

УДК 621.793.927.7

О. Шаблій, докт. фіз.-мат. наук; Ч. Пулька, докт. техн. наук

Тернопільський державний технічний університет імені Івана Пулюя

ДОСЛІДЖЕННЯ МІКРОСТРУКТУРИ І ВЛАСТИВОСТЕЙ НАПЛАВЛЕНОГО МЕТАЛУ, ОТРИМАНОГО ПРИ ІНДУКЦІЙНОМУ НАГРІВАННІ

Проведено дослідження наплавленого металу, отриманого за допомогою розробленої авторами нової технології індукційного наплавлення тонких сталевих дисків з використанням комбінованого екранування теплових та електромагнітних полів. Показано, що мікроструктура, твердість та стійкість проти зношування наплавленого порошкоподібним твердим сплавом ПГ-С1 перебувають на тому ж рівні, що і при наплавленні нагрівальною системою без екранування теплових та електромагнітних полів. При цьому рівномірність товщини шару наплавленого металу підвищується на 12,4%, досягається економія електроенергії до 32% та скорочується час наплавлення з 32с до 22с в порівнянні з технологією без екранування теплових та електромагнітних полів.

Ключові слова: індукційне наплавлення, тонкі сталеві диски, порошкоподібний твердий сплав, теплові та електромагнітні поля, мікроструктура, твердість, стійкість проти зношування.

O. Shabliy, Ch. Pulka

INVESTIGATION OF MICROSTRUCTURE AND PROPERTIES OF THE WELDED METAL, OBTAINED UNDER INDUCTION HEATING

Investigation of the welded metal obtained thanks to the development of new technology of induction welding of the thin steel disks using combined scanning of the thermal and electromagnetic fields, has been carried out. It is shown that the microstructure, hardness and wear resistance of the welded powder-like hard alloy ПГ-С1 is similar that welded by the heating system without screening of the heat and electro-magnetic fields, uniformity of the welded metal layer thickness being higher in 12,4%, electro-power saving reaching up to 32%, welding time being shorter from 32 sec to 22 sec as compared with the technology without screening of the heat and electro-magnetic fields.

Key words: induction welding, thin steel discs, powder, like hard alloy, heat and electro-magnetic fields, microstructure, hardness and wear resistance.

Вступ

У даний час в ґрунтообробній і збиральній сільськогосподарській техніці використовують робочі органи у вигляді тонких плоских деталей, в тому числі і тонкі диски. До них належать диски луцильників, дискові ножі для різання шиферу і зрізання соняшнику, диски копачів бурякозбиральних комбайнів, фрези і т.п, які експлуатуються в умовах абразивного спрацювання, значних статичних і динамічних навантажень, повинні мати високу стійкість проти зношування і міцність [1-5].

З метою підвищення їх стійкості до зношування і забезпечення самогострювання в процесі експлуатації робочі поверхні їх зміцнюють різними методами наплавлення. [6-11].

Найбільш широке розповсюдження для зміцнення робочих поверхонь вище названих деталей отримало індукційне наплавлення стійкими до зношування порошкоподібними твердими сплавами. В його основі лежить нагрівання і розплавлення присадного матеріалу під дією струмів високої частоти. Цей процес є найбільш технологічним через нескладність обладнання, що використовується, простоту самого процесу наплавлення, і через те, що не вимагає високої кваліфікації робітників-наплавлувальників.

Існуючі процеси наплавлення тонких дисків, в тому числі й індукційне, мають ряд недоліків: порівняно низька продуктивність, велика енергоємність, а також нерівномірність товщини шару наплавлюваного металу.

Особливу складність являє собою задача наплавлення тонких сталевих дисків як суцільної, так і зубчастої форми з шириною наплавлення, більшою за висоту зуба, що пов'язано з конструюванням і проектуванням нагрівальних джерел (індукторів і систем).

Авторами розроблені нові технологічні процеси (нагрівальні системи) індукційного наплавлення одночасно по всій робочій поверхні тонких сталевих дисків, які дозволяють покращити техніко-економічні показники у випадках, коли: індуктор вільний від допоміжних засобів керування тепловим і електромагнітним полями [12-13]; існує нагрівальна система (індуктор, тепловий та електромагнітний екрани ІТТЕ) [14-16].

Дослідженням мікроструктури і властивостей наплавленого металу при індукційному напавленні металевих деталей присвячені роботи [5], [17], у випадку, коли в нагрівальних системах відсутні допоміжні засоби керування тепловим та електромагнітним полями.

Метою даної роботи є дослідження мікроструктури наплавленого металу, його твердості, зносостійкості, продуктивності нанесення покриття, стабільності товщини шару наплавленого металу, що наносили за допомогою нагрівальної системи індуктор, тепловий та електромагнітний екран (ІТЕЕ), і порівняння їх з результатами, отриманими нагрівальною системою без комбінованого екранування тепловими та електромагнітними полями.

Методика досліджень. Вимірювання мікротвердості проводили на мікротвердомірі М-400 фірми „Леко”. Мікроструктуру досліджуваних зразків вивчали на мікроскопі НЕОФОТ-32 (Німеччина). Травлення зразків, напавлених стійким проти зношування сплавом ПГ-С1, проводили електролітичним способом в 20% водному розчині хромового ангідриду напругою $U = 20$ В, час витримки $\tau = 5$ с.

Аналіз елементного складу напавлених зразків проводили на мікроаналізаторі SX-50 (Камебакс) фірми „Камека”. Випробування стійкості проти зношування напавленого металу проводили на машині НК-М [18].

