

# Розробка технології відновлення деталей наплавленням з використанням введення домішок

**Скобло Т.С.** д.т.н., професор, **Сідашенко О.І.** к.т.н., професор, **Рибалко І.М.** к.т.н., старший викладач, **Тіхонов О.В.** к.т.н., доцент  
Харківський національний технічний університет сільського господарства імені Петра Василенка

Для підвищення терміну служби деталей машин їх відновленням в процесі експлуатації найчастіше застосовують метод електродугового наплавлення. Як показали дослідження, для цього використовують різні леговані дроти. Вибір складу компонентів дроту виконують з урахуванням забезпечення необхідних властивостей. Крім того, при використанні не завжди досягається однорідність структури та розподілу компонентів.

Існує багато методів зміцнення легованого поверхневого шару на виробках за допомогою порошкових домішок. Але більшість процесів вимагають використання спеціального обладнання. До теперішнього часу не було розроблено такого методу формування зміцненого поверхневого шару, який би забезпечував однорідність структури із заданими властивостями в залежності від умов експлуатації.

Перспективними напрямками у питанні формування робочих поверхонь зі заданими експлуатаційними властивостями і розширенням технологічних можливостей з використанням додаткового модифікування є застосування композицій металевих домішок. Важливим є розробка методу, який дозволить оперативно забезпечувати дозоване введення легуючих компонентів та досягати більш однорідного їх розподілу. Це зменшить потреби виробництва та закупівлю великої номенклатури дротів, що є особливо важливим для невеликих ремонтних підприємств.

У зв'язку з цим розробка економічних, енергозберігаючих методів і технологій зміцнення покриттів при реновації робочої поверхні і зведення до мінімуму додаткових витрат є важливим і актуальним напрямом досліджень.

Метою роботи є підвищення зносостійкості деталей в процесі експлуатації їх реновацією з використанням дозованого внесення порошкових домішок, що забезпечать

рівномірність структуроутворення та формування дифузійної перехідної зони, підвищений рівень твердості, мінімізацію витратних матеріалів, можливість корегувати у шарі, що відновлюється, вміст та співвідношення легованих компонентів. У відповідності з поставленою метою вирішували наступні завдання:

- розробили нове, маловитратне обладнання для внесення легуючих компонентів в покриття наплавленням дротом з використанням порошкових композицій домішок;
- оцінили рівень напружень з урахуванням кінетики кристалізування при відновленні деталей новим методом для вибору параметрів їх реновації;
- визначили параметри технологічного процесу нанесення відновлювальних покриттів;
- оцінили якість і особливості структуроутворення, однорідність відновленого шару і рівень властивостей при використанні нового методу реновації деталей;
- провели промислову апробацію і впровадження розробок та оцінили їх економічну ефективність.

При проведенні досліджень використовували сучасні методи аналізу структури, механічних та експлуатаційних властивостей покриттів. Для цього застосовували металографічний, мікрорентгеноспектральний аналізи, оцінку твердості, мікротвердості, міцність зчеплення покриття з основою, зносостійкість, вплив термічної обробки (високого відпуску). Теоретично, згідно з розробленим новим методичним підходом, оцінили рівень напружень і характер кристалізування наплавленого шару в залежності від технологічних параметрів обробки. Запропоновано комплексний підхід в описі структурних фаз, що формується без введення та з додатком порошкової композиції.

Аналіз сучасних технологій та обладнання для відновлення деталей

проведено на основі літературних джерел за напрямком досліджень.

Розвиток ремонтної галузі у сільськогосподарському машинобудуванні є важливим резервом у вирішенні проблеми забезпечення виробництва запасними частинами, підвищенні довговічності машин і устаткування, зниження коефіцієнта їх використання, в умовах різко застарілого парку. Важливим чинником при цьому є скорочення витратних складових, що дають значну економію сировинних, енергетичних і виробничих ресурсів з одночасним використанням найбільш екологічно чистих процесів.

Аналізом показано, що 77% деталей вибраковується при зношуванні, який не перевищує 0,6 мм і 10% близько 1,6 мм. Значна частина з них може бути відновлена оперативно в умовах малих ремонтних підприємств.

Узагальнено дані про різні матеріали для наплавлення, які відносяться до вуглецевих, низьколегованих і високолегованих композицій і використовуються для різних потреб при відновленні деталей. Їх вибір визначається умовами експлуатації, технологічністю і вимогами, що пред'являються до них. Для легування наплавленого шару при всіх видах наплавлення використовують порошкові композиції і леговані дроти суцільного перерізу або спеціальні стрічки.

Перспективним напрямком у питанні формування поверхонь із заданими експлуатаційними властивостями і розширенням технологічних можливостей є застосування металевих легуючих домішок. Їх використання дозволить більш оперативно задовольняти потреби виробництва без закупівлі великої номенклатури дротів для забезпечення необхідних при відновленні конкретних експлуатаційних властивостей.

Розглянута ефективність відновлення деталей наступними видами

технологічних процесів: електродуговим наплавленням, вібродуговим, ручним дуговим, під шаром флюсу, в середовищі захисних газів, газополуменевим і плазмовим. Оцінені переваги і недоліки кожного з них. Показано, що електродугове наплавлення є найбільш ефективним, технологічним і доступним методом відновлення деталей особливо для малих ремонтних майстерень, в тому числі і фермерських господарств. Для відновлення невеликих обсягів деталей різноманітної номенклатури, що використовуються в різних умовах експлуатації, потрібно застосовувати відповідні за хімічним складом композиції для наплавлення, що не може бути забезпечено потребами таких підприємств з позицій економічної ефективності та дефіцитності витратних матеріалів.

