

П.М. Фастовець, наук. співр.

Національний науковий центр “Інститут механізації та електрифікації сільського господарства” (ННЦ “ІМЕСГ”)

Оптимізація параметрів режиму наплавлення тріщиностійкого вуглецевого сталевго шару

На основі експериментальних досліджень встановлено математичні моделі зміни схильності до утворення тріщин і вмісту вуглецю у наплавленому металі, твердості і товщини наплавленого шару, товщини дефектного шару в залежності від параметрів режиму наплавлення дуговим способом із газополуменевим захистом. Визначено оптимальні параметри режиму наплавлення тріщиностійкого вуглецевого сталевго шару.

вали, відновлення, дугове наплавлення, вуглецевий шар, тріщини, твердість, параметри режиму, математичне планування експериментів, оптимізація

Через низьку купівельну спроможність сільськогосподарських товаровиробників, що склалась в державі з ряду причин, фактичний обсяг споживання запасних частин відстає від реальної потреби. Наприклад, в 2003 році для підтримання наявного машинно-тракторного парку у роботоздатному стані підприємствами машинобудівної галузі АПК було реалізовано запасних частин на суму 407,5 млн. грн. [1], що у 3 рази менше потреби.

Недостатня забезпеченість запасними частинами призводить до зменшення технічної готовності машин, яка вже зараз знаходиться у межах від 70% до 80% і нижче. Відповідно зростають простой техніки і, як наслідок, підвищується собівартість сільськогосподарської продукції, що є в цілому негативним фактором в економіці країни. Тому актуальною задачею є зменшення вартості запасних частин. Одним із шляхів вирішення цієї задачі може бути відновлення зношених деталей. У цьому разі ринок запасних частин доповниться більш дешевими відновленими деталями, які вироблятимуть підприємства ремонтної галузі АПК. Для якісного і ефективного відновлення деталей потрібно створити відповідне технологічне забезпечення ремонтного виробництва [2].

Дослідження у напрямку розробки сучасних технологій відновлення валів сільськогосподарських машин виконуються в ННЦ “ІМЕСГ” у рамках Національної програми виробництва технологічних комплексів машин і обладнання для АПК України на 1998 – 2005 роки і згідно завдань Науково-технічної програми на 2001 – 2005 роки “Технічний сервіс в агропромисловому виробництві”.

Для відновлення зношених шліцьових поверхонь, циліндричних поверхонь із шпонковими пазами, а також циліндричних поверхонь із зносом більше 0,5 мм застосовують способи електродугового наплавлення. На сьогодні зварювальні і наплавлювальні роботи займають більше половини загального об’єму відновлення деталей.

У ремонтному виробництві віддають перевагу тим способам наплавлення, які забезпечують меншу собівартість відновлення. Це наплавлення у відкритій атмосфері, в потоці повітря, у водяній парі, вібродугове і з газополуменевим захистом. Наприклад, собівартість наплавлення з газополуменевим захистом в 1,7-2,4 рази менша, ніж під шаром флюсу, у вуглекислому газі і порошковим дротом. Як показали дослідження, цьому способу властива висока стійкість проти утворення пор і широкі технологічні

можливості [3]. Зносостійкість відновлених поверхонь валів, наплавлених високовуглецевим електродним дротом вища, ніж наплавлених дротом Нп-30ХГСА у вуглекислому газі. Але в наплавленому вуглецевому металі утворюються тріщини. На основі аналізу науково-технічної інформації показано негативний вплив тріщин в наплавленому металі на зносостійкість і опір втомі відновлених валів [4]. Вже виконані окремі дослідження в напрямку підвищення тріщиностійкості вуглецевого наплавленого металу [5]. Проте для розробки технології відновлення зношених валів потрібно оптимізувати параметри режиму наплавлення тріщиностійкого вуглецевого сталевго шару.

Метою досліджень даної роботи – підвищити тріщиностійкість наплавленого вуглецевого сталевго шару шляхом вдосконалення способу наплавлення з газополуменевим захистом.