Результати досліджень виражали у вигляді відносної стійкості проти зношування, яка дорівнює відношенню втрати маси еталону до втрати маси досліджуваних зразків.

Наплавлення здійснювалось одночасно по всій робочій поверхні за допомогою генератора типу ВЧИ-63/0,44 без обертання деталі за енергоощадним режимом нагрівання [2], регулювання яким здійснювалось за допомогою пристрою [19]. Технічні характеристики генератора для двох нагрівальних систем наведені в таблиці 2.

Матеріали при дослідженні. В таблиці 1 представлені порошкові сплави, які використовувалися при дослідженні на залізній, а також на нікелевій основі (дослідна партія), розроблені Інститутом електрозварювання ім. Е.О.Патона НАН України (ТУ ІЕЗ 316-81).

Таблиця 1 – Досліджувані порошкові сплави

Наплавлюваний матеріал		Хімічний склад, %									Твердість наплавлюваного металу (HRC)
тип	Марка	C	Cr	Si	Ni	Mn	B	Cu	W	Fe	
порошки	ПГ-СІ сормайт № 1 (У30Х28Н4С4)	2,5-3,3	27-31	2,8-4,2	3,0-5,0	0,4-1,5	-	-	-	основа	51
	ПГ-АН5 (НХ 1603Р3)	0,9-1,4	14-18	2,5-3,5	основа	-	2,2-3,0	-	-	н.б. 3,0	45÷55

ПГ-АН8 (HX30C3P4)	1,4- 2,0	28-32	2,8- 3,5	ос- нова	-	3,2- 4,6	-	-	н.б. 3,0	56÷65
ПГ-АН9 (HXBC2P3П)	0,3- 0,9	6-10	1,5- 2,5	ос- нова	-	3,6- 3,2	-	-	н.б. 3,0	46÷58

Дослідження індукційного наплавлення тонких дисків проводили за допомогою нагрівальної системи (ІТЕЕ) (рис. 1) [16], яка складається з верхньої 8 і нижньої 6 притискних плит, а також приводу 9 для піднімання верхньої плити 8.

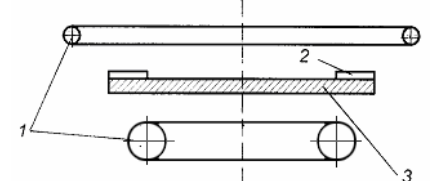
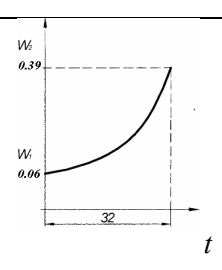
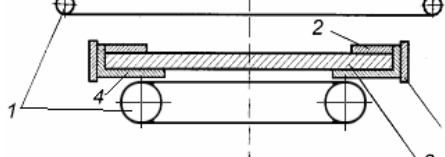
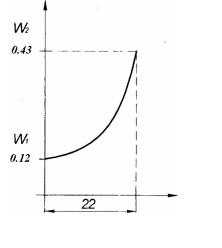
Деталь 3 з попередньо насипаною на неї шихтою 10 твердого сплаву ПГ-С1 встановлювалась у двовитковий кільцевий індуктор, 1 – верхній, 2 – нижній виток. На торці диска і нижній його поверхні, протилежній наплавленню, по периметру розташовано тепловий екран 4, а також на торці диска встановлено електромагнітний екран 5, які між собою з'єднані жорстко і закріплені до нижньої плити. Електромагнітний і тепловий екрани виконані з можливістю вертикального переміщення відносно торця диска 3 і витків індуктора 1 і 2 за допомогою приводу 7, закріпленого на нижній плиті 6, що дає можливість регулювати температурне поле в зоні наплавлення, оскільки при індукційному наплавленні порошкоподібний твердий сплав розплавляється від поверхні основного металу.

Дослідження наплавленого металу отриманого за допомогою нагрівальної системи ІТЕЕ, проводили на мікроструктуру, товщину шару наплавленого металу, продуктивність процесу, зносостійкість, твердість та економію електроенергії з метою забезпечення наплавленого валика шириною 10...50мм і товщиною відповідно 0,8...1,5 мм. Отримані результати порівнювали з результатами, отриманими нагрівальною системою без екранування теплових та електромагнітних полів. При цьому використовували диски, які виготовлені зі сталі Ст 3 товщиною 3 мм і порошкоподібний твердий сплав ПГ-С1.

В таблиці 2 представлені нагрівальні системи і параметри нагрівання при енергоощадному режимі наплавлення [12].

Розглянемо металографічні дослідження шару наплавленого металу, одержаного за допомогою нагрівальної системи (ІТЕЕ).

Таблиця 2 – Нагрівальні системи і параметри наплавлення

Нагрівальні системи	Параметри наплавлення					Тип генератора	Характер зміни питомої потужності на індукторі $W \cdot 10^{-9} \text{ Вт/м}^3$
	Напруга на контурі, кВ	Анодна напруга, кВ	Струм сітки лампи, А	Струм анода лампи, А	Час наплавлення, с		
без екранування теплових і електромагнітних полів 	Змінні					ВЧІ – 63/0,44	
	вхідні чисельник ($t=0 \text{ с}$)		вихідні знаменник ($t=32 \text{ с}$)				
	2.2 6.4	8.0 9.5	3.6 1.85	1.1 6.0	32		
з екрануванням теплових і електромагнітних полів 	Змінні					ВЧІ – 63/0,44	
	вхідні чисельник ($t=0 \text{ с}$)		вихідні знаменник ($t=22 \text{ с}$)				
	2.2 7.0	8.3 10.0	0.36 0.95	1.1 3.1	22		