Розробка нового технологічного процесу відновлення різноманітної номенклатури деталей вимагає визначення ефективних параметрів процесу і вибір композицій для наплавлення, що забезпечать необхідну якість, структуру металу та його властивості. Для цього потрібна розробка нових методик і підходів з використанням комплексних досліджень.

Найбільш доступним видом наплавлення для малих ремонтних майстерень є — електродугове. Перевагою даного виду є можливість легкої модернізації обладнання, створення мобільної технології при різноманітній номенклатурі деталей.

Розроблено методологію досліджень, яка включає проведення експериментів з оцінки структури і властивостей покриттів з урахуванням розробленого способу легування відновлюваного шару і параметрів процесу їх нанесення.

Однорідність властивостей відновленого шару з домішкою композиції оцінювали по зміні рівня мікротвердості, розподілу хімічних компонентів і мікроструктури. При цьому, важливим у досягненні однорідності властивостей є визначення кінетики кристалізування шару і рівня виникаючих напружень. Запропоновано послідовність проведення досліджень для вирішення поставлених завдань і досягнення мети роботи.

Оцінку розподілу температур по перетину деталі проводили на прикладі вала Ø35 мм із Сталі 45, а в якості дроту — застосували низьколеговану марку Нп-30ХГСА. Для легування використовували домішку

ПГ-10Н-01. Методика передбачала встановлення умов формування однорідної структури металу при введенні порошкової композиції запропонованим методом. Для розрахунку використані різницєва схема і алгоритм пошуку послідовно наплавленого металу за 13 сегментами. При цьому аналізували зони наплавлення, а також — окремі, на яких ще не формується такий шар — це умовно заграничні (до тих пір, поки не відбудеться їх розплавлення).

Визначення температур по перетину вала і встановлення умов формування однорідності структур проведено на основі рівняння теплопровідності:

$$c\gamma \frac{\partial T}{\partial \tau} = \lambda \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right), \quad (1)$$

де —  $x, y, z$  координати, м;  $\tau$  — час, с;  $T=T(x, y, z, \tau)$  — температура, °С;

$\gamma$  — питома вага, кг/м<sup>3</sup> (7,850 кг/м<sup>3</sup>);

$c$  — питома теплоємність, Дж/кг·°С. Питому теплоємність розраховували як:  $c = c_g, T > T_l$  (2)

$$c = c_{iv}, T > T_s \quad (3)$$

$$c = \frac{c_g + c_{iv}}{2} + \frac{Q_{pl}}{T_l - T_s} \quad T_s \leq T \leq T_l, \quad (4)$$

де  $T_l$  температура ліквідус (1517°С);  $T_s$  температура солідус (1492°С);

$c_g$  питома теплоємність рідинної фази (838 Дж/кг·°С);  $c_{iv}$  питома теплоємність твердої фази (670,4 Дж/кг·°С);  $Q_{pl}$  прихована теплота плавлення, 272 Дж/кг;

$\lambda$  теплопровідність, Вт/(м·°С) розраховували за емпіричною залежністю:

$$\lambda = 52,3 - 25(1200 - T) / 1200 \quad (5)$$

якщо  $T > 1200$ °С, то  $\lambda = 52,3$  Вт/(м·°С).

Початкові умови:  $T(x, y, z, 0) = T_0$  — для основного металу (6)

$T_{per}$  температура деталі до наплавлення.

— для наплавленого металу  $T_l + T_{per} = T(x, y, z, 0)$  (7)

$T_{per}$  температура перегріву, що залежить від струму, напруги, швидкості пересування електрода і числа обертів деталі навколо своєї осі.

Алгоритм завдання граничних умов:

$$\lambda \frac{\partial T}{\partial x} = -Q \quad (8)$$

$$\lambda \frac{\partial T}{\partial y} = -Q \quad (9)$$

$$\lambda \frac{\partial T}{\partial z} = -Q \quad (10)$$

$$Q = k \left[ \left( \frac{T + 273}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_0 + 273}{100} \right)^4 \right] \quad (11)$$

У результаті розрахунків в циліндричних координатах отримали:

$$c\gamma \frac{\partial T}{\partial \tau} = \lambda \left( \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{\partial T}{r \partial r} + \frac{\partial^2 T}{r^2 \partial \varphi^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) \quad (12)$$

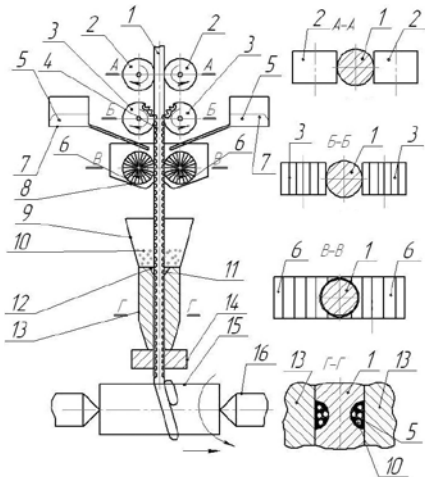
$$\lambda \frac{\partial T}{\partial r} = -Q \quad (13)$$

$$\lambda \frac{\partial T}{\partial \varphi} = -Q \quad (14)$$

Розроблено методику оцінки напружень, що формуються в різних зонах залежно від швидкості наплавлення, яка враховує умови кристалізування (повна і неповна) відновленого шару. Вона передбачає багатошарове наплавлення з визначенням залишкових деформацій і напружень. Новизна підходу в оцінках полягає в тому, що спочатку розраховували напруження навантаження, а потім розвантаження. Визначали деформації і по збільшенню температур в часі в одній і тій же точці.