Дослідні наплавки виконували на циліндричні зразки діаметром 47 мм і довжиною 180 мм із сталі 45 ГОСТ 1050-88. Вміст основних хімічних елементів в сталі такий, %: вуглецю-0,44, кремнію-0,30, марганцю-0,73, сірки-0,034. На кожний зразок наплавляли по 5 ділянок. Щоб виключити вплив попереднього підігріву кожен наступну ділянку наплавляли після охолодження зразка на спокійному повітрі. Наплавлення виконували по гвинтовій траскторії із перекриттям суміжних валиків. У якості плавкого електроду використовували вуглецевий пружинний дріт В-2А ГОСТ 9389-75 діаметром 1,5 мм. Хімічний склад дроту такий, %: вуглецю-0,85, кремнію-0,27, марганцю-0,59, сірки-0,019. Зварювальну ванну захищали газовим полум'ям за допомогою газового пальника [6]. Для живлення пальника використовували технічний кисень ГОСТ 5583-78 і побутовий пропан-бутан ГОСТ 20448-80. Витрату газів контролювали ротаметрами РМ-0,41 ГУЗ і РМ-0,63 ГУЗ.

У дослідженні застосовували математичне планування експериментів [7]. Вибрали $\frac{1}{4}$ репліку (2^{5-2}) від повного факторного експерименту 2^5 . Матриця планування експерименту з генеруючими співвідношеннями $X_4=X_1 X_2 X_3$ і $X_5=X_2 X_3$ приведена в таблиці 1, а змінні фактори, їх рівні та інтервали варіювання – в таблиці 2. Досліди не дублювали. Дисперсії параметрів оптимізації визначали за трьома паралельними дослідями в центрі плану.

Параметрами оптимізації були: відносний коефіцієнт довжини тріщин як кількісний показник тріщиностійкості наплавленого металу; вміст вуглецю в наплавленому металі як показник зносостійкості відновленої поверхні; твердість наплавленого шару як показник його оброблюваності; товщина наплавленого шару як показник технологічності процесу відновлення; товщина дефектного шару як показник продуктивності механічної обробки наплавлених поверхонь.

Таблиця 1 – Матриця планування експерименту

№ п/п	Змінні фактори				
	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5
1	+	+	+	+	+
2	-	+	+	-	+
3	+	-	+	-	-
4	-	-	+	+	-
5	+	+	-	-	-
6	-	+	-	+	-
7	+	-	-	+	+
8	-	-	-	-	+

Таблиця 2 – Позначення, рівні та інтервали варіювання факторів

Фактори	Позначення		Рівні факторів			Інтервал варіювання
	дійсне	кодове	нижній -1	нульовий 0	верхній +1	
Швидкість наплавлення, м/год.	V _н	X ₁	28	40	52	12
Сила зварювального струму, А	J _{зв}	X ₂	125	155	185	30
Напруга на дузі, В	U _д	X ₃	20	22	24	2
Витрата кисню, л/год.	Q _к	X ₄	200	250	300	50
Крок наплавлення, мм	S	X ₅	3,5	4,0	4,5	0,5

Для оцінки тріщиностійкості застосовували методику, приведену в роботі [8]. Тріщини в наплавленому металі виявляли магнітопорошковим методом після токарної обробки і шліфування. Використовували магнітний дефектоскоп ПМД-70. На виготовлених дефектограмах визначали довжину тріщин. Схильність наплавленого металу до утворення тріщин оцінювали відносним коефіцієнтом довжини тріщин, який визначали за формулою:

$$K_T = \frac{\sum_{i=1}^n l_i}{n \sqrt{\pi^2 d^2 + s^2}}, \quad (1)$$

де l_i – довжина тріщин на i -му наплавленому валику, мм;

n – кількість наплавлених валиків, шт.;

d – діаметр поверхні, мм;

s – крок наплавлення, мм.

Вміст вуглецю у наплавленому шарі визначали кулонометричним способом за допомогою експрес-аналізатора АН-7529, а твердість – на приладі ТК-14-250 із переводом в одиниці твердості за Бринелем. Товщину наплавленого шару і товщину дефектного шару вимірювали за допомогою мікрометра.

