

**В. І. Савуляк<sup>1</sup>**  
**В. Й. Шенфельд<sup>1</sup>**  
**М. С. Дмитрієв<sup>1</sup>**

## **МОДИФІКУВАННЯ РОБОЧИХ ПОВЕРХОНЬ СТАЛЕВИХ ДЕТАЛЕЙ З ФОРМУВАННЯМ ВИСОКОВУГЛЕЦЕВИХ СТРУКТУР**

<sup>1</sup>Вінницький національний технічний університет

*Актуальною задачею є створення на поверхні сталевих деталей шарів, які здатні тривалий час надійно працювати за умов тертя та зношування. Інструментом для підвищення зносостійкості поверхневих шарів сталевих деталей вибрано методи модифікування робочих поверхонь шляхом їх навуглецювання. У цьому випадку твердість металу регулюють зміною концентрації вуглецю у поверхневих шарах, вмістом легуючих елементів за технологіями термічної та хіміко-термічної обробки.*

*В роботі виконано порівняльні дослідження ефективності різних технологій навуглецювання робочих поверхонь сталевих деталей та формування на них властивостей стійкості до зносу, утворення задирок та схоплювання. Порівняльні дослідження запропоновано виконувати за критеріями продуктивності, собівартості та можливості застосування для габаритних деталей.*

*Аналіз виявив існування низки способів, які використовують явище дифузії для формування на поверхнях сталевих деталей зносостійких високовуглецевих покриттів з металевою матрицею та карбідними зміцнювальними включеннями або цементованих шарів з різними структурними складовими, які відомі під назвою «гартівні структури», що відрізняються різною техніко-економічною ефективністю. Певну увагу приділено також способу формування композиційного високовуглецевого покриття у режимі високотемпературного синтезу, що саморозповсюджується (СВС).*

*В результаті виконаних досліджень показано наявність суттєвого недоліку переважної більшості розглянутих методів навуглецювання робочих поверхонь деталей з низько- або середньовуглецевих сортів сталі – висока собівартість через низьку продуктивність та складність реалізації. Ці недоліки стимулюють розробку нових висопродуктивних методів формування на сталевих деталях відповідних покриттів значної глибини та з низькою собівартістю.*

**Ключові слова:** сталь, поверхневий шар, навуглецювання, твердість, зносостійкість, ефективність

### **Вступ**

Машинобудування широко використовує деталі зі сталі та чавуну. Сталі забезпечують високі фізико-механічні властивості, технологічність обробки тиском та різанням, забезпечують добру або задовільну зварюваність, виготовлення деталей як малих, так і великих розмірів для роботи з екстремальними навантаженнями та в агресивних середовищах. Одним з суттєвих недоліків сталевих поверхонь є їх схильність до утворення задирок та схоплювання під час проковзування в спряженнях. З метою протидії цьому явищу робочі поверхні модифікують термічною обробкою або наносять функціональні покриття [1–4]. Для деталей машин, які працюють з високими навантаженнями та потребують забезпечення тривалої довговічності роботи (вали та зубчасті колеса редукторів, кулачкові механізми, гальмуючі пристрої тощо), вибір матеріалу з відповідними властивостями є дуже важливим. Відносно дешевим та доступним для широкого використання матеріалом, що здатен працювати без втрати своїх механічних властивостей в умовах тертя та зношування, є сталі, що цементуються [5]. Твердість металу регулюють зміною концентрації в поверхневих шарах вуглецю, вмістом легуючих елементів та технологіями термічної та хіміко-термічної обробки. Завдяки вказаним вище технологіям та вмісту легуючих компонентів сталь може бути зносостійкою, корозійостійкою, жаростійкою або набувати особливих пружних і магнітних властивостей [1].

Метою даної роботи є порівняльні дослідження ефективності різних технологій навуглецювання робочих поверхонь сталевих деталей та формування на них властивостей стійкості до зношеності, утворення задирок та схоплювання.

Узагальнений підхід, який застосовується для досягнення поставленої мети, полягає у забезпеченні низки вимог до поверхонь пари тертя. Пріоритетною з них є вимога щодо уникнення на мікрорівні когерентності кристалічних ґраток на поверхнях пари тертя в місцях фактичного контакту. В арсеналі проєктанта є можливість призначити один з низки варіантів технологічних процесів, які відрізняються технічною та економічною ефективністю, що і буде розглянуто нижче.

Для конкретних деталей машин, які працюють у певних умовах та мають свій спектр статичних і динамічних навантажень, повинні бути використані відповідні матеріали, які можуть забезпечити тривалу міцність, жорсткість та протидіяти зношуванню. Разом з тим у переважній більшості деталей окремі поверхні піддаються різним навантаженням та зношуються за різними механізмами. Наприклад, шийки валів з напресованими підшипниками потерпають від фретингу [6], а зубчасті та шліцові поверхні зношуються переважно механічно за участі абразивів [7, 8]. Очевидно, що навіть для цього прикладу на поверхнях шийок та зубців бажано мати різні фізико-механічні властивості.