Розроблено комплексний підхід математичного опису структуроутворення і рекомендований метод його опису. Це дозволило оцінити формування фаз, що відрізняються складом і вмістом компонентів, дало можливість визначити однорідність їх властивостей в різних зонах відновленого шару запропонованим методом. Метод математичного опису структури заснований на аналізі кольорів на фотографіях мікроструктур. Розроблено алгоритм для їх опису, а також комплексну методику математичної обробки фотографій мікроструктур на основі оцінки 14 функцій, що дозволяє отримати повну картину запропонованого методу відновлення деталей, оцінити можливість локального введення легуючих домішок на основі порошкових композицій і з використанням отриманої інформації оптимізувати склад сплаву і параметри технологічного процесу.

Важливим є розробка нового обладнання для нанесення покриттів. Новий спосіб відновлення і зміцнення деталей дозволяє оперативно коригувати співвідношення і склад легуючих компонентів при використанні доступних вуглецевих або низьколегованих дротів з додаванням порошкових композицій. Основні елементи запропонованої установки для введення в наплавлений шар легуючих домішок наведені нарис. 1. Введення домішок при наплавленні вивчали на основі формування чарунок на дроті, за допо-



**Рис. 1. Конструктивна схема обладнання для внесення легуючих компонентів в покриття, А-А — переріз конструктивної схеми калібрування зварювального дроту в напрямних роликів, Б-Б — переріз конструктивної схеми утворення чарунок, В-В — переріз конструктивної схеми нанесення клейової речовини на зварювальний дріт, Г-Г — переріз конструктивної схеми уцілювання порошку з легуючими компонентами в чарунках: 1 — зварювальний дріт; 2 — направляючі ролики; 3 — ролики з виступами; 4 — чарунки заданої форми; 5 — клейка речовина; 6 — валики з еластичної поверхнею; 7 — ємкості з клейкою речовиною; 8 — кожух; 9 — бункер з порошком; 10 — порошок з легуючими компонентами; 11 — вхідна частина калібруючого каналу мундштука; 12 — калібруючий канал мундштука; 13 — мундштук; 14 — струмопідвідний мундштук; 15 — зона відновлення деталі; 16 — центри, в яких закріплюється деталь**

могою яких вводили домішки.

На підставі досліджень на даному обладнанні визначені технологічні параметри нового процесу наплавлення низьколегованим дротом з додаванням легуючої порошкової композиції. Експериментальними дослідженнями визначено спосіб

введення порошкової легуючої композиції в відновлюваний шар і рекомендовані оптимальні параметри чарунок (рис. 2), притиснення і утримання порошку, які забезпечують стабільне і дозоване його введення в зону наплавлення. Теоретичними розрахунками визначено раціональні параметри нанесення чарунок на дріт: зусилля притиснення роликів 0,45 кН, глибина чарунок — 0,15 мм і їх діаметр 0,39 мм, відстань між ними — 1 мм.

Експериментально визначені і рекомендовані параметри наплавлення для здійснення процесу легування вала Ø35 мм: сила струму  $I_{\text{напл.}} = 160 \text{ А}$ , напруга  $U_{\text{напл.}} = 20 \text{ В}$ , швидкість подачі дроту  $V_{\text{пр.}} = 0,04 \text{ м/с}$ , частота обертання деталі  $n = 2 \text{ об/хв}$ , зміщення електрода з zenіту 2 мм і його виліт —  $\delta = 12 \text{ мм}$ , швидкість наплавлення  $V_{\text{напл.}} = 0,019 \text{ м/с}$ . Дослідження по використанню цього методу відновлення базувалися на оцінках структуроутворення та досягнутих напруженнях у відновленому шарі. Для цього використовували математичний опис цих параметрів. Теоретичні дослідження передбачали вирішення ряду завдань: оцінку характеру кристалізування для вибору і рекомендації швидкості подачі дроту при наплавленні; визначення напружень і деформацій при реалізації запропонованого методу відновлення робочої поверхні деталей; встановлення кількісного та якісного складу і розподілу фаз у відновленому шарі.

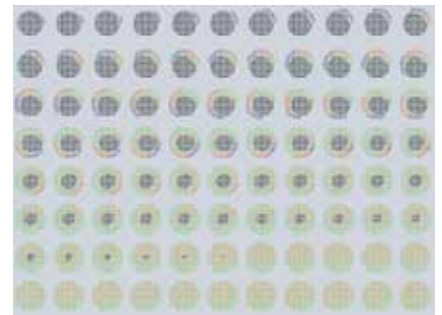
Дослідження кристалізування металу при відновленні вала Ø35 мм аналізували порівняно для трьох швидкостей подачі дроту (0,0043 м/с, 0,0131 м/с і 0,04 м/с). При цьому розраховували двовимірне теплове поле (рис. 3).

Дослідженнями показано, що зі зростанням протяжності напла-

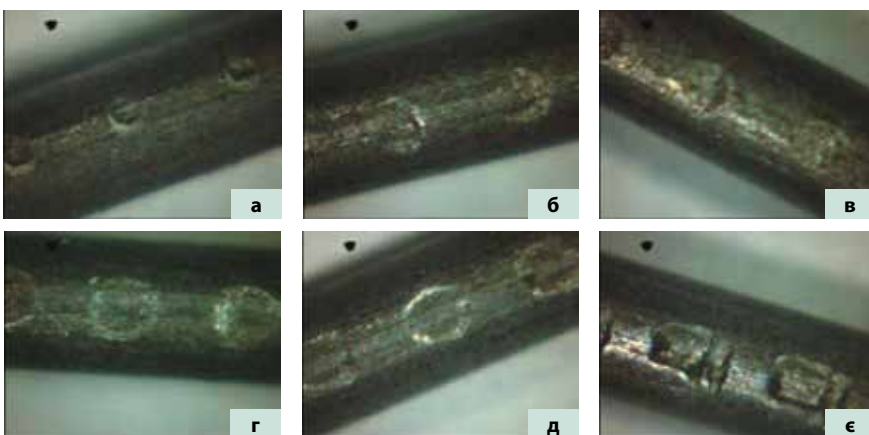
леного шару всередині основного металу накопичується все більше і більше тепла. Це можливо простежити по зміні зеленого кольору — зони перетворення  $\alpha$  в  $\gamma$ -Fe. Прирощення зеленого кольору відбувається нерівномірно, особливо спочатку процесу.

