

## ВПЛИВ ГОРИЗОНТАЛЬНОЇ МЕХАНІЧНОЇ ВІБРАЦІЇ НА ЕКСПЛУАТАЦІЙНІ ВЛАСТИВОСТІ НАПЛАВЛЕНОГО МЕТАЛУ

**Ч.В. Пулька, М.І. Підгурський, В.С. Сенчишин, М.В. Шарик, В.Я. Гаврилюк**

Тернопільський національний технічний університет ім. І. Пулюя МОН України.

46001, м. Тернопіль, вул. Руська, 56, E-mail: Viktor\_Synchyshyn@i.ua

Проведено дослідження зносостійкості та стабільності товщини шару металу, наплавленого індукційним методом. Показано, що при наплавленні порошкоподібним твердим сплавом ПГ-С1 нагрівальною системою ІТЕЕ (індуктор, тепловий і електромагнітний екрани) з прикладанням горизонтальної вібрації і енергоощадного режиму наплавлення, зносостійкість підвищується в 1,4 рази, стабільність товщини шару наплавленого металу на 10 % та покращується якість наплавленого металу (з крупнозернистої структури в дрібнозернисту) в порівнянні з технологією без горизонтальної вібрації. Бібліогр. 14, табл. 3, рис. 5.

*Ключові слова: індукційне наплавлення, тонкі сталеві диски, горизонтальна механічна вібрація, мікроструктура, зносостійкість, тепловий та електромагнітний екрани, енергоощадний режим*

Одним із актуальних напрямків в області науки і техніки є модифікація поверхні конструкційних та інструментальних сталей з метою підвищення експлуатаційних характеристик деталей машин і механізмів, які працюють в умовах підвищеного спрацювання та агресивних середовищах. Сьогодні на підприємствах машинобудівної та металооброблювальної промисловості широко застосовуються різні методи модифікації поверхні, такі як нанесення зносостійких покриттів фізичними і хімічними методами, різні види хіміко-термічного оброблення.

Серед фізичних методів формування функціональних покриттів спосіб індукційного наплавлення є найбільш ефективним для нанесення шару багатокомпонентних матеріалів. В даний час одним із найбільш перспективних шляхів підвищення ефективності зносостійких покриттів є введення додаткових технологічних операцій в традиційний спосіб індукційного наплавлення, таких як екранування теплових і електромагнітних полів, режими наплавлення з економією електроенергії, піддавання виробу в процесі наплавлення горизонтальній та вертикальній механічній вібрації і т.д., які дозволяють значно підвищити експлуатаційні властивості наплавленого шару металу.

Індукційне наплавлення – це процес, який використовується для відновлення спрацьованих, або зміцнення робочих поверхонь при виготовленні нових деталей [1, 2]. Даний процес наплавлення набув широкого застосування у сільськогосподарському машинобудуванні [3]. Важливою умовою для забезпечення якісного процесу наплавлення є правильно підібрані параметри режи-

му наплавлення, що в подальшому впливають на якість наплавленого шару металу, а отже і на довговічність експлуатації наплавленої деталі.

При індукційному наплавленні використовуються теплові та електромагнітні екрани, для ізоляції тих поверхонь деталей, які підлягають небажаному нагріванню. Застосуванням теплових і електромагнітних екранів при індукційному нагріванні присвячено ряд робіт [4–6]. Екрани використовуються в різних технологічних процесах для загартування деталей, наплавлення і т. д. Зазвичай вони використовуються роздільно (тобто тільки електромагнітний або тепловий екран). При цьому дуже складно регулювати температуру в зоні наплавлення для отримання якісного шару наплавленого металу.

Для покращення властивостей наплавленого металу авторами розроблена нова технологія наплавлення із застосуванням нагрівальної системи ІТЕЕ (індуктор, тепловий та електромагнітний екрани) [7, 8], тобто комбіноване одночасне екранування теплових і електромагнітних полів, що дозволяє досягати більш стабільної товщини шару наплавленого металу за рахунок рівномірної температури в зоні наплавлення, оскільки порошкоподібний твердий сплав розплавляється від поверхні основного металу за рахунок теплопередачі, зі змінною питомою потужністю в часі при наплавленні (енергоощадний режим нагрівання) [9].