В результаті обробки експериментальних даних отримали математичні моделі зміни відносного коефіцієнту довжини тріщин (K_T), вмісту вуглецю в наплавленому металі (C_H), твердості наплавленого шару (НВ), товщини наплавленого шару (h_H) і товщини дефектного шару (Z) в залежності від параметрів режиму наплавлення, які представлені рівняннями регресії у натуральних координатах:

$$K_T = -1,886 + 0,0024V_H + 0,0043J_{зв} + 0,0785U_d - 0,0005Q_k - 0,0440S, \quad (2)$$

$$C_H = 0,655 + 0,0005V_H + 0,0011J_{зв} - 0,0138U_d - 0,0004Q_k + 0,0200S, (\%) \quad (3)$$

$$HB = 399,5 + 1,22V_H - 0,50J_{зв} - 7,80U_d - 0,27Q_k + 22,20S, (HB) \quad (4)$$

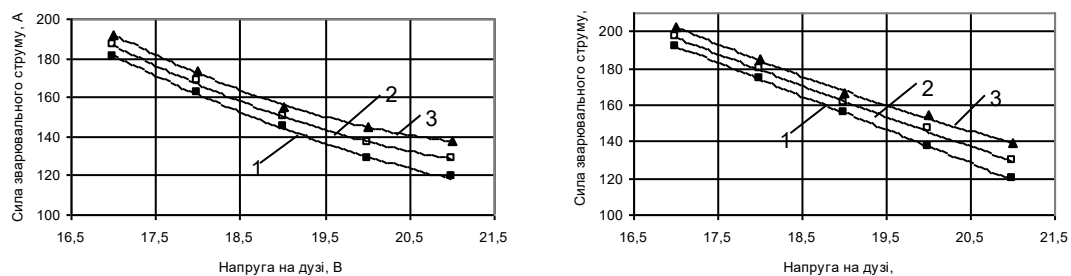
$$h_H = 3,9 - 0,0514V_H + 0,0144J_{зв} + 0,0020Q_k - 0,5285S, (мм) \quad (5)$$

$$Z = 1,707 - 0,0182V_H + 0,0013J_{зв} + 0,0043Q_k - 0,3100S, (мм) \quad (6)$$

Перевірка однорідності дисперсій за критерієм Фішера показала адекватність отриманих моделей. Найкращими варіантами режиму наплавлення будуть ті, які призводять до зменшення показників K_T , НВ і Z та збільшення показників C_H і h_H . Але визначення цих варіантів ускладнюється через нерівнозначний вплив параметрів

режиму наплавлення на параметри оптимізації. Наприклад, згідно з рівняннями (2) і (6) для зменшення показників K_T і Z необхідно зменшувати силу зварювального струму. В свою чергу згідно з рівняннями (3), (4) і (5) це призведе до зменшення вмісту вуглецю і товщини наплавленого шару та підвищення його твердості, що не бажано. Тому для визначення найкращих варіантів приймали додаткові умови.

По-перше, досліджували варіанти, які знаходяться в області оптимуму для показника K_T . Область оптимуму на поверхні відгуку для показника K_T визначається лінією, де цей показник дорівнює нулю, так як за своїм фізичним змістом він не може набувати від'ємних значень. За аналогією із рівнем значущості, прийнятим в техніці, досліджували параметри, які відповідають значенню показника $K_T=0,05$. Це означає, що по довжині гвинтової траєкторії 95% наплавленої поверхні буде без тріщин. По-друге, виходячи із технологічних міркувань та з метою спрощення вибору оптимальних параметрів режиму наплавлення досліджували ті із них, де $Q_k=250$ л/год., $S=4,0$ мм і $Q_k=300$ л/год., $S=4,5$ мм. Із врахуванням цих допущень при уявному перетині поверхні відгуку для показника K_T площиною $K_T=0,05$ отримали лінії, які зображено на рис.1.



а

б

а- $Q_k=250$ л/год., $S=4,0$ мм; б- $Q_k=300$ л/год., $S=4,5$ мм; 1- $V_n=50$ м/год., 2- $V_n=40$ м/год., 3- $V_n=30$ м/год.