1 - індуктор; 2 - твердий сплав; 3 - деталь;
4, 5 – відповідно тепловий і електромагнітний екрани

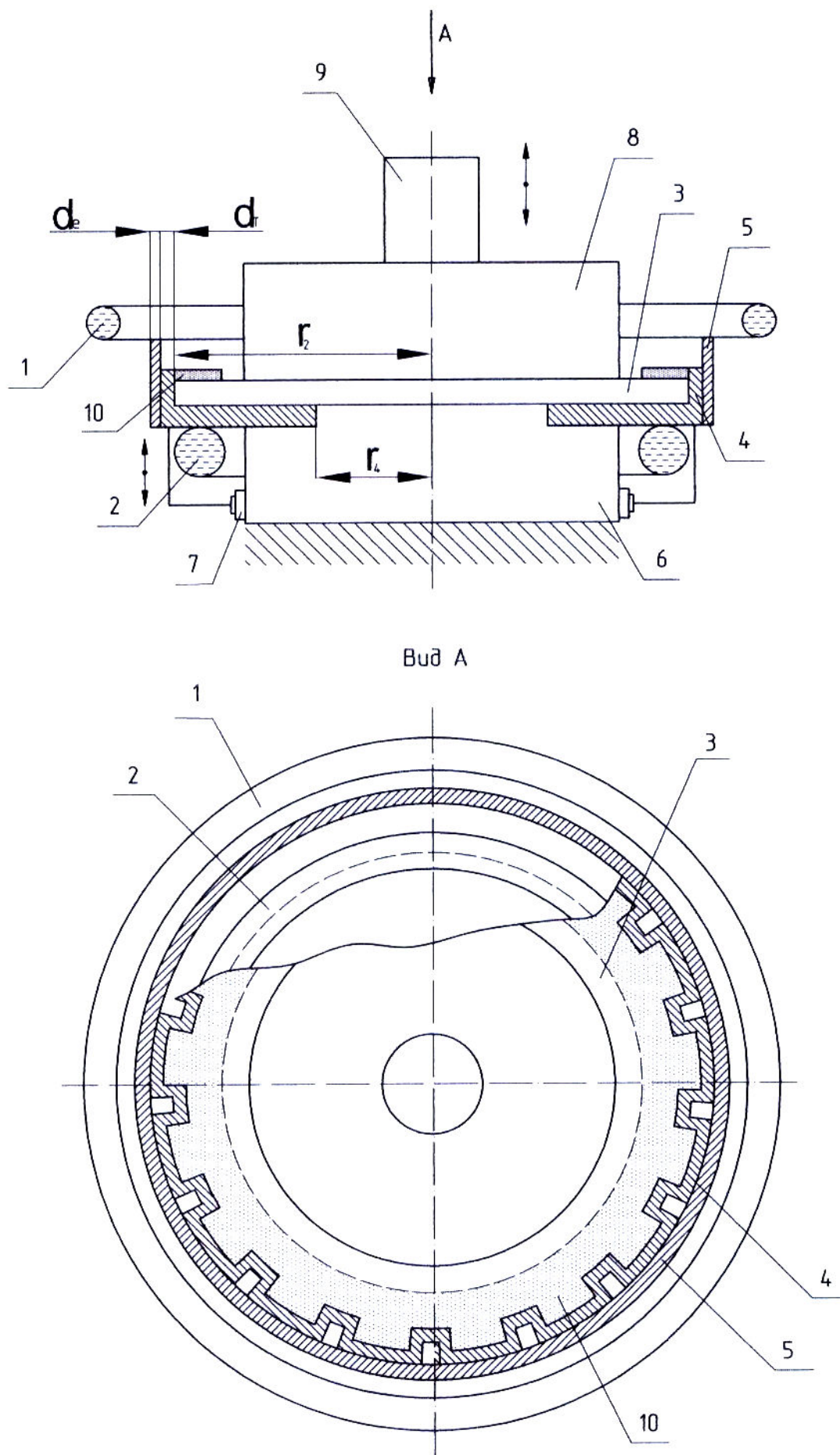


Рисунок 1 – Пристрій для регулювання потужності в зоні наплавлення з жорстко з'єднаними між собою тепловим і електромагнітним екранами (позначення див. в тексті)

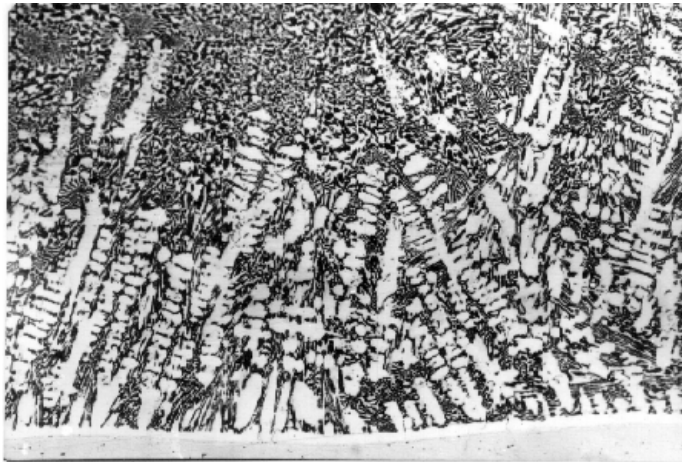
1. Металографічні дослідження наплавленого металу з урахуванням екранування теплових і електромагнітних полів