Представляє інтерес дослідження властивостей наплавленого шару металу у випадку, коли в систему ІТЕЕ і при використанні енергоощадного режиму наплавлення ввести додаткову технологічну операцію, як, наприклад, горизонтальну

механічну вібрацію деталі, яка підлягає наплавленню, в момент початку плавлення порошкоподібного твердого сплаву до повного його розплавлення і охолодження [10, 11], що дозволить значно покращити експлуатаційні характеристики наплавленого шару металу.

**Методика досліджень.** Вимірювання мікротвердості проводили на мікротвердомірі М-400 фірми «Леко». Мікроструктуру досліджуваних зразків вивчали на мікроскопі НЕОФОТ-32 (Німеччина). Травлення зразків, наплавлених зносостійким сплавом ПГ-С1, проводили електrolітичним способом в 20 %-му водному розчині хромового ангідриду напругою  $U = 20$  В, час витримки  $\tau = 5$  с.

Аналіз елементного складу наплавлених зразків проводили на мікроаналізаторі SX-50 (Камебак) фірми «Камека». Випробування зносостійкості наплавленого металу проводили на машині НК-М [12].

Результати досліджень виражали у вигляді відносної зносостійкості, 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 із застосуванням механічної горизонтальної вібрації за енергоощадним режимом нагрівання, регулювання яким здійснювалось за допомогою пристрою [13].

Дослідження процесу індукційного наплавлення тонких дисків проводили за допомогою на-

грівальної системи (ІТЕЕ) (рис. 1) [14], 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 напавленні порошкоподібний твердий сплав розплавляється від поверхні основного металу.

Дослідження наплавленого металу, отриманого за допомогою нагрівальної системи ІТЕЕ із використанням горизонтальної вібрації, проводили на мікроструктуру, товщину шару наплавленого металу і зносостійкість з метою забезпечення наплавленого валика шириною 10...50 мм і товщиною відповідно 0,8...1,5 мм.

Отримані результати порівнювали з результатами, отриманими нагрівальною системою без використання горизонтальної вібрації.

При цьому використовували диски, які виготовлені зі сталі Ст3 товщиною 3 мм і порошко-

Таблиця 1. Хімічний склад (мас. %) порошкоподібного твердого сплаву ПГ-С1

Наплавлюваний матеріал	C	Cr	Si	Ni	Mn	B	Cu	W	Fe	Твердість наплавлюваного металу HRC
Порошок										
ПГ-С1 сормайт №1 (У30Х28Н4С4)	2,5...3,3	27...31	2,8...4,2	3,0...5,0	0,4...1,5	-	-	-	Основа	51