Рисунок 1 – Залежності сили зварювального струму від напруги на дузі при наплавленні шару із відносним коефіцієнтом довжини тріщин 0,05.

Точки, які знаходяться під кривими, відповідають силі струму і напрузі на дузі, при яких відносний коефіцієнт довжини менше 0,05, а над кривими – більше 0,05. Зображені на рис.1 залежності сили зварювального струму від напруги на дузі апроксимували поліноміальними функціями другого степеня із достовірністю 0,9985. Наприклад, для кривої 3 на рис.1а апроксимована функція представлена виразом:

$$J_{зв} = 2,136U_d^2 - 94,787U_d + 1186,5, \quad (7)$$

Аналіз залежностей, представлених на рис.1, показав, що одночасне підвищення витрати кисню і кроку при постійній швидкості наплавлення призводить до збільшення площі під кривими, що рівнозначно розширенню області оптимальних значень для сили зварювального струму і напруги на дузі. З технологічної точки зору це буде сприяти підвищенню продуктивності наплавлення.

За отриманими виразами типу (7) розраховували силу струму і напругу на дузі, які забезпечують наплавлення шару із відносним коефіцієнтом довжини тріщин не більше 0,05. Із цих варіантів вибирали найкращі по відношенню до вмісту вуглецю, твердості і висоти наплавленого шару та товщини дефектного шару. Вибір здійснювали методом багатокритеріальної оптимізації, використовуючи 5 комплексних критеріїв: Байєса-Лапласа, Гурвіца, Севіджа, Ходжа-Лемана [9] і критерій за ДСТУ ISO 9000-2-96 [10]. За кожним критерієм розраховували оціночну функцію, яка характеризує

досліджувані варіанти. Згідно з методикою [9,10] найкращими є ті варіанти, для яких оціночна функція набуває максимальних значень, а за критерієм Севіджа – мінімальних. Найкращі варіанти режиму наплавлення приведені в таблиці 3. Ці дані свідчать про те, що при виборі оптимальних параметрів режиму наплавлення потрібно віддати перевагу варіантам за номерами 3, 6, 9, 12. Значення параметрів режиму наплавлення для цих варіантів приведені в таблиці 4.

Таблиця 3 – Найкращі варіанти режиму наплавлення і значення оціночних функцій

Критерій Байєса-Лапласа		Критерій Гурвіца		Критерій Севіджа		Критерій Ходжа-Лемана		Критерій ДСТУ ISO 9000-2-96	
№ варіанту	Значення функції	№ варіанту	Значення функції	№ варіанту	Значення функції	№ варіанту	Значення функції	№ варіанту	Значення функції
3	0,771	12	0,570	9	1,74	12	0,165	3	1,078
6	0,706	3	0,345	12	1,83	9	0,038	6	1,061
12	0,536	9	0,286	8	1,90	3	-0,035	9	1,050
9	0,345	2	0,125	11	2,0	11	-0,123	12	1,047
2	0,338	13	0,026	1	2,34	2	-0,212	14	1,046
16	0,132	16	0,010	2	2,38	8	-0,247	2	1,042
5	0,130	6	0,003	3	2,46	6	-0,385	16	1,027

Таблиця 4 – Оптимальні параметри режиму наплавлення тріщиностійкого вуглецевого сталевго шару

№ варіанту	Параметри режиму наплавлення				
	V _н , м/год.	J _{зв} , А	U _д , В	Q _к , л/год.	S, мм
3	30	175	18,0	250	4.0
6	30	175	18,5	300	4.5
9	40	165	18,0	250	4.0
12	40	175	18,0	300	4.5

Таким чином при розробці технологічних процесів відновлення зношених деталей дуговим наплавленням із газополуменевим захистом слід керуватись результатами, приведеними в таблиці 4. Згідно із цими результатами наплавляти потрібно при швидкості не більше 40 м/год., мінімально допустимій напрузі на дузі і збільшуючи силу зварювального струму до межі, при якій електрична дуга горить стабільно. Це, відповідно, 18,0-18,5 В і 165-175 А. Потрібно враховувати також, що найменшу твердість має метал, наплавлений за варіантом №6 і вона становить 220 НВ. А після зняття дефектного шару залишається шар металу товщиною 2,5 мм на сторону, що у більшості випадків достатньо, щоб компенсувати спрацювання відновлюваної поверхні. Тому режим наплавлення, який відповідає варіанту №6 слід вважати оптимальним.