У мікроструктурі металу, наплавленого за розробленою технологією, спостерігали первинні хромисті карбіди у вигляді досить великих пластин прямокутної або ромбовидної форми, достатньо рівномірно розподілені в матриці (рис. 2, а, б, в). З боку наплавленого металу до межі розділення примикають скупчення карбідної евтектики. На лінії сплавлення наплавлений метал має чітко виражену дендритну структуру (рис. 2, а, б). У верхній зоні наплавленого металу спостерігали виділення первинних карбідів також віялоподібного характеру (рис. 2, в), як і при напавленні двовитковим кільцевим індуктором без екранування теплових і електромагнітних полів. Біла смужка на межі розділення між основним і наплавленим металом має змінну ширину (15...20 мкм). Мікротвердість структурних складових: карбідів – 14300...15440, матриці – 5150...5900, зони сплавлення – 3780...4550 Н/мм². На краях наплавленого валика структура являє собою суміш карбідів різної дисперсності, при цьому первинних великих пластинчатих карбідів не спостерігали.

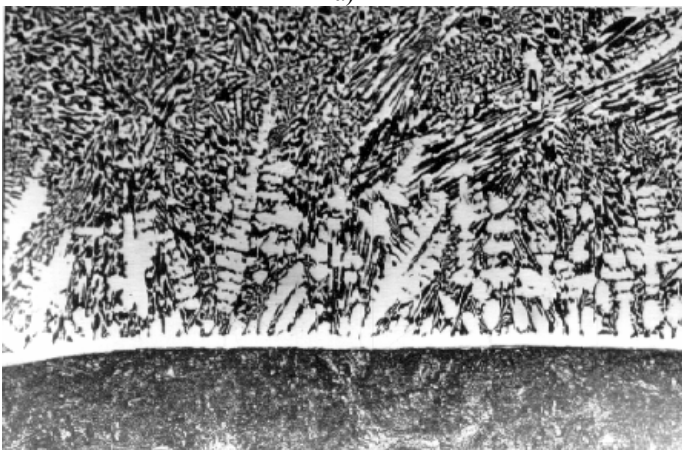
Результати вимірювань мікротвердості структурних складових подані в таблиці 3.

Таблиця 3 – Характеристики мікротвердості структурних складових

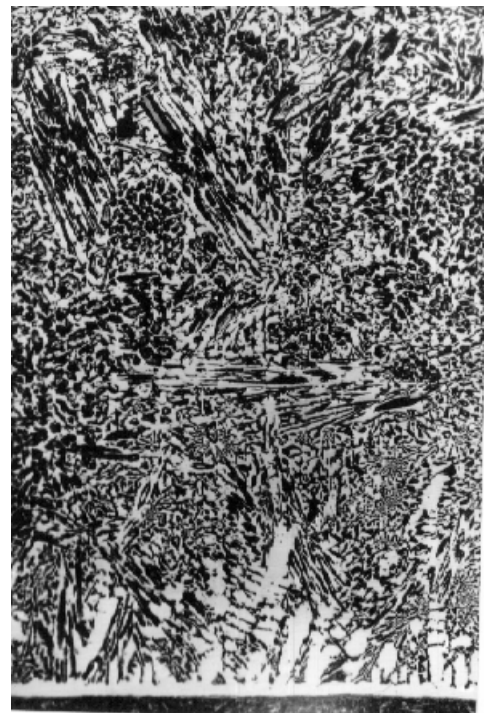
Нагрівальні системи	Мікротвердість структурних складових, Н/мм ²		
	Карбіди хрому	Матриця	Біла смужка (перехідна зона)
Без екранування	15320...17820	4550...5140	3220...3570
З екрануванням	14300...15440	5150...5900	3780...4550



а)



б)



в)

Рисунок 2 – Мікроструктура (×200, зменш.2/3) наплавленого металу зразка Ст.3 + ПГ-С1: а – без дотравлювання в 4% розчині азотної кислоти біля лінії сплавлення; б – із дотравлюванням в 4% азотній кислоті біля лінії сплавлення, зона термічного впливу; в - по товщині наплавленого металу

Результати досліджень мікроструктури і мікротвердості металу, наплавленого індукційним методом, з використанням нагрівальної системи без екранування і з екрануванням теплових і електромагнітних полів практично не відрізняються.

2. Мікрорентгеноспектральний аналіз перехідної зони сплавлення основного металу і твердого сплаву з застосуванням нагрівальної системи (ІТЕЕ)

З метою визначення складу структурних складових і встановлення впливу їх на властивості наплавленого металу, був проведений мікрорентгеноспектральний аналіз наплавленого металу.

На рис. 3 представлено розподіл нікелю і хрому, хрому і вуглецю, а також марганцю і кремнію в наплавленому металі. У всіх випадках аналіз проводили приблизно в центрі наплавленого шару перпендикулярно до межі фазового переходу на глибині в даному випадку до 480 мкм від межі сплавлення з основним металом.