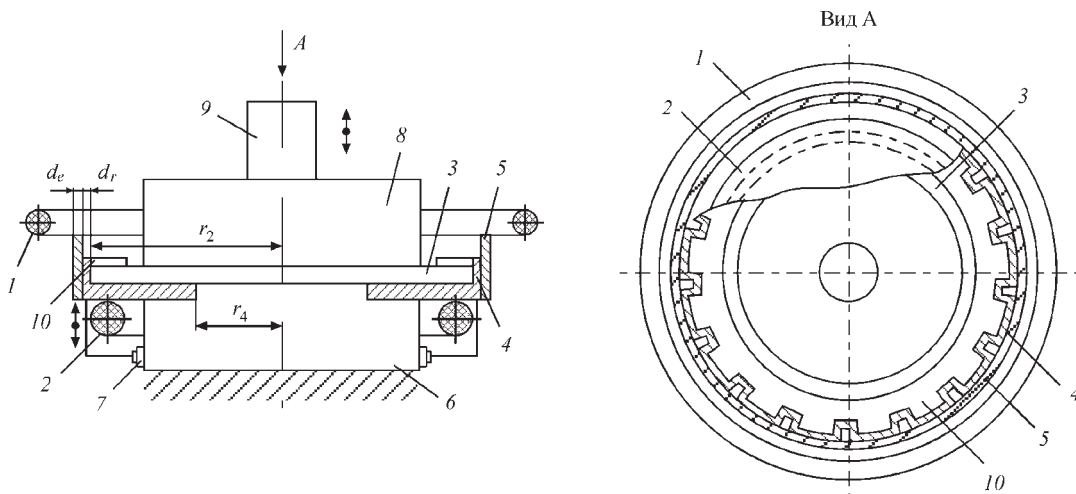


Рис. 1. Пристрій для регулювання потужності в зоні наплавлення з жорстко з'єднаними між собою тепловим і електромагнітним екранами (опис 1–10 див. у тексті)

подібний твердий сплав ПГ-С1, хімічний склад якого приведений в табл. 1.

В табл. 2 представлені нагрівальні системи і параметри нагрівання при енергоощадному режимі наплавлення [9].

Процес індукційного наплавлення здійснюється одночасно по всій робочій поверхні від генератора типу ВЧИ-63/0,44 без обертання деталі. Технічні характеристики генератора з застосуванням горизонтальної вібрації такі ж самі, як і без вібрації, у початковий момент часу складали: напруга на контурі 2,2 кВ; напруга на аноді лампи 8,3 кВ; струм сітки лампи 3,6 А; струм анода лампи 1,1 А; час наплавлення всієї робочої поверхні диска складав 22 с. Процес здійснювали без перемикавання генератора, тобто питома потужність на індукторі змінювалась за енергоощадним режимом, який має вигляд [9] і визначається за формулою

$$W_{\text{до}} = \frac{\lambda_g m^2}{s k (a m^2 \tau)} T_{\text{до}} e^{a m^2 \tau}$$

де  $T_{\text{до}}$  — температура, при якій здійснюється якісне наплавлення, яка досягається за час  $\tau$ ;  $\lambda_g = ca\gamma$ , Вт/(м·°С);  $c$  — питома теплоємність,  $a$  — температуропровідність, м<sup>2</sup>/с;  $\gamma$  — густина, кг/м<sup>3</sup>;  $m^2 = Bi/2h^2$ ;  $Bi = 2ha/\lambda$  — критерій Біо;  $\lambda$  — коефіцієнт теплопровідності матеріалу диска, Вт/(м·°С);  $\alpha$  — коефіцієнт тепловіддачі, Вт/(м<sup>2</sup>·°С);  $t$  — плинний час;  $\tau$  — час наплавлення.

Кінцеві параметри режиму наплавлення склали відповідно 7,0, 10,0, 0,95, 3,1. Питома потужність без вібрації і з вібрацією відповідно в початковий момент складала  $W_1 = 0,12 \cdot 10^9$  Вт/м<sup>3</sup> і в кінці наплавлення  $W_2 = 0,43 \cdot 10^9$  Вт/м<sup>3</sup> (див. табл. 2).

Розглянемо металографічні дослідження шару наплавлюваного металу, одержаного за допомогою нагрівальної системи (ІТЕЕ) із використанням горизонтальної вібрації і без вібрації.

Дослідження проводились для двох випадків індукційного наплавлення із застосуванням та без застосування механічної вібрації. Для дослідження структури і зносостійкості наплавленого металу із наплавлених заготовок вирізали зразки. Травлення зразків для проведення металографічних досліджень проводили поетапно, електролітичним способом у 20%-му розчині хромової кислоти (напруга 20 В і час витримки 10 с), визначали структуру наплавленого металу — хімічним травленням в 4%-му розчині азотної кислоти.

Мікроструктура основного металу являє собою ферит і перліт, а мікроструктура наплавленого металу досліджуваних зразків складається з первинних карбідів (комплексні карбіди типу (Fe, Cr)<sub>7</sub>C<sub>3</sub> і (Fe, Cr)<sub>3</sub>C) у вигляді великих пластин віялоподібної форми, які мають гексагональну ґратку із чіткою межею з'єднання з матрицею карбідної евтектики та матричної аустенітної структури.

