

Є.А. АСТАХОВ, докт. техн. наук, пров.наук.співр., інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України, Київ
В.В. АРТЕМЧУК, канд. техн. наук, доц., ДНУЗТ ім. академіка В. Лазаряна, Дніпропетровськ

СТРУКТУРА ТА ВЛАСТИВОСТІ АМОРФНИХ ВІДНОВЛЮВАЛЬНИХ ПОКРИТТІВ НА ОСНОВІ ЗАЛІЗА

У статті розглянуті структура та властивості шаруватих аморфізованих покриттів, отриманих в умовах газотермічного напилення. Наведено порівняльний аналіз покриттів із сплавів на основі заліза. Показано фактори, що впливають на утворення аморфної структури в детонаційних покриттях з металевих сплавів. Експериментально показано вплив структури покриттів на зносостійкість та витривалість відновлених деталей.

Ключові слова: відновлення деталей, газотермічне напилення, структура, покриття, аморфний

В статье рассмотрены структура и свойства слоистых аморфизированных покрытий, полученных в условиях газотермического напыления. Приведен сравнительный анализ покрытий из сплавов на основе железа. Показаны факторы, которые влияют на образование аморфной структуры в детонационных покрытиях из металлических сплавов. Экспериментально показано влияние структуры покрытий на износостойкость и выносливость восстановленных деталей.

Ключевые слова: восстановление деталей, газотермическое напыление, структура, покрытие, аморфный

A structure and properties of the stratified amorphous coverages, got in the conditions of thermal spraying is considered in the article. The comparative analysis of coverages is resulted from alloys on the basis of iron. Factors which influence on formation of amorphous structure in coverages of detonations from metallic alloys are shown. Influence of structure of coverages is experimentally shown on wearproofness and endurance of the recovered details.

Keywords: restoration parts, thermal spraying, structure, coverage, amorphous

Вступ. Постановка проблеми

Рухомий склад залізниць працює у важких умовах, піддається підвищеним експлуатаційним навантаженням, що часто приводить до передчасного зносу деталей, особливо тягового рухомого складу. Проблема підвищення надійності та ресурсу деталей рухомого складу потребує комплексного підходу, одним із етапів якого є застосування відновлювальних і одночасно зміцнюючих технологій. Серед деталей рухомого складу, що зношуються багато таких, що мають циліндричну форму. Наприклад, сумарна кількість валиків гальмівної важільної передачі, підвісу редуктора, гідроамортизаторів, ресорного підвішування, підвісу тягових електричних двигунів для електровозів ЧС 7, ЧС 8 складає 426 од., ВЛ 80 – 272 од., ЧС 2 – 310 од. Враховуючи середню вартість валиків 32 грн. (станом на 2010 р.), нескладно підрахувати економічну доцільність їх відновлення, якщо вартість відновлення складає не більше 20...50 % від вартості нових деталей.

На даний час існує багато способів відновлення та зміцнення поверхні деталей машин і механізмів. Одним із перспективних методів отримання функціональних покриттів є газотермічне напилення. В залежності від способу

нанесення, режимів процесу та напилюваного матеріалу поверхня відновлених деталей отримує ті або інші експлуатаційні властивості, наприклад, підвищену зносостійкість, корозійну стійкість, втомлену міцність та ін. Використання порошкових матеріалів значно збільшує функціональні можливості відновлюваних покриттів, дозволяючи отримувати комбіновані композиційні покриття. Важливим позитивним економічним фактором газотермічного напилення є можливість нанесення покриттів на поверхню відносно дешевих звичайних конструкційних сталей.

Особливий науковий та практичний інтерес представляють композиційні покриття, до яких можна віднести шаруваті, градієнтні, диспернозміцнені, волокнисті. В даній роботі розглянута можливість побудови високоефективної шаруватої структури покриття. Причому для нанесення робочого шару застосовували різні аморфізовані матеріали.

Аналіз публікацій показує, що дослідженню структури, умов створення та властивостям аморфних покриттів присвячено немало робіт [1-4]. У той же час залишається широке коло питань пов'язаних із використанням аморфізованих матеріалів різних складів для багатоцільових задач, зокрема на залізничному транспорті.

Метою даної роботи є дослідження структури та властивостей шаруватих аморфізованих покриттів, отриманих в умовах газотермічного напилення, а також факторів, що впливають на утворення аморфної структури в детонаційних покриттях з металевих сплавів. А також експериментально визначити вплив структури покриттів на зносостійкість та витривалість відновлених деталей.

Виклад основного матеріалу

Властивості зміцнюючих фаз в структурі напилених покриттів суттєво впливають на експлуатаційні характеристики відновлених деталей. Дослідження структури газотермічних покриттів, розподілу, складу і властивостей фаз дозволяє оцінити зносостійкість, втомлену міцність, твердість поверхні. Формування структури відновлювальних покриттів залежить від великої кількості вхідних факторів, чим пояснюється складність теоретичних досліджень та практичної реалізації. Останнє пояснює велику кількість різноманітних експериментальних даних.