Частково це питання зазвичай розв'язується шляхом застосування термічної, хіміко-термічної та інших видів обробок або покриттів. Вибір методів зміцнення обмежується технічними та економічними вимогами.

### Аналіз сучасних методів модифікування робочих поверхонь деталей

Проблеми, які виникають під час експлуатації машин, змусили вивчати питання зношування поверхонь та процесів, що їх супроводжують, розробляти заходи для підвищення довговічності деталей [4,5,6]. Японські вчені Г. Йошімото, Т. Тсукізої [9] та український Б. І. Костецький [10] доводять, що доцільно використати до проблем зношування сталей такий підхід: 1) механічне зношування – у якому відбувається когезійний відрив частинок поверхневого шару, він відбувається за умови, коли в місцях контакту відсутні плівки; 2) зношування плівок  $Fe_2O_3$ , яке відбувається при низькій швидкості ковзання та малих навантаженнях; 3) зношування плівок  $Fe_3O_4$  – відбувається при великих навантаженнях та відносно високих швидкостях.

Після численних досліджень та аналізу структур виявлено, що для протидії зношуванню, необхідно створити спеціальну структуру поверхневих шарів з відповідною твердістю [11, 12, 13]. Велику роль при зношуванні відіграє характер руйнування та вид зміцнення поверхневих шарів.

Вагомий внесок у покращення зносостійких властивостей поверхневих шарів та покращення показників довговічності, внесли В. С. Попов, А. Н. Розенбаум, М. М. Тененбаум, І. Е. Ульман, І. А. Ніловський та інші [1, 7, 8, 9]. З розвитком науки та техніки все ефективнішими та перспективнішими стають технології, що допомагають створити на поверхні низьковуглецевих сталей, які добре зварюються і мають хорошу пластичність, високовуглецеві леговані шари. Деталі з такими модифікованими поверхнями можуть забезпечити хорошу зносостійкість та довготривалу роботу навіть в агресивних середовищах при менших затратах на виготовлення. Насичення поверхні вуглецем з одночасним легуванням дозволяє реалізувати метод композиційного зміцнення. Такий процес можна здійснити кількома відомими методами: хіміко-термічною обробкою (ХТО), модифікуванням поверхні та поверхневим легуванням [3].

Хіміко-термічна обробка – це технологічний процес, під час якого відбувається дифузійне насичення поверхневого шару деталі легуючими елементами. Реалізується ХТО в три стадії. На першій стадії відбуваються хімічні реакції в первинному середовищі, в результаті яких утворюються активні елементи, які можуть дифундувати у метал. На другій стадії відбувається засвоєння утворених елементів поверхнею, вони адсорбуються на ній, виникає градієнт концентрації. На третій стадії – дифузійно-активні елементи починають проникати в глибину металу та відбувається фазова перекристалізація [11, 12, 13].

Одним із видів ХТО є цементация сталі, тобто насичення поверхні деталі вуглецем. Зазвичай після цементации проводять гартування та низький відпуск деталі. Після вказаних вище операцій кількість вуглецю в поверхневому шарі становить 0,8–1 %, при цьому структура має будову низьковідпущеного мартенситу з карбідами (рис. 1). Поверхневий шар з такою структурою має хороші зносостійкі властивості [3].

Найбільше застосування знайшла газова цементация, яку проводять в закритому середовищі, де контролюється вміст та концентрація газів [12, 13, 14].

В загальному ХТО має низку недоліків, які погіршують техніко-економічні показники процесів:

- мала глибина модифікованої поверхні деталі 0,5...2,5 мм при температурі процесу 1000 °С (близько 0,1 мм/год при температурі 900 °С);
- тривалість процесу, що становить від 6 до 25 годин;
- нерентабельність та економічна недоцільність обробки великогабаритних деталей внаслідок великих витрат на нагрівання та необхідність обладнання з великим робочим об'ємом;
- висока енергоємність процесу через його тривалість та високу температуру;
- високий термічний вплив (до 1000 °С) на всю деталь, що викликає значне жолоблення поверхонь.