Надлишкові карбіди, як правило, розташовуються у вигляді окремих пластинчастих виділень в центральній частині по ширині і товщині наплавленого валика. Прямокутні і шестигранні виділення — це карбіди різної дисперсності, частина з них — надлишкові пластинчасті карбіди, які достатньо рівномірно розподілені в матриці. Мікротвердість карбідів змінювалась в межах HV 0,5 – 11710...12830 МПа.

Спільним для двох варіантів наплавленого металу є:

наявність в наплавленому шарі доевтектичної зони, яка прилягає до лінії з'єднання і характеризується формуванням дендритів твердого розчину (легованого аустеніту) з осями першого і другого порядку, а також карбідної евтектики, що кристалізується в міждендритному просторі. Мікротвердість аустеніту для зразка без застосування горизонтальної вібрації становила HV 0,5 –

Таблиця 2. Нагрівальні системи і режими наплавлення

Нагрівальні системи	Режими наплавлення					Тип генератора	Характер зміни питомої потужності на індукторі $W \cdot 10^{-9}$ , Вт/м <sup>3</sup>
	Напруга на контурі, кВ	Анодна напруга, кВ	Струм сітки лампи, А	Струм анода лампи, А	Час наплавлення, с		
Без використання та з використанням горизонтальної вібрації	Змінні					ВЧИ-63/0,44	
	вхідні чисельник (τ = 0 с)			вихідні знаменник (τ = 22 с)			
	2,2 7,0	8,3 10,0	3,6 0,95	1,1 3,1	22		

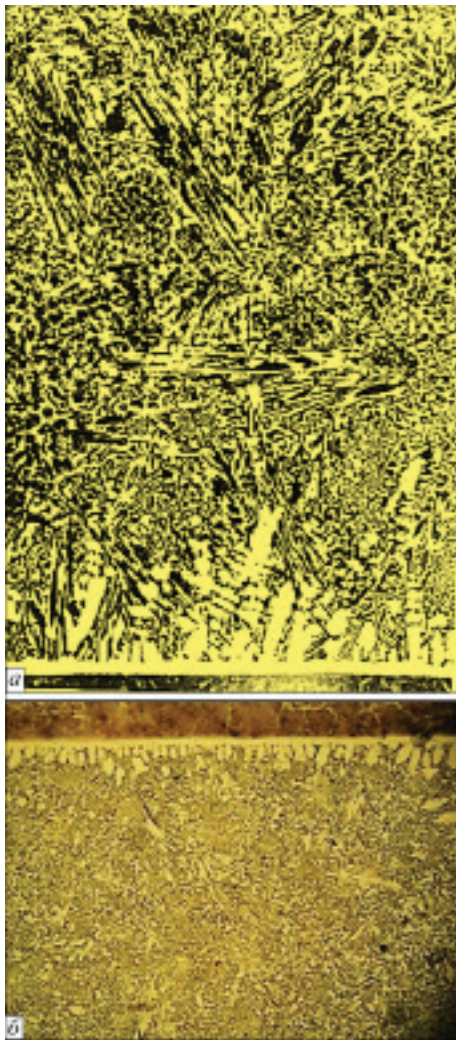


Рис. 2. Мікроструктура (×200) наплавленого металу зразків: *a* — без вібрації; *б* — із застосуванням горизонтальної вібрації

4550...5140 МПа та  $HV_{0,5} = 5150...5900$  МПа для зразка із горизонтальною вібрацією. Крім того, виявлена структурна неоднорідність вздовж лінії з'єднання з боку сормаїту ПГ-С1, яка полягає в тому, що доевтектична дендритна зона розподілена нерівномірно;

утворення граничної білої смужки твердого розчину (легованого аустеніту) між наплавленим і основним металом змінної ширини 10...20 мкм для зразка без вібрації з мікротвердістю  $HV_{0,5} = 3030...3410$  МПа, а для зразка із застосуванням вібрації  $HV_{0,5} = 4500$  МПа;