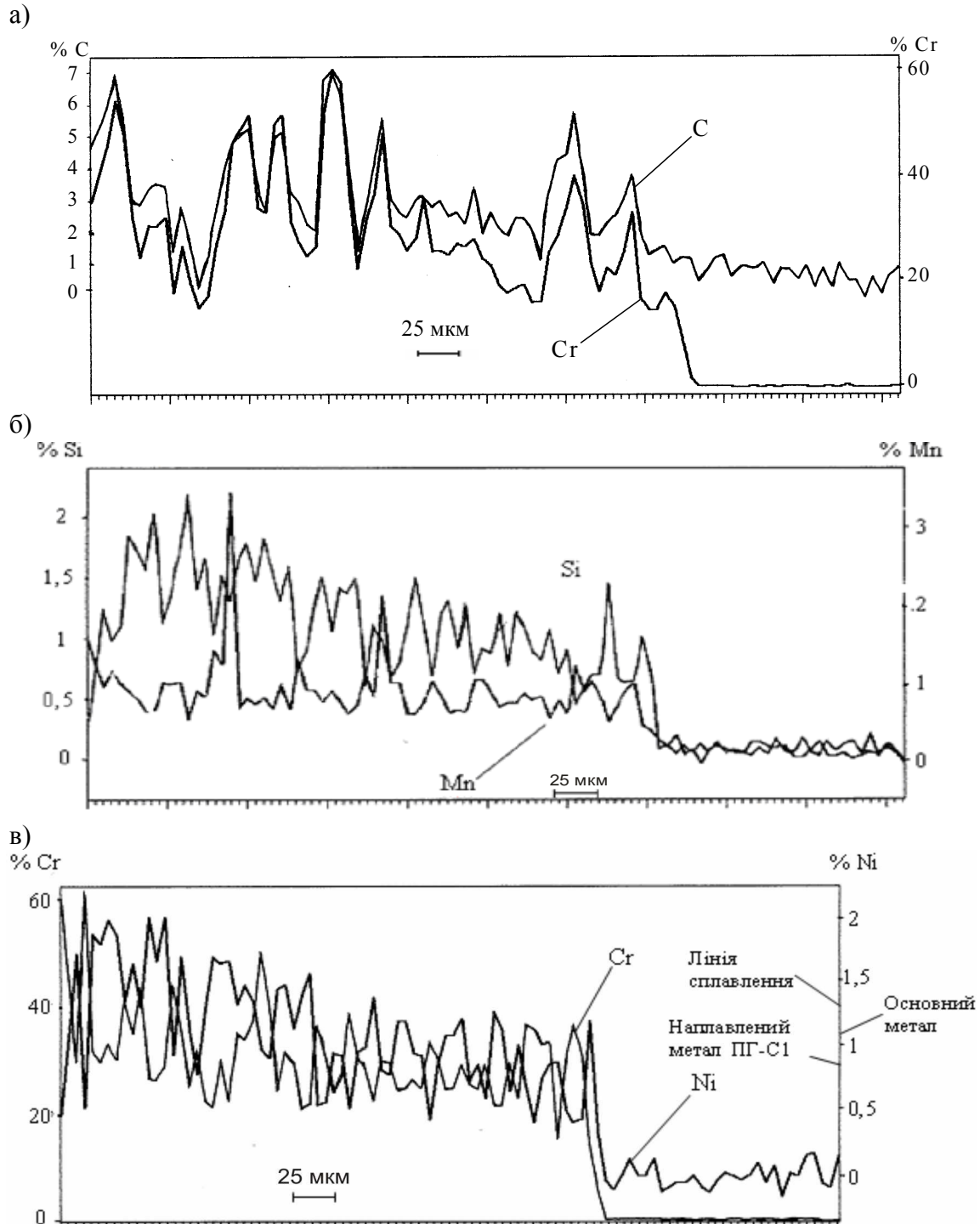


Рисунок 3 – Розподіл елементів по висоті наплавленого металу Ст.3 + ПГ-С1:
а – вуглецю і хрому; б – кремнію і марганцю; в - хрому і нікелю

Встановлено, що у досліджуваних зразках вміст хрому і нікелю в твердому розчині перебуває приблизно на одному рівні (рис. 3, в). Вивчали якісний розподіл вуглецю і хрому в зразку. Помітного дифузійного перерозподілу вуглецю біля лінії сплавлення не спостерігали. Вуглець зв'язаний в карбідах. За даними рентгеноструктурного аналізу, це карбіди типу $(Fe, Cr, Mn)_7C_3$.

3. Дослідження стійкості проти зношування і товщини шару наплавленого металу, отриманого за допомогою нагрівальної системи (ІТЕЕ)

На рис. 4 представлені діаграми відносної стійкості проти зношування і твердості наплавлених зразків (середні за трьома випробуваннями). Стійкість проти зношування і твердість наплавленого металу перебуває приблизно на тому ж рівні, що і в зразку при наплавленні без екранування теплових та електромагнітних полів (рис. 4) і складає відповідно 2,6 і 2,58, а твердість для двох випадків становить $HV = 800 \pm 85$ МПа.

З метою якісної оцінки нагрівальної системи ІТЕЕ були проведені дослідження на інших порошкових сплавах, зокрема на нікелевій основі.

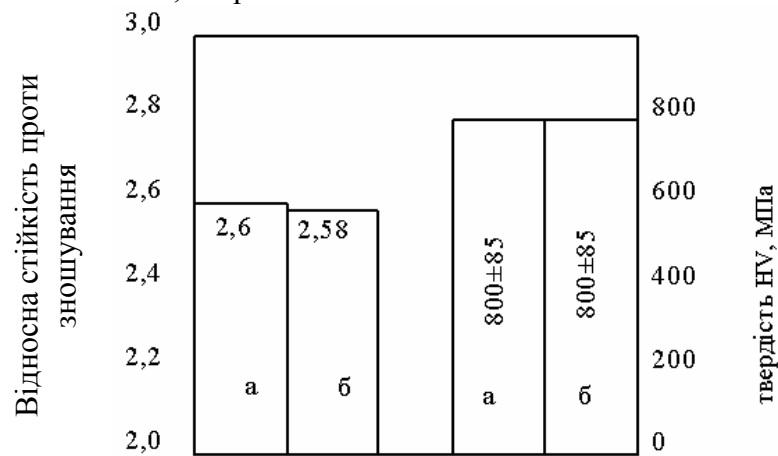


Рисунок 4 – Відносна стійкість проти зношування і твердість зразків при індукційному наплавленні без екранування (а) і з екрануванням (б) теплових і електромагнітних полів для матеріалів Ст.3 + ПГ-С1