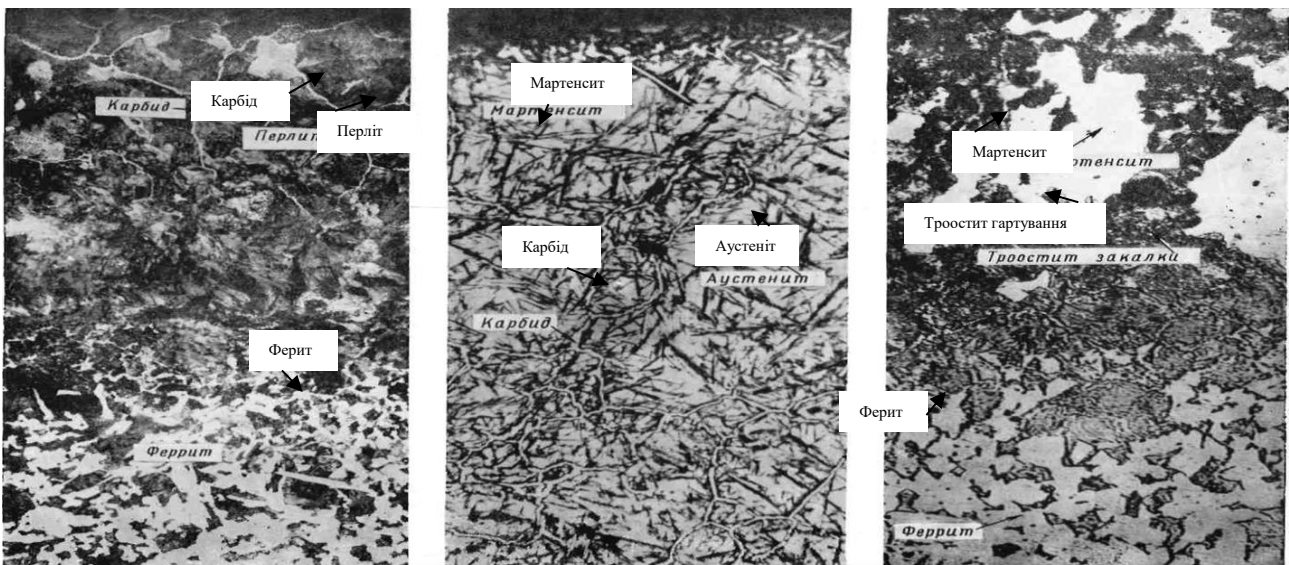


Рис. 1. Мікроструктури цементованої сталі

Підвищити техніко-економічні показники процесів поверхневого зміцнення деталей зі сталі можливо застосуванням нових методів модифікування із застосуванням енергії плазми.

У роботі [15] розглядається метод науглецьовування вугільним електродом поверхневого шару. Цей метод відрізняється тим, що модифікування поверхні відбувається на структурному рівні за допомогою іскрового розряду між графітовим електродом та деталлю. При цьому відбувається перенос вуглецю з електрода до поверхні деталі, насичуючи її і створюючи шар цементиту, який має твердість на порядок вищу за твердість основного металу.

Для забезпечення процесу перенесення вуглецю на деталь використовують обладнання, яке забезпечує періодичний контакт графітового електрода з деталлю (вібратори). Під час дії електричного розряду на поверхню деталі імпульс струму досягає до  $10^5$ – $10^6$  А/мм<sup>2</sup>, а температура при цьому досягає 11 тисяч градусів. Навуглецьовування поверхні деталі відбувається у момент контакту графітового електрода з деталлю. Встановлена швидкість науглецьовування становить  $2,5 \cdot 10^{-3}$  м/с. Твердість поверхні до глибини 0,1 мм підвищується до 60–62 HRC, та містить 4,0...4,5 % С. Недоліками цього методу модифікування поверхні, які ускладнюють впровадження у виробництво, є:

- 1) великі затрати на обладнання та складність в його догляді та експлуатації;
- 2) мала товщина шару, що науглецьовується, досягає всього часток міліметра;
- 3) наступне якісне наплавлювання поверхні стає проблематичним.

У роботі [16] проводилось дослідження по підвищенню зносостійкості поверхневого шару деталей шляхом карбохромування. Карбохромування відноситься до одних із методів ХТО, при цьому можливе одночасне насичення деталі хромом та вуглецем. Проводився складний технологічний процес, який містив у собі багато етапів (відпал, карбохромування, нормалізація, гартування, низькотемпературний відпуск). На зразки зі сталі 25 наносилась спеціальна порошкова суміш, що мала такий склад:

- 1 – 95 % деревного вугілля та 5 % соди;
- 2 – 70 % деревного вугілля, 25 % хрому та 5 % соди;
- 3 – 50 % деревного вугілля, 45 % хрому та 5 % соди.

Проводиться процес у печі при температурі 950 °С упродовж 5 годин. Самі зразки розташовують у жароміцному тиглі, який запаюють плавким затвором. Після проведення технологічного процесу модифікування поверхні отримують структуру без залишкових напружень, що містить в основі мартенсит та карбіди (рис. 2) [16].