з боку основного металу біля лінії сплавлення виникає дифузійна зона, що являє собою тонкопластинчатий перліт і ферит по межах зерен, іноді з відманштетовою орієнтацією з мікротвердістю

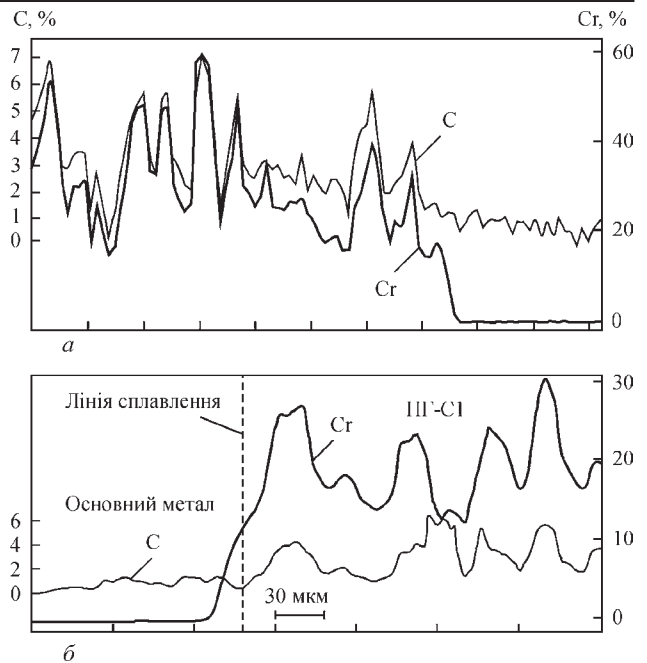


Рис. 3. Розподіл вуглецю і хрому по товщині наплавленого металу: *a* — без вібрації; *б* — із застосуванням вібрації

$HV_{0,5} = 2440$  МПа, що виникла внаслідок дифузії вуглецю з сормаїтом в основний метал.

Мікроструктура наплавленого металу представлена на рис. 2.

Характеристики мікротвердості структурних складових приведені в табл. 3.

Необхідно відзначити відмінності у структурі двох варіантів наплавленого металу. Горизонтальна вібрація приводить до помітного подрібнення карбідної складової (рис. 2, б). Карбіди, що мають вид шестигранників з середньою довжиною сторони 10...12 мкм, без вібрації (див. рис. 2, а) подрібнюються до 3,5...5,0 мкм при застосуванні горизонтальної вібрації (рис. 2, б).

Максимальна глибина евтектичної зони в зразку без застосування горизонтальної вібрації (див. рис. 2, а), а мінімальна — у зразку із горизонтальною вібрацією (рис. 2, б) і вона займає найменший відсоток аустенітних дендритів по довжині наплавлення в порівнянні з першим випадком. При горизонтальній вібрації лінія з'єднання з боку сормаїту в основному являє собою білу смужку з утворенням майже рівноосних зерен аустеніту (див. рис. 2, б).

З метою визначення складу структурних складових (хрому, вуглецю) і встановлення впливу їх на властивості наплавленого металу, був проведе-

Таблиця 3. Характеристики мікротвердості структурних складових

Технологічна операція	Мікротвердість структурних складових, МПа		
	Карбіди хрому	Матриця	Біла смужка (перехідна зона)
Без вібрації	11710...12830	4550...5140	3030...3410
З вібрацією	14300...15440	5150...5900	4500

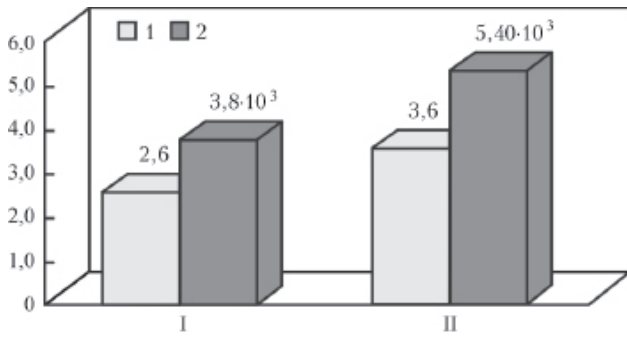


Рис. 4. Відносна зносостійкість і твердість наплавленого металу: I — без вібрації; II — із застосуванням вібрації; 1 — відносна зносостійкість; 2 — твердість наплавленого металу, МПа