Розглядаючи зону (див. рис. 3), де температура досягає 500-700°C (зелений колір), в якій відбувається процес перекристалізування виявили, що в різних точках кола вона відрізняється розміром. Для перших сегментів, при яких температура основного металу низька, така зона має незначну глибину прогрівання. Зі зростанням маси наплавленого металу зона все більше розширюється і цей процес відбувається в значний проміжок часу. У деяких місцях виявлено неповне перекристалізування основного металу.

Рекомендована швидкість подачі дроту (0,04 м/с) при наплавленні має зону перекристалізування різних точках кола більш однорідну по глибині проплавлення. Така зона зберігається набагато більше часу і структура по перетину формується — однорідною. При зменшенні швидкості подачі дроту до 0,0131 м/с структура металу по перетину буде найбільш неоднорідною. Тому при розробці нового технологічного процесу відновлення таких валів



**Рис. 3. Характерна картина двовимірного теплового поля при рекомендованій швидкості подачі дроту 0,04 м/с: синій колір температура вище 900°C, червоний — від 700°C до 900°C, зелений — від 500°C до 700°C, жовто-зелений — від 400°C до 500°C, темний — від 30°C до 400°C**



**Рис. 2. Форма та розмір чарунок залежно від зусилля притиснення роликів: а — при зусиллі 0,15 кН, б — 0,30 кН, в — 0,45 кН, г — 0,60 кН, д — 0,75 кН, є — 0,90 кН, x15**

використовували швидкість наплавлення на рівні 0,04 м/с, яка визначається відповідним характером теплового поля, що формується.

Для обґрунтування вибору параметрів наплавлення також провели оцінку швидкості процесу, при якому виникають термічні напруження і деформації. Спочатку процесу наплавлення пластичні деформації

Таблиця 1. Розподіл кольорів на фотографіях

№ фото	Номер кольору							
	0	17	34	51	68	85	102	119
	Присвоєний номер							
	1	2	3	4	5	6	7	8
1.1	11,531	1,146	0,030	0,000	02,952	24,095	0,338	0,003
1.2	09,975	1,315	0,046	0,001	04,372	27,954	0,353	0,004
1.3	05,945	1,073	0,076	0,000	03,699	31,149	0,588	0,001
1.4	12,973	1,052	0,104	0,002	03,288	20,552	0,697	0,008
1.5	05,251	3,798	0,155	0,000	12,837	40,747	0,547	0,008
2.1	20,269	2,188	0,075	0,001	05,296	19,479	0,365	0,003
2.2	17,159	1,435	0,039	0,001	07,187	23,568	0,270	0,001
2.3	02,741	2,009	0,121	0,000	04,566	47,381	0,673	0,001
2.4	08,264	3,214	0,066	0,000	10,156	38,081	0,251	0,003

Продовження табл. 1

№ фото	Номер кольору							
	136	153	170	187	204	221	238	255
	Присвоєний номер							
	9	10	11	12	13	14	15	16
1.1	0,329	17,380	21,946	0,032	3,425	0,032	3,621	13,487
1.2	0,220	17,596	20,110	0,024	2,759	0,024	2,709	12,876
1.3	0,166	17,630	23,955	0,022	1,771	0,022	1,620	12,431
1.4	0,450	21,277	18,606	0,055	4,343	0,055	2,957	13,686
1.5	0,546	16,254	07,023	0,183	1,308	0,183	6,194	06,410
2.1	0,384	15,934	13,694	0,033	3,139	0,033	8,059	11,249
2.2	0,283	17,774	13,982	0,032	3,618	0,032	4,009	10,667
2.3	0,462	18,063	16,158	0,044	1,486	0,044	1,680	04,843
2.4	0,327	14,707	7,981	0,046	0,905	0,046	8,636	10,438

Примітка: кольори 0-136 - ферит; 153 - аустеніт; 170-255 – карбіди.

розтягання переходять майже без проміжної зони в — стискання. По осі У має різкий перехід від деформації розтягання до стискання, а по осі Z відзначається вигин в поздовжньому напрямку. Вигин може компенсуватися шарами, що наплавляються поздовжньо. Математичний розрахунок залишкових напружень по трьох осях при різних швидкостях подачі дроту в процесі наплавлення підтвердив — рекомендовану, при якій вони найменші: по осі X 12,1×9,8 МПа, по У 11,8×9,8 МПа, по Z 35,4×9,8 МПа (рис. 4).

У роботі доповнена і вдосконалена, раніше розроблена методика розрахунку однорідності структур та її опис, згідно гістограм типу Бозе-Ейнштейна. Для оцінки однорідності використовували порівняння теоретичних розрахунків з результатами розподілу компонентів методом мікрорентгеноспектрального локального аналізу при їх введенні порошкової композиції в рідинну

ванну.

При якісній і кількісній оцінці структури (рис. 5) встановили зв'язок концентрацій компонентів з кольором фаз (табл. 1). У процесі наплавлення запропонованим методом формується дві зони термічного впливу: перша дифузійна з зміцненням легуванням (ЗТВ-1) і друга — тільки за рахунок термічних напружень (ЗТВ-2).