Метод ХТО показує кращі результати у порівнянні з цементацією тим, що спостерігається вища мікротвердість у 1,2 рази та зносостійкість у 2 рази [1, 16]. Але є і низка недоліків цього процесу:

- 1) велика кількість етапів у технологічному процесі, що збільшує час та собівартість модифікування поверхні;
- 2) діє великий термічний вплив (до 1000 °С) на всю деталь, що може спричинити виникнення дефектів;
- 3) тривалість у часі (понад 5 годин на деталь), що обмежує продуктивність.

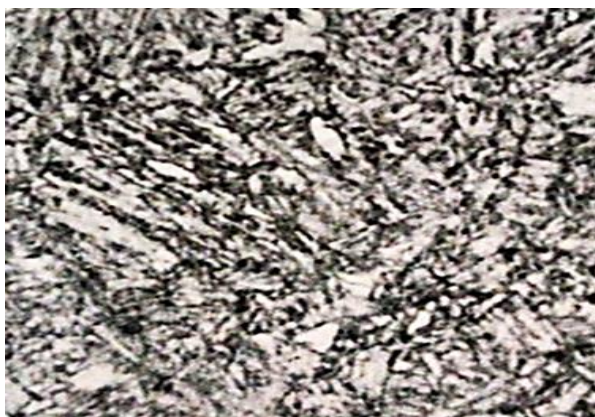


Рис. 2. Модифікована поверхня методом карбохромування

В роботах [17–20] запропоновано катодне дифузійне насичення, що є одним з варіантів електрохіміко-термічної обробки металів і сплавів, який здійснюється у водних електролітах. Перспективним напрямком збільшення ресурсу оснащення та створення нових технологічних процесів для отримання зміцнювальних і захисних покриттів, є електрохіміко-термічне зміцнення, зокрема, швидкісна катодна цементація з подальшим гартуванням в електроліті. Поверхнєве збагачення низьковуглецевих сталей вуглецем, в режимі електролітного нагрівання, дозволяє підвищити мікротвердість, зносостійкість і міцність з формування стійких покриттів шляхом легування і модифікування. Як вуглецевомісткі сполуки застосовуються: карбонат натрію, гліцерин, ацетон та ін.

Недоліком використання методу з багатьма відомими сполуками є низька працездатність електролітів через їх швидке виснаження компонентами, що насичують поверхню. Крім того, слід враховувати неминуче окисдування поверхні, яке робить істотний вплив на корозійні властивості зміцнюваного матеріалу.

В роботі [21] досліджено процес відновлення і поверхневого зміцнення деталей автомобілів, який включає електроосадження залізохромистих покриттів і їх цементацію, що забезпечує значне підвищення рівня експлуатаційних властивостей.

Найбільш високий вміст карбідної фази в дифузійних шарах при цементації в карбюризаторі зазначеного вище складу виходить в залізохромистих покриттях з вмістом хрому близько 1,5%. Менший вміст хрому веде до зменшення кількості карбідів в шарі, більший вміст – до зменшення глибини цементації (рис. 3).

Температура і тривалість цементації залізохромистих осаджень помітно впливає як на вміст карбідів у дифузійних шарах, так і на глибину цих шарів. Найбільш інтенсивне карбідоутворення спостерігається при температурі цементації 880...900 °С, збільшення тривалості цементації веде до збільшення глибини дифузійного шару і укрупнення карбідних включень.

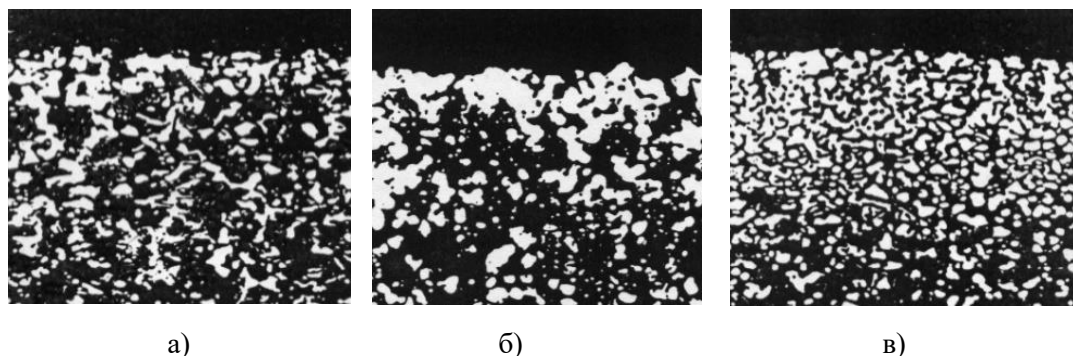


Рис. 3. Мікроструктури цементованих залізохромистих покриттів: а) 0,95 % Cr; б) 1,51 % Cr; в) 3,07 % Cr (×300)

Цементація залізохромистих гальванічних покриттів веде до виникнення в них напружень стиску, замість вихідних напружень розтягу. Найбільш високі напруження стиску (більше 300 МПа) мають місце в дифузійних шарах невеликої глибини (~ 0,1 мм) з вмістом фази карбіду близько 40%. При збільшенні глибини цементації, також як і при збільшенні вмісту карбідів в структурі, рівень напружень знижується, однак, у всіх випадках вони залишаються стискаючими. Напруження стиску

впливають на границю витривалості сталі і, отже, цементация покращує втомну міцність відновлених деталей.