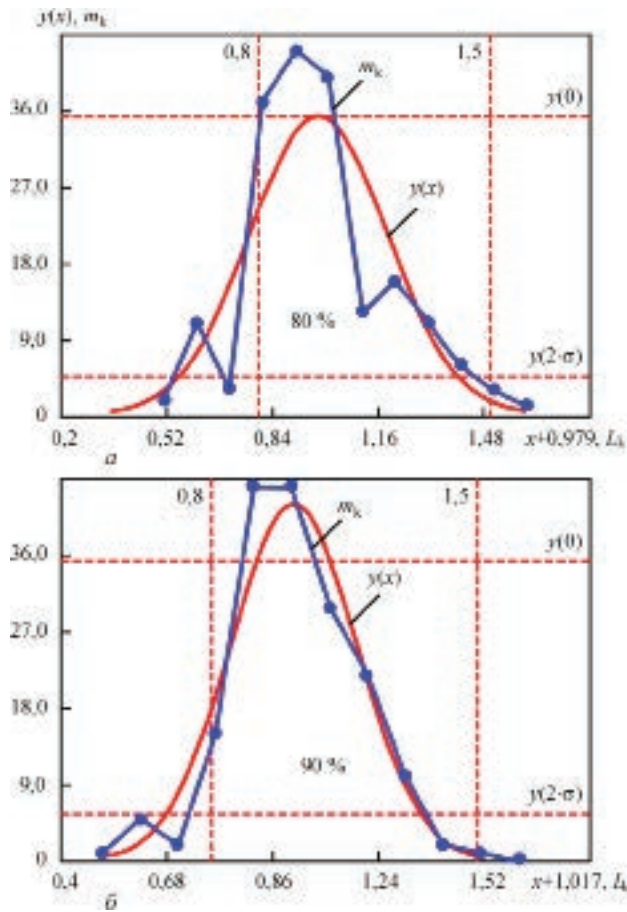


Рис. 5. Криві нормального розподілу товщини шару наплавленого металу ( $h$ , мм) при одночасному наплавленні з використанням енергоощадного режиму ( $n$  — кількість точок у заданому інтервалі при вимірюванні товщини):  $a$  — без вібрації;  $b$  — із застосуванням горизонтальної вібрації

ний мікрорентгеноспектральний аналіз наплавленого металу (рис. 3).

У всіх випадках аналіз проводили приблизно в центрі наплавленого шару металу перпендикулярно лінії сплавлення на глибині до 350 мкм від межі сплавлення.

Встановлено, що в металі досліджуваних зразків вуглець зв'язаний в карбіди типу  $(Fe, Cr)_7C_3$  і  $(Fe, Cr)_3C$ , помітного дифузійного перерозподілу вуглецю біля лінії сплавлення не спостерігалось.

На рис. 4 представлені діаграми відносної зносостійкості і твердості наплавлених зразків (середні за трьома випробуваннями).

Як видно із рис. 4, для випадку, коли виконується наплавлення без вібрації, зносостійкість становить 2,6 і твердість 3800 МПа, а у випадку застосування горизонтальної вібрації, зносостійкість — 3,6 і твердість 5400 МПа відповідно. Це досягається за рахунок більш сприятливого розподілу легуючих елементів в наплавленому шарі металу.

На рис. 5 показані криві нормального розподілу товщини шару наплавленого металу. Рівномірність товщини шару наплавленого металу в порівнянні з наплавленням без використання горизонтальної вібрації підвищується на 10 % (див. рис. 5), що забезпечує рівномірний розподіл рідкого металу в зоні наплавлення.

