – 2021. – **11**. – 1776 p. <https://doi.org/10.3390/met11111776>.
20. *Марочник сталей и сплавов* / Ю. Г. Драгунов, А. С. Зубченко, Ю. В. Каширский, А. Ф. Дегтярев, В. В. Жаров, М. М. Колосков, А. С. Орлов, В. Н. Скоробогатых / Под об. ред. Ю. Г. Драгунова и А. С. Зубченко. – М.: Машиностроение, 2016. – 1216 с.
21. *Герасимова Л. П., Ежов А. А., Маресев М. И.* Изломы конструкционных сталей. – М.: Металлургия, 1987. – 272 с.
22. *Аникина В. И., Ковалева А. А.* Фрактография в материаловедении. – Красноярск: СФУ, 2014. – 143 с.
23. *Фрактография. Прокаливаемость и свойства сплавов* / М. П. Браун, Ю. С. Веселянский, О. С. Костырко, Б. Б. Винокур. – К.: Наук. думка, 1966. – 312 с.
24. *Гордеева Т. А., Жегина И. П.* Анализ изломов при оценке надежности материалов. – М.: Машиностроение, 1978. – 200 с.

Одержано 07.07.2021