У роботі [4] запропоновано значно продуктивніший спосіб нанесення зносостійких покриттів в режимі високотемпературного синтезу (СВС) з використанням двокомпонентних легуючих порошкових сумішей (Cr-C, V-C, W-C, Mo-C). Показано, що запуск процесу синтезу покриття може відбутися тільки після подолання певного бар'єру, коли змінюється пріоритетність реакцій окиснення на реакції утворення карбідів. Запропоновано можливі варіанти стадійності процесів в газовій – 1 або рідкій – 2 фазах:

1) науглецювання порошоків карбідоутворюючих металів → початок реакції карбідизації з виділенням тепла → утворення поверхневих шарів з евтектичною концентрацією при одночасному підйомі температури за рахунок екзотермічного ефекту → евтектичне плавлення з утворенням металокарбідного покриття;

2) контактне плавлення заліза з вуглецем → розчинення в розплаві порошоків карбідоутворюючих металів → утворення та кристалізація карбідів цих металів → кристалізація матриці.

На поверхню деталі шихта з компонентів покриття наносилась шарами за двома схемами, показаними на рис. 4 [4].

Ініціювання СВС – процесу утворення металокарбідного високовуглецевого покриття застосована промислова піч з максимальною робочою температурою до 1300 °С.

На основі термодинамічних розрахунків встановлено, що при температурах нижчих 900 °С суміші металевих порошоків з вуглецем у формі графіту або сажі (Cr-C, V-C, W-C, Mo-C) окисляються, а поверхня деталі тільки науглецюється. На температурах у системі вище 1000 °С стають термодинамічно вигідними та запускаються процеси безкисневого горіння з утворенням карбідів, виділенням значної кількості теплоти. Виникають умови та реалізуються процеси контактного плавлення в системі між підкладкою та шаром, що наноситься [4].

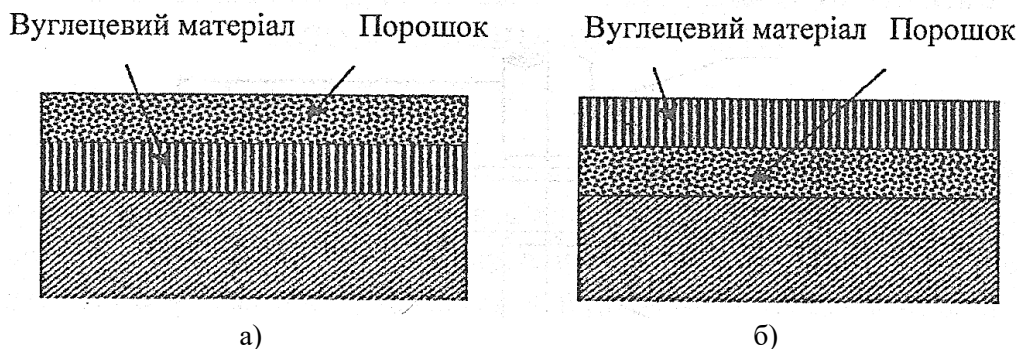


Рис. 4. Схеми нанесення шихти для синтезу високовуглецевого покриття в режимі СВС: а) перша схема; б) друга схема

Аналіз показав, що в залежності від використаного легуючого компоненту та схеми нанесення шарів композиції на підкладку, утворюються різні мікроструктури. На рис. 5 показані отримані в режимі СВС покриття системи Fe-Cr-C. Структура має витягнуті у напрямку тепловідведення карбіди хрому, а матриця є твердим розчином хрому в залізі (аустеніт) [4].