### Висновки

Дослідження індукційного наплавлення деталей показали, що при застосуванні горизонтальної вібрації, комбінованого екранування теплових та електромагнітних полів та енергоощадного режиму наплавлення, зносостійкість підвищується в 1,4 рази, стабільність товщини шару наплавленого металу відповідно на 10 % та покращується якість наплавленого металу в порівнянні з технологією без прикладання горизонтальної вібрації.

### Список літератури

1. Рябцев И.А. (2004) *Наплавка деталей машин и механизмов*. Киев, Экотехнология.
2. Ткачев В.Н. (1971) *Износ и повышение долговечности деталей сельскохозяйственных машин*. Москва, Машиностроение.
3. Пулька Ч.В. (2006) *Технологічна та енергетична ефективність індукційного наплавлення тонких сталевих дисків*: дис. ... доктора техн. наук, Київ.
4. Лозинский М.Г. (1958) *Промышленное применение индукционного нагрева*. Москва, Изд-во АН СССР.
5. Бабат Г.И. (1965) *Индукционный нагрев металлов и его промышленное применение*. Москва, Энергия.
6. Слухоцкий А.Е., Рыскин С.Е. (1974) *Индукторы для индукционного нагрева*. Ленинград, Энергия.
7. Brezinová J., Guzanová A., Draganovská D. et al. (2016) Study of selected properties of thermally sprayed coatings containing WC and WB hard particles. *Acta Mech. Autom.*, **10**, 296-299, doi:10.1515/ama-2016-0046.
8. Пулька Ч.В., Гаврилюк В.Я., Сенчишин В.С. (2013) Совершенствование оборудования и технологии индукционной наплавки. *Сварочное производство*, **4**, 27-30.
9. Шаблій О.Н., Пулька Ч.В., Будзан Б.П. (1988) Пути экономии электроэнергии при индукционной наплавке тонкостенных дисков. *Автоматическая сварка*, **12**, 56-58.
10. Пулька Ч.В., Шаблій О.М., Гаврилюк В.Я., Сенчишин В.С., Шарик М.В. (2012) *Спосіб наплавлення сталевих дисків*. Пат. на корисну модель 72129 UA, МПК В23К 13/00. Заявник і власник Терноп. нац. техн. ун-т ім. І. Пулюя.
11. Пулька Ч.В., Шаблій О.М., Гаврилюк В.Я., Сенчишин В.С., Шарик М.В. (2012) *Спосіб наплавлення тонких дисків*. Пат. на корисну модель 73032 UA, МПК В23К 13/00. Заявник і власник Терноп. нац. техн. ун-т ім. І. Пулюя.