Основні параметри, режими наплавлення і нагрівальні системи представлені в таблиці 2 для матеріалу ПГ-С1. Ці ж схеми і режими були використані для наплавлення дисків порошковими сплавами на нікелевій основі ПГ-АН5, ПГ-АН8, ПГ-АН9. Час наплавлення з використанням нагрівальної системи з урахуванням теплових і електромагнітних полів для цих матеріалів складає відповідно 16, 18, 20 с.

На рис. 5 показані диски, які наплавлені різними порошковими сплавами.

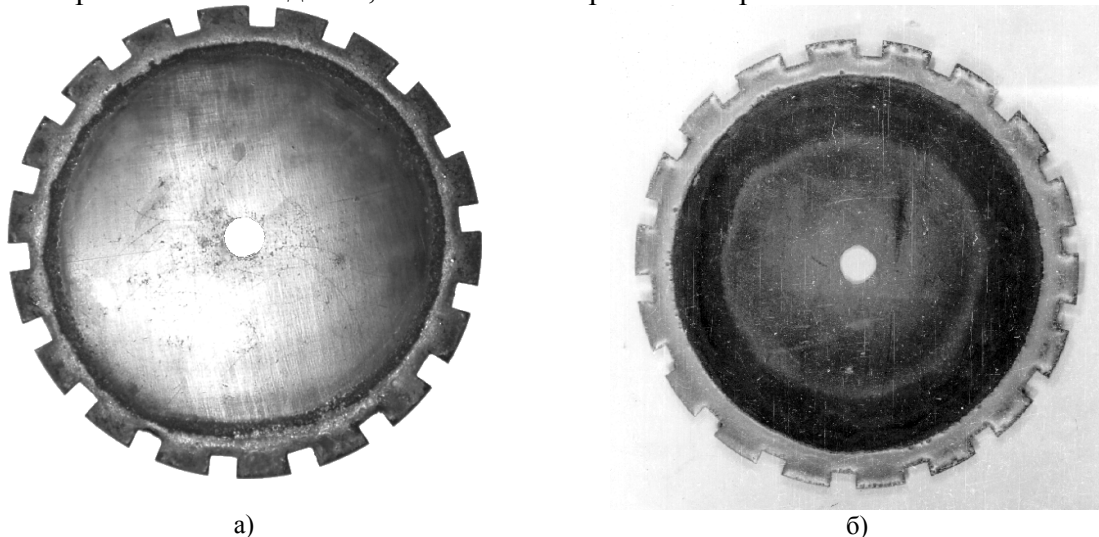


Рисунок 5 – Диск, наплавлений з допомогою нагрівальної системи ІТЕЕ:
а – порошковий сплав ПГ-С1; б – порошковий сплав ПГ-АН9, основний метал – Ст.3

На рисунку 6 представлені діаграми відносної стійкості проти зношування порошковими сплавами.

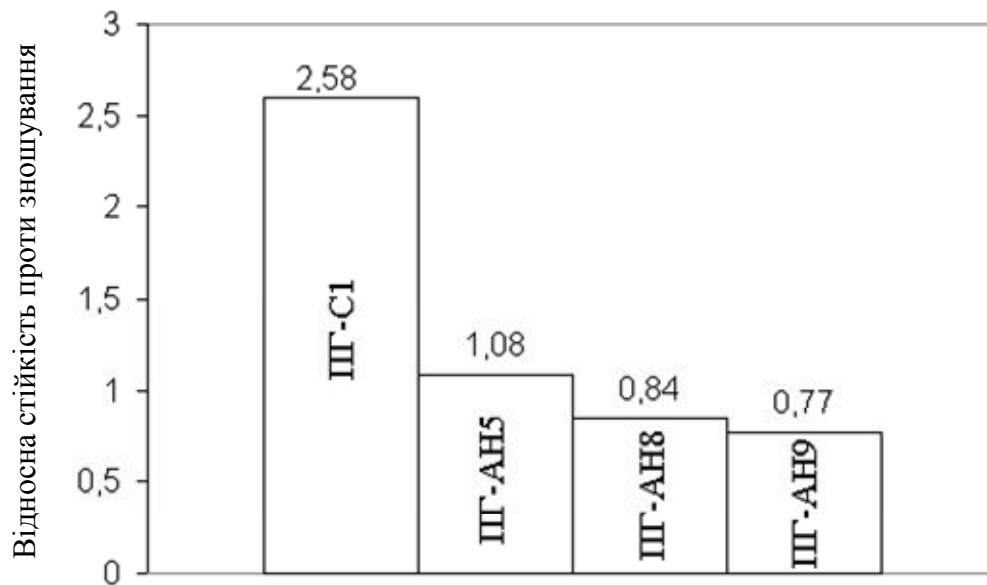


Рисунок 6 – Діаграми стійкості проти зношування при наплавленні різними порошковими сплавами

Як видно з рисунка 6, порошкові сплави на нікелевій основі мають значно нижчу стійкість проти зношування в порівнянні з порошковим сплавом ПГ-С1.