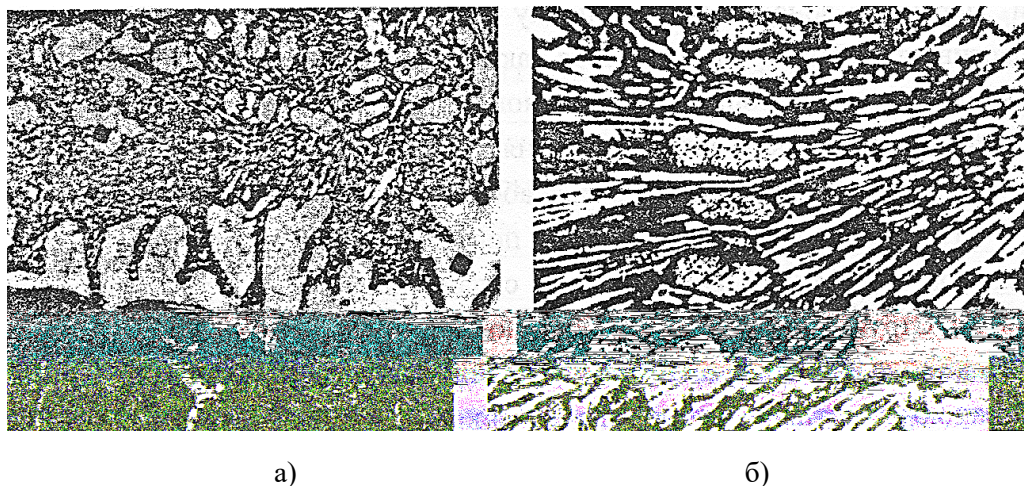
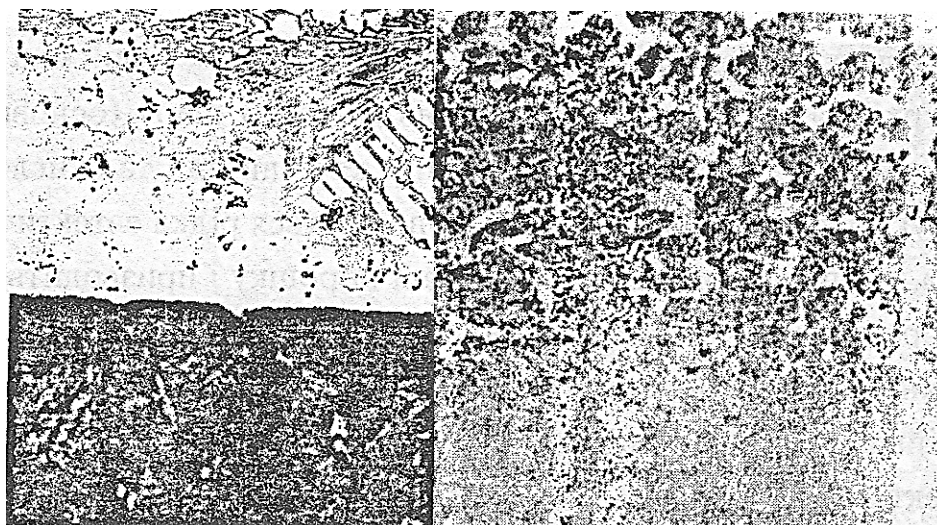


Рис. 5. Мікроструктури покриттів на базі суміші Cr+C, нанесених на сталеву підкладку за схемами, показаними на рис. 4

Мікроструктура зразка з покриттям на основі ванадію та вуглецю, мала істотно іншу будову (рис. 6). На рис. 6а спостерігаються дві основних фази структури – тверді карбіди ванадію у м'якшій консолідуєчій матриці твердого розчину ванадію в залізі. На рис. 6б не спостерігаються крупні карбіди ванадію, при цьому утворюється ледебурит, який легований ванадієм. У перехідній зоні між підкладкою та покриттям утворюється голчастий цементит [4].



а)

б)

Рис. 6. Мікроструктури покриттів на базі суміші V+C, нанесених на сталеву підкладку за схемами, показаними на рис. 4

Результати вимірювання мікротвердості покриття за допомогою мікротвердоміра ПМТ–3 та твердості твердоміром показані в табл. 1 [4].

Таблиця 1

Твердість та мікротвердість покриттів, отриманих у режимі СВС

Склад системи	V – C		Cr – C		W – C		Mo – C	
	Карбідна фаза	матриця	Карбідна фаза	матриця	Карбідна фаза	матриця	Карбідна фаза	матриця
H <sub>100</sub> , ГПа	10 – 16,0	4,0 – 6,0	8,0 – 15,5	4,0 – 5,0	10 – 15,0	≈6,0	5,0 – 9,0	4,5 – 7,0
HRC	66 – 69		64 – 68		68 – 70		63 – 66	

Недоліком нанесення високовуглецевого металокарбідного покриття у режимі СВС є:

- 1) необхідність ініціювання процесу шляхом підігрівання або підпалювання;
- 2) створення необхідних умов перебігу процесів утворення карбідів та металевої рідкої матриці замість окиснення шихти;
- 3) складність нанесення та утримання порошкової шихти на криволінійні (циліндричні) поверхні.

### Висновки

У загальному можна констатувати, що:

1. Створено низку способів нанесення на поверхню сталевих деталей зносостійких високовуглецевих покриттів з металевою матрицею та карбідними зміцнювальними включеннями або формування цементованих шарів з різними структурними складовими, які відомі під назвою «гартівні структури».
2. Недоліком переважної більшості розглянутих методів створення високовуглецевих покриттів на поверхнях деталей з низько- або середньовуглецевих сортів сталі є їх висока собівартість через низьку продуктивність та складність реалізації.

### СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] Попов В. С. *Восстановление и повышение износостойкости и срока службы деталей машин.* – Запорожье : Мотор-Сич, 2000. – 394 с.
- [2] Савуляк В. І., Шенфельд В. Й. *Наплавлення високовуглецевих зносостійких покриттів.* – Вінниця : ВНТУ, 2016. – 124 с.
- [3] Yrafen W., Sdenhofer B. Acetylene low-pressure carburizing - a novel and superior carburizing technology. *Heat treatment*

progress. – 1999. – V. 26. – P. 4.

[4] Савуляк В. І. Синтез зносостійких композиційних матеріалів та поверхневих шарів з екзотермічних компонентів. – Вінниця : УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2002. – 161 с.

[5] Марочник стали и сплавов [Електронний ресурс] // splav-kharkov. – 2003. – Режим доступу до ресурсу: [http://www.splav-kharkov.com/mat\\_start.php?name\\_id=32](http://www.splav-kharkov.com/mat_start.php?name_id=32).

[6] Шевеля В. В., Олександренко В. П. Трибохимия и реология износостойкости. – Хмельницький : ХНУ, 2006. – 278 с.

[7] Тененбаум М. М. Износостойкость конструкционных материалов и деталей машин при абразивном изнашивании. – М. : Машиностроение, 1966. – 332 с.

[8] Хрущов М. М., Бабичев М. А. Абразивное изнашивание. – М.: Наука, 1970.-251 с.

[9] Yoshimoto G., Tsukizoe T. On the Mechanism of Wear Between Metal Surfaces. *Wear*. – 1958. –V. 1, № 6.

[10] Костецкий Б. И. Фундаментальные закономерности трения и износа. – Киев : Знание, 1981. – 31 с.

[11] Бернштейн М. Л. Термомеханическая обработка металлов и сплавов. - М. : Металлургия, 1968. – Т. 1. – 586 с

[12] Бабат-Захряпин А. А., Кузнецов Г. Д. Химико-термическая обработка в тлеющем разряде. – М., 1975. – 284с.

[13] Арзамасов Б. Н. Циркуляционный метод химико-термической обработки. *Металловедение и термическая обработка металлов*. – 2004. – № 6 (215). – С. 79–84.

[14] Рыжов Н. М., Смирнов А. Е., Фахуртдинов Р. С. [и др.]. Особенности вакуумной цементации теплостойкой стали в ацетилене. *МиТОМ*. – 2004. – № 6. – С. 10–15.

[15] Киргизов В. Е., Шишкин Г. М., Балданов К. П. [и др.]. Повышение долговечности плужных лемехов при восстановлении наплавкой угольным электродом. *Вестник ИрГСХА*. – 2010. – № 38. – С. 65–71.

[16] Пономаренко Л. А., Дегула А. І., Тисячник О. В. Підвищення зносостійкості деталей шляхом заміни цементації на карбохромування. *Проблеми тертя та зношування*. – Суми : Сумський державний університет, 2017. – (77).

[17] Шадрин С. Ю. Электрохимико-термическая цементация стальных цилиндрических образцов в барботируемой ячейке. *Быстрозакаленные материалы и покрытия : сборник трудов 4-й Всероссийской научно-технической конференции с международным участием*. – М. : МАТИ, 2005. – С. 127–131.

[18] Кусманов С. А., Дьяков И. Г., Белкин П. Н. Повышение эффективности электрохимико-термической цементации путем модификации состава электролита. *Быстрозакаленные материалы и покрытия : труды 8-й Всероссийской научно-технической конференции с международным участием*. – М. : МАТИ, 2009. – С.119–122.

[19] Mirzoev R. A., Davydov A. D. Stability of the solution front of 'rectifying' metals in a passive state. *Elektrokhimiya*. – 1995. – V. 31, no. 3. – P. 277–285.

[20] Das D. K. Prior Austenite Grains in Steels laser Surface Alloyed with Carbon. *Materials characterization*. – 1997. – V. 38, no 3. – P. 135–141.

[21] Колмыков Д. В. Восстановление и упрочнение деталей автомобилей цементованными железохромистыми гальваническими покрытиями : автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук. – Орел, 2009. – 19 с.

**Савуляк Валерій Іванович** – д-р техн. наук, професор, професор кафедри галузевого машинобудування, e-mail: korsav84@gmail.com;

**Шенфельд Валерій Йосипович** – канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри галузевого машинобудування, e-mail: leravntu@gmail.com;

**Дмитрієв Максим Сергійович** – аспірант кафедри галузевого машинобудування, e-mail: maxlion1974@gmail.com

Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця.