12. Юзвенко Ю.А., Гавриш В.А., Марьенко В.А. (1979) Лабораторные установки для оценки износостойкости наплавленного металла. *Теоретические и технологические основы наплавки. Свойства и испытания наплавленного металла*. Киев, ИЭС им. Е.О. Патона, сс. 23–27.
13. Пулька Ч.В. (1998) Программирование режима нагрева при индукционной наплавке тонких стальных дисков. *Автоматическая сварка*, **1**, 48–50.
14. Шаблій О.М., Пулька Ч.В., Письменний О.С. (2004) *Пристрій для регулювання потужності в зоні наплавлення*. Деклараційний пат. UA 68940A, 7B23K 13/00.
7. Brezinova, J., Guzanova, A., Draganovska, D. et al. (2016) Study of selected properties of thermally sprayed coatings containing WC and WB hard particles. *Acta Mech. Autom.*, **10**, 296-299. Doi:10.1515/ama-2016-0046.
8. Pulka, Ch.V., Gavrilyuk, V.Ya., Senchishin, V.S. (2013) Improvement of equipment and technology of induction surfacing. *Svarochn. Proizvodstvo*, **4**, 27-30 [in Russian].
9. Shably, O.N., Pulka, Ch.V., Budzan, B.P. (1988) Ways of energy saving in induction surfacing of thin-wall discs. *Avtomatich. Svarka*, **12**, 56-58 [in Russian].
10. Pulka, Ch.V., Shablii, O.M., Gavrylyuk, V.Ya., Senchyshyn, V.S., Sharyk, M.V. (2012) *Method of surfacing of steel discs*. Pat. on utility 72129 UA, Int. Cl. B23K 13/00. Ternop. NTU [in Ukrainian].
11. Pulka, Ch.V., Shablii, O.M., Gavrylyuk, V.Ya., Senchyshyn, V.S., Sharyk, M.V. (2012) *Method of surfacing of steel discs*. Pat. on utility 73032 UA, Int. Cl. B23K 13/00. Ternop. NTU [in Ukrainian].
12. Yuzvenko, Yu.A., Gavrish, V.A., Marienko, V.A. (1979) Laboratory units for evaluation of wear resistance of deposited metal. Theoretical and technological principles of surfacing. *Properties and tests of deposited metal*. Kiev, PWI, 23-27 [in Russian].
13. Pulka, Ch.V. (1998) Programming of heating mode in induction surfacing of thin steel discs. *Avtomatich. Svarka*, **1**, 48-50 [in Russian].
14. Shablii, O.M., Pulka, Ch.V., Pysmennyi, O.S. (2004) *Device for control of power in surfacing zone*. Declar. Pat. UA 68940A, Int. Cl. 7B23K 13/00 [in Ukrainian].

**References**

**ВЛИЯНИЕ ГОРИЗОНТАЛЬНОЙ МЕХАНИЧЕСКОЙ ВИБРАЦИИ НА ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ СВОЙСТВА НАПЛАВЛЕННОГО МЕТАЛЛА**

Ч.В. Пулька, М.И. Подгурский, В.С. Сенчишин, М.В. Шарик, В.Я. Гаврилюк

Тернопольский национальный технический университет им. И. Пулюя МОН Украины.  
46001, г. Тернополь, ул. Русская, 56. E-mail: Viktor\_Synchshyn@i.ua

Проведено исследование износостойкости и стабильности толщины слоя металла, наплавленного индукционным методом. Показано, что при наплавке порошкообразным твердым сплавом ПГ-С1 нагревательной системой ИТЭЕ (индуктор, тепловой и электромагнитный экраны) с приложением горизонтальной вибрации и энергосберегающего режима наплавки, износостойкость повышается в 1,4 раза, стабильность толщины слоя наплавленного металла на 10 % и улучшается качество наплавленного металла (с крупнозернистой структуры в мелкозернистую) по сравнению с технологией без горизонтальной вибрации. Библиогр. 14, табл. 3, рис. 5.

*Ключевые слова:* индукционная наплавка, тонкие стальные диски, горизонтальная механическая вибрация, микроструктура, износостойкость, тепловой и электромагнитный экраны, энергосберегающий режим

**EFFECT OF HORIZONTAL MECHANICAL VIBRATION ON DEPOSITED METAL SERVICE PROPERTIES**

Ch.V. Pulka, M.I. Pidgurskiy, V.S. Senchishin, M.V. Sharik, V.Ya. Gavrilyuk

Ternopil Ivan Puluj National Technical University of MOS of Ukraine.  
56 Ruska Str., 46001, Ternopil. E-mail: Viktor\_Synchshyn@i.ua

Wear resistance and stability of thickness of the layer of metal deposited by the induction method was studied. It is shown that at surfacing with powderlike hard alloy PG-S1 by ITES heating system (inductor, thermal and electromagnetic shields) with application of horizontal vibration and energy-saving surfacing mode, the wear resistance increases 1.4 times, stability of deposited metal layer thickness – by 10% and deposited metal quality is improved (transformation from coarse- to fine-grained structure), compared to the technology of horizontal vibration. 11 Ref., 3 Tabl., 5 Fig.

*Keywords:* induction surfacing, thin steel discs, horizontal mechanical vibration, microstructure, wear resistance, thermal and electromagnetic shield, energy-saving mode

Надійшла до редакції 19.04.2019