Розрахунками показано, що середні значення функцій знижуються з наростання концентрацій легуючих компонентів у фазах наплавленого шару і в ЗТВ-1 з Cr і Ni (з 3,84% до 6,217% і з 2,92% до 3,889% відповідно). У легуваному покритті формується ферит 8 типів з різним співвідношенням Cr і Ni, аустеніт та карбіди — 6 типів легувані і цементит. У нелегованому покритті також виявлено ферит 8 типів з різним співвідношенням Mn і Si (компоненти дроту), аустеніт і карбіди, в тому числі і карбіди 6 типів.

Карбід з номером 170 переважає в зонах наплавлення і ЗТВ-1 з вмістом легуючих компонентів (20-24%). Cr збільшує частку карбідів у порівнянні з відповідними зонами без Cr або з мінімальним його вмістом. Ферит з кольором 0 переважає в наплавленні без домішок порошоків (17,2-20,3%). Майже в два рази фериту цього кольору більше порівняно з аналогічною зоною легуваного сплаву. У ЗТВ (фото 2.3 рис. 5 та табл. 1) без легуючих домішок частка фериту кольору 0 зменшується в набагато більшому ступені (до 2,7%), ніж в ЗТВ-2 (фото 1.4) з підвищеним вмістом Ni та Cr, де його кількість досягає 5,9-13%. Ферит кольору 85 виявлено у кількості 47% в ЗТВ у наплавленому шарі без легуючих домішок.

При введенні порошку у рекомендованій кількості і запропонованим методом, формуються більш щільні голчасті структури, що характеризуються підвищеною мікротвердістю

Таблиця 2. Розподіл хімічних елементів у наплавленому шарі, перехідній зоні і в основному металі при легуванні,% (мікрорентгеноспектральний аналіз, див. рис. 5)

Аналізовані шари	Аналізовані спектри	Cr	Mn	Si	Ni	S
Наплавлений шар	1	3,907	0,912	0,171	2,842	0,003
	2	3,76	1,242	0,184	3,146	0,014
	3	3,849	1,046	0,199	2,777	0,041
Неметалеве включення	10	4,387	3,857	0,217	3,161	1,058
Тіло зерна	11	3,317	0,852	0,107	2,966	0,021
Границя зерна	12	4,275	1,145	0,184	3,226	0
ЗТВ-1 (сильно витравлюється)	4	6,217	0,58	0,074	3,889	0,029
ЗТВ-2 (слабко витравлюється)	5	0,073	0,77	0,102	0,236	0,128
	6	0,113	0,59	0,081	0,215	0
Границя ЗТВ-1 та ЗТВ-2	7	0,363	0,653	0,111	0,23	0,052
Основний метал	8	0,083	0,867	0,125	0,116	0,028
Границя ЗТВ-2 та основного металу	9	0,088	0,526	0,095	0,125	0,026

(коефіцієнт пропорційності 69,21). Коефіцієнт пропорційності змінює знак і знижується (до - 4,452) при наплавленні без легуючих домішок майже в 20 разів у порівнянні з легованим. Це пов'язано зі зміною структури від бейнітної до мартенситної. Порівняльний аналіз показав, що найбільш тісний зв'язок структура-мікротвердість характерна для наплавлення з додатковим легуванням домішками. У цьому випадку коефіцієнт кореляції становить  $r=0,82$ , а без їх введення не перевищує  $r=0,36$ . Мікротвердість наплавленого шару без легування знаходиться на одному рівні з усіма зонами по перетину відновленого шару і близька до основного металу (Н-50-268-228).

Запропоновано принцип виявлення частки голчастих структур (бейніту і мартенситу), який дозволяє встановити і їх розподіл. На основі розрахунку частки вмісту фази було вибрано граничне число, що відділює наявність голчастих структур від загальної кількості інших складових. Це число дорівнювало 10% при величині фрагменту  $50 \times 50$  пікселів (рис. 6). По всіх варіантах граничних значень від 8 до 10% частка голчастих структур в наплавлених шарах без легуючих домішок значно більша, ніж в легованих. Показано, що для всіх умовних зон з межами  $6 \times 6$ ,  $8 \times 8$  і  $10 \times 10$  пікселів на ділянці поверхневого шару більше голчастих структур, ніж в ЗТВ-1.

Така ж закономірність характерна і для ділянок наплавленого нелегованого металу, що визначається великою швидкістю їх кристалізування. Ділянка легової ЗТВ містить значну частку (6,92-16,5%) голчастих

структур порівняно з границею наплавлення (5,38-10%). Це підтверджується і незначним підвищенням мікротвердості цих зон (ЗТВ-1 Н-50-499, границя наплавлення Н-50-487).

Експериментальними металографічними дослідженнями підтверджено, що в наплавленому дротом Нп-30ХГСА шарі структура являє собою верхній бейніт, з грубими феритними голками, а дротом з додаванням домішки ПГ-10Н-01 формується мартенсит, карбіди і залишковий аустеніт (див. рис. 5).

Визначено твердість і мікротвердість наплавлених поверхонь. При наплавленні дротом з введенням домішки твердість підвищується в 2,4 рази по відношенню до основного металу і в 2 рази в порівнянні з наплавленням без легуючих домішок. Мікротвердість підвищується в 2,1 рази по відношенню до основного металу і в — 1,8 по відношенню до наплавленням дротом без додаткового легування.

Проведеними випробуваннями на зношування було встановлено, що наплавлення дротом Нп-30ХГСА з введенням легуючого порошку сприяє підвищенню зносостійкості за рахунок формування карбідо-мартенситної структури, а також залежно від умов тертя: в масляному середовищі вона зростає в 2 рази, в абразивному — в 2,35 рази. Отримано залежності динаміки зношування. Встановлено підвищення мікротвердості в зоні тертя зразка, наплавленого дротом Нп-30ХГСА з домішкою ПГ-10Н-01. Зміцнення відбувається за рахунок розпаду залишкового аустеніту на 4,4%. Розроблено методику математичного

аналізу мікроструктур по кольоровій гамі фаз, що формується, яка підтверджує утворення в наплавленому шарі карбідів різного типу.