**V. Savulyak<sup>1</sup>**  
**V. Shenfeld<sup>1</sup>**  
**M. Dmitriev<sup>1</sup>**

## Modification of working surfaces of steel parts with forming high-speed structures

<sup>1</sup>Vinnitsia National Technical University

*The urgent task is to create on the surface of steel parts layers that are capable of long time to work reliably under conditions of friction and wear. The tool for increasing the wear resistance of the surface layers of steel parts is chosen to modify the working surfaces by their carbonization. In this case, the hardness of the metal is controlled by the change in the carbon concentration in the surface layers, the content of the alloying elements by thermal and chemical-thermal processing techniques.*

*In the work comparative studies of the efficiency of various technologies of carburization of working surfaces of steel parts and formation of the properties of wear resistance, formation of burrs and gripping according. It has been proposed to carry out comparative studies according to the criteria of performance, cost, and applicability for dimensional parts.*

*The analysis revealed the existence of a number of methods that use the diffusion phenomenon to form wear-resistant high-carbon coatings with metal matrix and carbide reinforcing inclusions or cemented layers with different structural components on the surfaces of steel parts, which are known as "quenching structures", differing in different technical and economic efficiency. Particular attention is also paid to the method of forming composite high-carbon coating in the mode of self-propagating high-temperature synthesis (SHS).*

*As a result of the carried out researches it is shown that there is a significant shortage of the overwhelming majority of the considered methods of carburizing of working surfaces of parts from low or medium carbon varieties of steel - high cost of*

production due to low productivity and complexity of implementation. These drawbacks stimulate the development of new high-performance methods of forming on steel details corresponding coatings of considerable depth and low cost.

**Keywords:** steel, surface layer, carburization, hardness, wear resistance, efficiency.

**Savulyak Valery** – Dr. Sc. (Eng.), Professor, Professor of the Department of industrial engineering, e-mail: korsav84@gmail.com;

**Schenfeld Valery** –PhD., Associate Professor, Associate Professor of the Department of industrial engineering, e-mail: leravntu@gmail.com;

**Dmytriiev Maxym** – postgraduate of the Department of industrial engineering, e-mail: maxlion1974@gmail.com.

**В. И. Савуляк<sup>1</sup>**  
**В. И. Шенфельд<sup>1</sup>**  
**М. С. Дмитриев<sup>1</sup>**

## Модифицирования рабочих поверхностей стальных деталей с формированием высокоуглеродистой структуры

<sup>1</sup>Винницкий национальный технический университет

Актуальной задачей является создание на поверхности стальных деталей слоев, которые способны длительное время надежно работать в условиях трения и износа. Инструментом для повышения износостойкости поверхностных слоев стальных деталей выбрано методы модифицирования рабочих поверхностей путем их науглероживания. В этом случае твердость металла регулируют изменением концентрации углерода в поверхностных слоях, содержанием легирующих элементов по технологиям термической и химико-термической обработки.

В работе выполнены сравнительные исследования эффективности различных технологий науглероживания рабочих поверхностей стальных деталей и формирования на них свойств устойчивости к износу, образованию заусенцев и схватыванию. Сравнительные исследования предложено выполнять по критериям производительности, себестоимости и возможности применения для габаритных деталей.

Анализ выявил существование ряда способов, которые используют явление диффузии для формирования на поверхностях стальных деталей износостойких высокоуглеродистых покрытий с металлической матрицей и карбидными упрочняющими включениями или цементируемых слоев с различными структурными составляющими, которые известны под названием «закалочные структуры», отличающиеся разной технико-экономической эффективностью. Определенное внимание уделено также способу формирования композиционного высокоуглеродистого покрытия в режиме самораспространяемого высокотемпературного синтеза (СВС).

В результате выполненных исследований показано наличие существенного недостатка подавляющего большинства рассмотренных методов науглероживания рабочих поверхностей деталей из низко- или среднеуглеродистых сортов стали – высокая себестоимость из-за низкой производительности и сложности реализации. Эти недостатки стимулируют разработку новых высокопродуктивных методов формирования на стальных деталях соответствующих покрытий значительной глубины при низкой себестоимости.

**Ключевые слова:** сталь, поверхностный слой, науглероживание, твердость, износостойкость, эффективность.

**Савуляк Валерій Іванович** – д-р техн. наук, профессор, профессор кафедри отраслевого машиностроєння, e-mail: korsav84@gmail.com;

**Шенфельд Валерій Йосифович** – канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри отраслевого машиностроєння, e-mail: leravntu@gmail.com;

**Дмитриєв Максим Сергєєвич** – аспірант кафедри отраслевого машиностроєння, e-mail: maxlion1974@gmail.com.