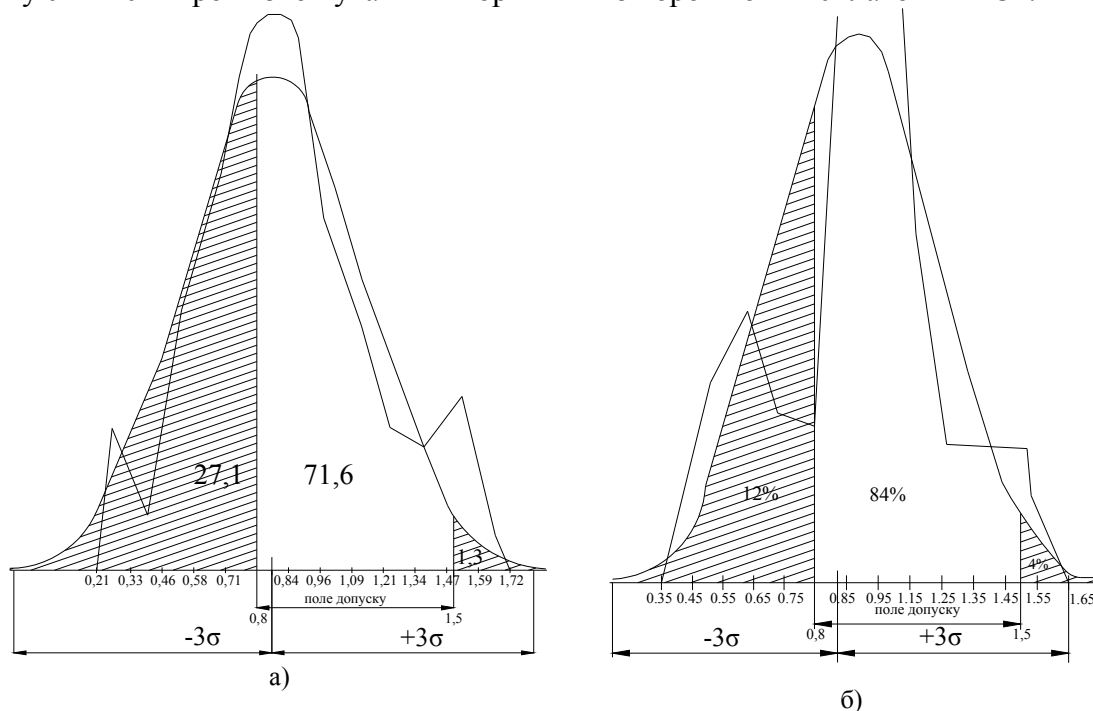


Рисунок 7 – Криві нормального розподілу товщини шару наплавленого металу при одночасному наплавленні: а – без екранування; б – з екрануванням теплових та електромагнітних полів; ПД – поле допуску

Проводили також дослідження товщини шару наплавленого металу сплавом ПГ-С1. На рис. 7 показано криві нормального розподілу товщини шару наплавленого металу. Рівномірність товщини шару наплавленого металу в порівнянні з наплавленням без екранування теплових і електромагнітних полів підвищується на 12,4% (різниця полів допуску 84-71,6) (див. рис. 7 а, б) за рахунок більш рівномірного розподілу температури в зоні наплавлення, яка досягається за допомогою теплового і електромагнітного екранування, що особливо важливо при індукційному наплавленні, оскільки стійкий проти зношування порошкоподібний сплав розплавляється від

поверхні основного металу. Крім того, досягається додаткова економія електроенергії до 32%, тобто затрати електроенергії зменшуються на 0,293 кВт.год. на один виріб за рахунок скорочення часу наплавлення диска з 32 с до 22 с і теплових втрат, тобто зменшення конвективного теплообміну між торцевою і нижньою поверхнею диска з навколишнім середовищем (див. табл. 2).

Приклад розрахунку економії електроенергії за двома нагрівальними системами.

Затрати електроенергії на 1 деталь в нагрівальній системі без екранування теплових та електромагнітних полів.

$$а) 8,0 \cdot 1,1 \cdot \frac{32}{3600} = 0,0782 \text{ кВт год} - \text{затрати електроенергії на початку нагрівання}$$

деталі;

$$б) 9,5 \cdot 6 \cdot \frac{32}{3600} = 0,506 \text{ кВт год} - \text{затрати електроенергії в кінці здійснення}$$

наплавлення.

Різниця складає $0,506 - 0,0782 = 0,428$ кВт год – затрати електроенергії на 1 деталь для здійснення процесу наплавлення за 32с.

де 8,0 - напруга генератора (в кВ)

1,1 – струм анодної лампи генератора (в А)

див. в табл.2.

Потужність в початковий момент часу складає

$$P = 8 \cdot 1,1 = 8,8 \text{ кВт}$$

час нагрівання $t = 32$ с

$$1 \text{ год} = 3600 \text{ с}$$

2. Затрати електроенергії на 1 деталь в нігрівальній системі з екрануванням теплових та електромагнітних полів.

Обчислення виконуємо аналогічно, як для першого випадку.

$$а) 8,3 \cdot 1,1 \cdot \frac{22}{3600} = 0,056 \text{ кВт год.};$$

$$б) 10,1 \cdot 3,1 \cdot \frac{22}{3600} = 0,191 \text{ кВт год.}$$

$$\text{Різниця } 0,191 - 0,056 = 0,135 \text{ кВт год}$$

$$\text{тоді } 0,428 - 100\%$$

$$0,135 - x.$$

Економія електроенергії складає:

$$x = \frac{0,135 \cdot 100}{0,428} = 31,54 \approx 32\% - \text{економія електроенергії, яка отримана}$$

нагрівальною системою ІТЕЕ в порівнянні з нагрівальною системою без екранування теплових та електромагнітних полів, тобто затрати електроенергії зменшуються на один виріб $0,428 - 0,135 = 0,293$ кВт год.