Отримані результати підтвердили дифузію легуючих компонентів (Cr, Ni) в зону термічного впливу при наплавленні з введенням домішки ПГ-10Н-01 (табл. 2), що забезпечує високу зносостійкість покриттів і можливість при зношуванні наплавленого шару використання перехідної зони в процесі тертя при експлуатації.

Для зняття напружень та в залежності від технічних умов після відновлення валу наплавленням доцільно застосовувати відпуск при температурах 200-600°C. При відпуску ( $t=600^\circ\text{C}$ ) досягається максимальне зниження мікротвердості відновленого шару, однак, незважаючи на це, зносостійкість легованого шару істотно вища завдяки формуванню карбідів хрому і легової матриці.

Удосконалено конструкцію експериментальної наплавлювача головки (більше компактної форми, легкої в обслуговуванні, спрощеної у виготовленні) та запропонована для ремонтних майстерень, що дозволяє більш оперативно виконувати технологічний процес дозованого введення легуючих компонентів. На основі теоретичних і експериментальних досліджень на прикладі валів  $\varnothing 35$  мм були визначені оптимальні параметри відновлення посадочних місць під підшипники таких деталей: сила струму  $I_{\text{напл.}} = 160$  А, напруга  $U_{\text{напл.}} = 20$  В, швидкість подачі дроту  $V_{\text{п.}} = 0,04$  м/с, частота обертання деталі  $n = 2$  об/хв, зміщення електрода з zenіту 2 мм

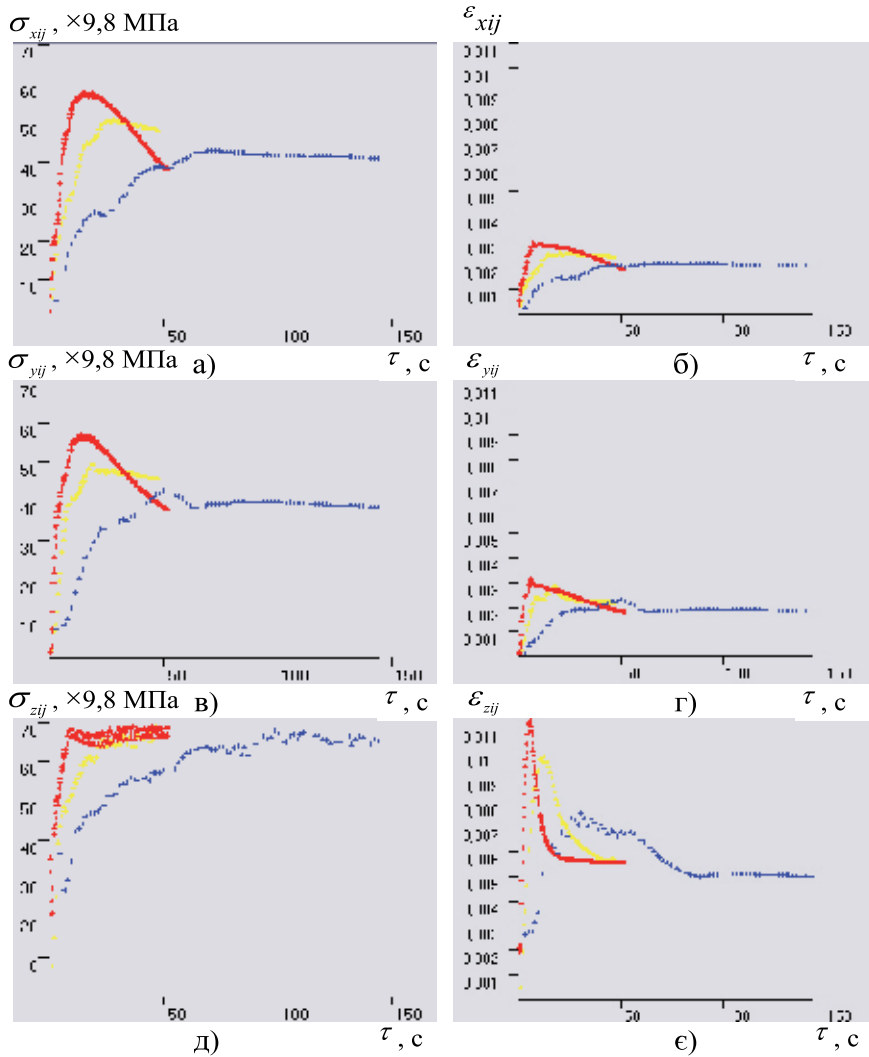


Рис. 4. Середні значення абсолютних показників напружень (МПа) і деформацій у часі при наплавленні вала Ø 35 мм. Червоний колір — швидкість подачі дроту 0,04 м/с, жовтий — 0,0131 м/с, синій — 0,0043 м/с; а, б — напруження і деформації по осі X; в, г — по осі Y; д, е — по осі Z