Отримані в даній роботі моделі зміни фізико-механічних властивостей вуглецевого сталевго шару, наплавленого дуговим способом із газополуменевим

захистом, які представлені рівняннями (2)-(6), адекватно описують досліджувані процеси і можуть бути використані при виборі та обґрунтуванні оптимальних режимів наплавлення зношених поверхонь деталей типу “вал”.

Підвищення продуктивності наплавлення тріщиностійкого вуглецевого сталевго шару із оптимальними технологічними властивостями і геометричними розмірами можна досягти шляхом збільшення витрати кисню від 250 л/год. до 300 л/год. і кроку наплавлення від 4.0 мм до 4,5 мм.

Перспективи подальших розробок у даному напрямку полягають в розробці ефективних технологічних процесів відновлення зношених деталей типу “вал” наплавленням тріщиностійкого вуглецевого сталевго шару і впровадженні їх у ремонтне виробництво.

Список літератури

1. Іванишин В. Основні напрями промислової політики у розвитку машинобудування для АПК// Техніка АПК. - 2004. - № 6-7. – С.4-5.
2. Войтюк В., Демко А., Демко С. Технічний сервіс – як засіб розв’язання проблем надійності сільськогосподарської техніки // Техніка АПК. - 2004. - № 6-7. – С. 37-38.
3. Тывончук П.А. Исследование и разработка способа дуговой наплавки с использованием природного газа в качестве защитной среды: Автореф. дис...канд. техн. наук: 05.04.05 / КПИ.- К., 1981. - 15 с.
4. Фастовець П.М. Вплив тріщин у наплавленому металі на зносостійкість і опір втомі відновлених валів сільськогосподарських машин (Огляд)// Агромех-2004: Матеріали міжнар. наук.-практ. конф., 22-24 вересня 2004 р. – Львів: Львівський держ. аграр. ун-т. – 2004. – С.213-220.
5. Космацький П., Тивончук П., Фастовець П. Як позбутися тріщин у наплавленому металі// Техніка АПК. -№ 4. – 1996. – С.16-17.
6. Патент 60666А. Україна, В 23 К 9/16. Пальник для захисту зварювальної ванни/ Тивончук П.О., Космацький П.В., Фастовець П.М. (Україна). - № 2003010738, Заявлено 28.01.2003; Опубл. 15.10.2003; Бюл. №10.- 3 с.
7. Спиридонов А.А. Планирование эксперимента при исследовании технологических процессов. – М.: Машиностроение, 1981. – 184 с.
8. Сафаров М.М., Левин Э.Л., Трофимов Г.С. Исследование влияния дефектов структуры наплавленного металла на усталостную прочность // Эксплуатация и ремонт сельскохозяйственных машин. - Ульяновск.,1976.-С. 130-133.
9. Мушик Э., Мюллер П. Методы принятия технических решений: Пер. с нем. – М.: Мир,1990.–208 с.
10. ДСТУ ISO 9000-2-96. Стандарти з управління якістю та забезпечення якості. Частина 2. Настанови щодо застосування.

На основі експериментальних досліджень установлені математичні моделі зміни схильності до утворення тріщин і вмісту вуглецю в наплавленому металі, твердості і товщини наплавленого шару, товщини дефектного шару в залежності від параметрів режиму наплавки дуговим способом з газопламенною захистом. Визначені оптимальні параметри режиму наплавки тріщиностійкого вуглецевого сталевго шару.

On the basis of experimental researches mathematical models of change of the cracking susceptibility and contents of carbon in deposited metal, hardness and thickness deposited layer, thickness of a defective layer was established depending on surfacing parameters by an arc way with gas-flame protection. Optimum surfacing parameters of crack resistant carbonaceous steel layer were determined.

Одержано 29.04.05