Висновки

Результати досліджень наплавленого металу порошкоподібним твердим сплавом ПГ–С1 на основний метал сталь Ст.3 за допомогою нагрівальної системи (ІТЕЕ) показують, що мікроструктура, твердість і зносостійкість перебувають на тому ж рівні, що і при напавленні нагрівальною системою без екранування теплових і електромагнітних полів. При цьому стабільність товщини шару наплавленого металу підвищується на 12,4%, досягається економія електроенергії до 32%, скорочується час наплавлення з 32 до 22с, а також усувається перегрівання торця диска і наплавленого металу за рахунок керованого тепловиділення в зоні наплавлення, пов'язаного із зменшенням теплових втрат в оточуюче середовище в порівнянні з нагрівальною системою без комбінованого екранування теплових та електромагнітних полів.

Література

1. Боль А.А., Лесков С.П. Индукционная наплавка деталей в сельскохозяйственном машиностроении // Наплавка. Опыт и эффективность применения. - К.: ИЭС им. Е.О.Патона, 1985.- С.72-75.
2. Вишневецкий А.А., Костылев Ю.М., Остров Д.Д. Технология изготовления наплавленных дисковых ножей. Наплавка деталей металлургического и горного оборудования // Реферат. Сборник НИИИНФОРМТЯЖМАШ 10-78-16. - М., 1978. - С. 15-18.
3. Стрельбицкий В.Ф. Дисковые почвообрабатывающие машины. - М.: Машиностроение, 1978. - 136 с.
4. Лозовский В.П., Остапенко А.Т., Прокопенко В.А. Исследование работоспособности и критериев предельного состояния дисков лушильников // Тракторы и сельхозмашины, 1983. № 6.- С.15-16.
5. Ткачев В.Н. Износ и повышение долговечности деталей сельскохозяйственных машин. - М.: Машиностроение, 1971.- 264 с.
6. Lehman H., Herrmann J. Auftragsschweissen von Packerscheiben // ZIS Mitt.- 1979- 21, № 8.- S.826 - 840.
7. Blume Fritz, Kretschmann Georg, Rosert Reinhard. Dunnschichtauf-tagsschweiben Mohichkeiten und Anwendung // Schweisstechnik. - 1982. - 32, № 11. - S. 501-503, 482.
8. Николаенко М.Р., Рыморов Е.В. Новые технологические процессы электродуговой и электроконтактной наплавки быстроизнашивающихся деталей строительных и дорожных машин. - М.: ЦНИИТЭстроймаш, 1976. - 157 с.
9. Плакирование стали взрывом / А.С. Гельман, Б.Д. Цемахович, А.Д. Чудновский и др. - М.: Машиностроение, 1978. - 191 с.
10. Рябцев И.А., Розенфельд Х.Х., Чин А.И. Технология производства плакированных лемехов культиваторов-плоскорезов // Конструирование и технология производства сельскохозяйственных машин: Сб.науч.тр., вып. 14.- Киев: Техника, 1984.- С.24-28.
11. Рябцев И.А. Наплавка деталей машин и механизмов. - Киев: Изд-во “Экотехнология”, 2004. - 160 с.
12. Шаблій О.Н., Пулька Ч.В., Будзан Б.П. Оптимизация энергозатрат при индукционной наплавке тонкостенных дисков // Автомат. сварка. - 1987. - № 1. - С. 36-39.
13. Шаблій О.Н., Пулька Ч.В., Будзан Б.П. Пути экономии электроэнергии при индукционной наплавке тонкостенных дисков // Автомат. сварка. - 1988. - № 12. - С. 56-58
14. О.Шаблій, Ч.Пулька. Математична модель оптимізації конструктивних параметрів нагрівальної системи з урахуванням комбінованого екранування теплових та електромагнітних полів // Вісник Тернопільського державного технічного університету імені Івана Пулюя.- 2007.- №2.- С.66-76
15. Пристрій для регулювання потужності в зоні наплавлення. Деклараційний патент UA. №58943A, B23K13/00/Шаблій О. М., Пулька Ч.В., Михайлишин М.С. та ін. - №2002119491; Заявл. 28.11.2002; Опубл. 17.11.2003, Бюл. № 11.
16. Пристрій для регулювання потужності в зоні наплавлення. Деклараційний патент UA. 68940A, B23K 13/00 / Шаблій О.М., Пулька Ч.В., Письменний О.С. - № 2003 1110476; Заявл. 20.11.2003; Опубл. 16.08.2004. Бюл. № 8.
17. Индукционная наплавка твёрдых сплавов / В.Н.Ткачев, Б.М.Фиштейн, Н.В.Казинцев, Д.А.Алдырев. - М.: Машиностроение, 1970. - 182 с.
18. Юзвенко Ю.А., Гавриш В.А., Марьенко В.А. Лабораторные установки для оценки износостойкости наплавленного металла // Теоретические и технологические основы наплавки. Свойства и испытания наплавленного металла. - Киев: ИЭС им. Е.О.Патона. - 1979. - С. 23-27.
19. Пулька Ч.В. Программирование режима нагрева при индукционной наплавке тонких стальных дисков // Автомат. сварка. - 1998. - № 1. - С. 48-50.

Одержано 09.01.2009 р.