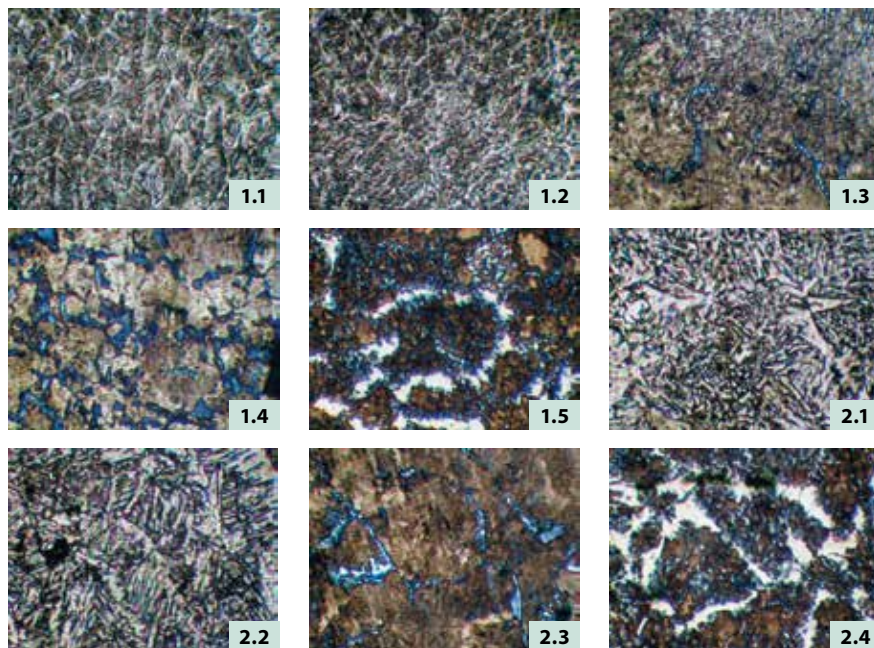


Рис. 5. Характерна структура (x130) при наплавленні дротом Нп-30ХГСА з введенням домішки ПГ-10Н-01 (а) і без додатків легуючих (б): 1.1 та 2.1 — зовнішній шар наплавлення, 1.2 і 2.2 — внутрішній шар наплавлення, 1.3 — ЗТВ-1 ближче до зони наплавлення, 1.4 і 2.3 — ЗТВ-2 далі від наплавлення і ближче до основного металу, 1.5 і 2.4 — основний метал

і його виліт —  $\delta=12$  мм, швидкість наплавлення  $V_{напл.}=0,019$  м/с, зусилля притиснення роликів 0,45 кН, глибина чарунок 0,15 мм, діаметр — 0,39 мм, які використовували при промислового впровадженні. При наплавленні використовували дрід Ø 1,2 мм Нп-30ХГСА та домішки ПГ-10Н-01. Розробки склали основу підготовленої для впровадження відновлення деталей тимчасової технологічної інструкції.

Запропонований новий метод відновлення деталей забезпечує не тільки економічний, а й технічний ефект, тому що дозволяє застосовувати для легування в якості домішки порошки різних композицій, навіть при використанні звичайних вуглецевих або низьколегованих дротів. Технологічний процес відновлення посадочних місць під підшипники з застосуванням запропонованого способу відновлення дозволяє уникнути значних витрат, пов'язаних з використанням дорогих витратних матеріалів і розширення сфери застосування вуглецевих і низьколегованих наплавлюючим дротів за рахунок введення легуючих компонентів. Використання запропонованої технології є переважним і економічно доцільним.

В результаті виконаних розробок і впровадження їх на підприємстві ТОВ «Восход» Глухівського району Сумської області визначено, що при заміні порошкового дроту новим технологічним процесом відновлення посадочних місць під підшипник валів Ø 35 мм (вали коробки передач трактора Т-40М; вали головного зчеплення, вали вторинні КПП Т-16М; вали коробки передач тракторів Т-150К-09-25, ХТЗ-17221, Т-150-05-09-25; вали колінчасті компресорів двигунів КАМАЗ-740.11-240, ЯМЗ-238, ЯМЗ-238, ЯМЗ-240) у кількості 1100 шт. (деталей 550 шт.) забезпечило економічний ефект 5115 грн. З урахуванням збільшення терміну служби валів в експлуатації при порівнянні з використанням тільки дроту Нп-30ХГСА і цього ж дроту з дозованим введенням домішки ПГ-10Н-01 додатково ефект буде досягати 6919 грн. на рік. Сумарний економічний ефект від впровадження нової технології відновлення деталей і підвищення їх експлуатаційної стійкості дорівнює 12034 грн. на рік.

В результаті виконаних досліджень розроблено новий ефективний метод відновлення та зміцнення деталей для майстерень з великою номенклатурою і обмеженими можливостями по ресурсу витратних матеріалів. Для реалізації

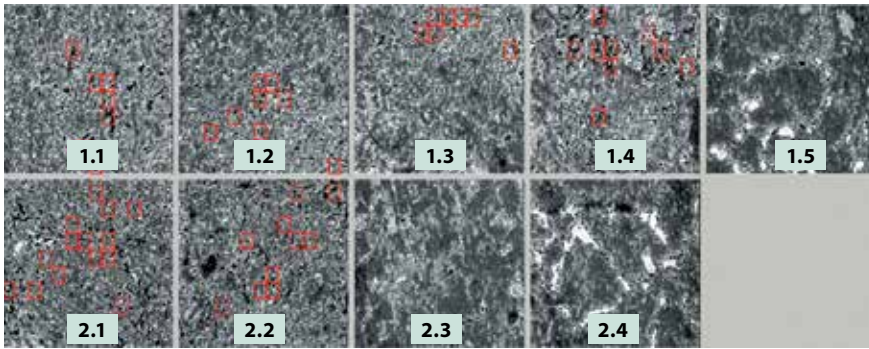


Рис. 6. Характерна картина фрагментів 50 на 50 пікселів, граничне число голчастих структур дорівнює 10 %

1.1	1.2	1.3	1.4	1.5	Номери фотографій з легуванням
5,38	6,92	5,38	6,92	0	Кількість голчастих фрагментів
2.1	2.2	2.3	2.4	2.4	Номери фотографій без легування
10,77	7,69	0	0	0	Кількість голчастих фрагментів

технологічного процесу, який забезпечує однорідність розподілу компонентів та фаз у відновленому шарі деталей, підвищену зносостійкість, запропоновано нове обладнання, обґрунтовані його параметри та оцінено якість відновленого робочого шару.

Аналізом науково-технічної літератури показано, що електродугове наплавлення є найбільш ефективним технологічним і доступним методом відновлення деталей, особливо для невеликих ремонтних майстерень, в тому числі, і фермерських господарств. Для відновлення зі зміцненням невеликих обсягів деталей різноманітної номенклатури, що використовуються в умовах експлуатації, які суттєво відрізняються, необхідно застосування різних композицій для наплавлення, та це не може бути забезпечено можливостями таких підприємств з позицій економічної ефективності, а також дефіцитності витратних матеріалів.

Розроблено новий спосіб (захищено патентом України) і для реалізації його запропоновано обладнання, яке передбачає формування чарунок на поверхні вуглецевого дроту, що наплавляються, заповнення їх порошковою композицією в оптимальній кількості (~ 2% від частки дроту за рахунок розміру чарунок, їх діаметра і глибини) і подачу в зону наплавлення. Це дозволяє коригувати кількість внесення домішок у відновлений шар. Визначено ефективні параметри формування чарунок: сила притиснення роликів дорівнює 0,45 кН, глибина чарунок 0,15 мм і їх діаметр 0,39 мм, відстань між ними — 1 мм.

Експериментальним методом на валах Ø35 мм визначено та рекомендовано параметри нанесення покриттів для реалізації процесу легування: сила струму  $I_{\text{напл.}} = 160$  А,

напруга  $U_{\text{напл.}} = 20$  В, швидкість подачі дроту  $V_{\text{др.}} = 0,04$  м/с, частота обертання деталі  $n = 2$  об/хв, зміщення електрода з zenіту 2 мм і його виліт —  $\delta = 12$  мм. При таких параметрах обробки швидкість наплавлення складає  $V_{\text{напл.}} = 0,019$  м/с.

Встановлено, що наплавлення дротом Нп-30ХГСА сприяє формуванню структури верхнього бейніту, з грубими феритними голками, а — таким же дротом з додаванням домішки ПГ-10Н-01 — мартенситу, карбідів і залишкового аустеніту. Твердість робочих поверхонь наплавлених дротом з введенням порошку підвищується в 2,4 рази по відношенню до основного металу і в 2 рази в порівнянні з наплавленням без легуючих домішок. Аналогічна картина зміни характерна і для мікротвердості. Надано рекомендації з регулювання рівня мікротвердості наплавленого шару, виходячи з вимог нормативно-технічної документації по забезпеченню властивостей. Це корегується параметрами термообробки (відпуск 200–600°C).

Методом мікроспектрального аналізу оцінено розподіл компонентів по перерізу покриттів і перехідної зони. Розподіл легуючих компонентів з введенням домішки у відновлений шар рівномірний. Виявлено дифузю легуючих компонентів (Cr, Ni) в зону термічного впливу.

Експериментальними дослідженнями показано, що зносостійкість зразків, відновлених за запропонованою технологією легування, збільшується ~ в 2 рази при випробуванні в масляному середовищі і ~ в 2,35 рази при додаванні абразиву, у порівнянні з базовою технологією відновлення.

Виконана оцінка умов кристалізування (повна і неповна) і напружень, що формуються в різних зонах за-

лежно від швидкості наплавлення відновленого шару. Дослідження впливу швидкості подачі дроту 0,0043, 0,0131 та 0,04 м/с показали, що залишкові напруження найменші при максимальному її значенні і вони становлять: по осі X 12,1×9,8 МПа, по Y 11,8×9,8 МПа, по Z 35,4×9,8 МПа. Отримані результати використовували при реалізації технологічного процесу.

Розроблено комплексний підхід математичного опису і рекомендовано метод оцінки структур, що відрізняються фазовим складом і вмістом компонентів, дозволяє оцінити однорідність їх властивостей в різних зонах відновленого шару наплавленням запропонованим методом. На основі теоретичних розрахунків частки вмісту фаз було вибрано граничне число, що відділяє наявність голчастих структур від загальної кількості інших складових. Показано, що для всіх умовних зон (наплавлення, термічного впливу) з границями 6×6, 8×8, 10×10 і 50×50 пікселів на ділянці поверхневого шару більше голчастих структур, ніж в ЗТВ. Дослідженнями встановлено, що залежно від способу відновлення деталей наплавленням без домішок і з введенням порошкової композиції однорідність у розподілі компонентів у фазах істотно змінюється. Велика однорідність характерна для легованого шару. Це відноситься до всіх основних структурних складових (фериту і карбідів).

При заміні порошкового дроту новим технологічним процесом відновлення посадочних місць під підшипник валів Ø35 мм (вали коробки передач трактора

T-40М; вали головного зчеплення, вали вторинні КПП T-16М; вали коробки передач тракторів T-150K-09-25, ХТЗ-17221, T-150-05-09-25; вали колінчасті компресорів двигунів КАМАЗ-740.11-240, ЯМЗ-236, ЯМЗ-238, ЯМЗ-240) у кількості 1100 шт. (деталей до 550 шт.) на підприємстві ТОВ «Восход» забезпечує економічний ефект 5115 грн. З урахуванням збільшення терміну служби валів в експлуатації при порівнянні відновлення дротом Нп-30ХГСА і цього ж дроту з дозованим введенням домішки ПГ-10Н-01 сумарний економічний ефект від впровадження нової технології, обладнання для реалізації відновлення деталей і підвищення їх експлуатаційної стійкості дорівнює 12034 грн. на рік при обсягах відновлення деталей 550 шт.