Аморфний стан газотермічних покриттів із сплавів, що містять бор на основі заліза привертає до себе увагу завдяки високому рівню експлуатаційних характеристик. Висока міцність зчеплення, твердість, зносостійкість при низькій вартості дозволяють розглядати їх, як перспективні матеріали для отримання зносостійких покриттів на зношених деталях рухомого складу [1, 2].

У даній роботі представлені результати дослідження структури та деяких властивостей детонаційних покриттів з використанням матеріалів Fe-B-C, Fe-Ni-B-C, Fe-Ni-Cr-B-Si та ін. Дані сплави схильні до аморфізації при надшвидкому охолодженні з розплавленого стану [1].

Напилення проводили порошками різної фракції (5...40, 50...63, 63...100 и 100...160 мкм). Покриття наносили на зразки із сталі 45 на автоматичному детонаційному комплексі «ПЕРУН-С» [3] із застосуванням ацетилен-кисневою і пропан-бутан-кисневою сумішей. Витрату напилюваного матеріалу на кожен

постріл підтримували у всіх дослідах постійним (товщина за постріл складала 8...10 мкм). Напилення та дослідження покриттів проводили в інституті електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України.

Фазовий склад покриттів визначали рентгенографічним методом на установці ДРОН-1.5 у випромінюванні $Fe_{K\alpha,\beta}$ без фільтру. Аналіз металографії шліфів проводили на мікроскопі «Неофот-32» та «МІМ-8», мікротвердість вимірювали на приладі ПМТ-3 при навантаженні 0,49 Н. Міцність зчеплення покриттів (товщиною 400...500 мкм) з основою визначали по методиці конусного штифта.

Триботехнічне випробування покриттів проводили в умовах граничного тертя з обмеженим мастилом [4] при швидкості ковзання 1 м/с і питомих навантаженнях 5,1 та 10,2 МПа. Матеріалом контртіла служила сталь 40Х.

Приведені в таблиці дані показують зміну характеристик покриттів залежно від складу детонаційної суміші.

Таблиця. Вплив складу детонаційної суміші на характеристики детонаційних покриттів із сплаву $Fe_{61}B_{27}C_2$

Характеристика покриття Склад детонаційної суміші	Зміст аморфної фази, %	Міцність зчеплення, МПа	Пористість, %	Мікротвердість МПа
$C_3H_8 + 3,5O_2$	60	65	1,5	7500
$C_2H_2 + O_2 + N_2$	80	70	1,0	8200

З таблиці видно, що використання ацетилен-кисневої суміші, що має вищі енергетичні характеристики (температуру нагріву та швидкість їх руху [4]) забезпечують підвищення ступеня деформації напилюваного матеріалу, і відповідно, приводить до збільшення аморфної фази.

На рис. 1 для випадку напилення при стехіометричних співвідношеннях двох типів детонаційної суміші показаний вплив розміру часток на кількість аморфної фази, що утворилася.

Наведені на рис. 1 дані вказують, що з погляду аморфізації покриттів застосування пропан-бутан-кисневої детонаційної суміші ефективно для порошоків з розміром частинок до 40 мкм.

Разом з тим деякі з цих віддзеркалень співпадають з найбільш сильними лініями бороцементата $Fe(B,C)$, що дозволяє припустити його присутність у порошоків в дуже малих кількостях.

Напилені покриття з порошоків сплаву $Fe_{61}B_{37}C_2$ мають аморфно-кристалічну

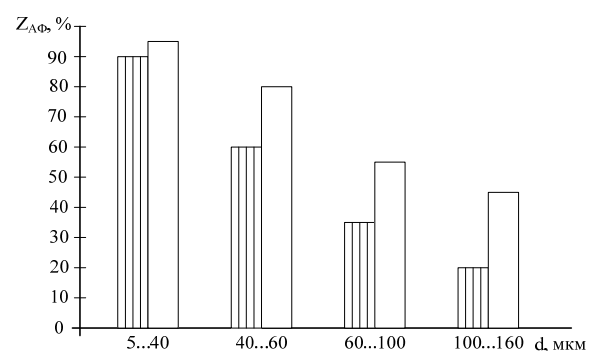


Рис. 1. Вплив розміру частинок порошку із сплаву Fe-B-Si-C на об'ємний зміст аморфної фази при детонаційному напиленні сумішами: - ацетилен-кисень □ ; - пропан-бутан-кисень □.

структуру: на рентгенограмі (рис. 2б) видно два розмиті максимуми характерних для розплавів і аморфних сплавів [2], на фоні яких спостерігаються інтенсивні лінії кристалічних фаз, присутніх в початкових порошках.

Введення в сплав $Fe_{61}B_{37}C_2$ титану перешкоджає утворенню бориду заліза. На рентгенограмах порошку (рис. 3а) сплаву $Fe_{67}Ti_7B_{24}C_2$ ідентифікація FeB , Fe_2B , Fe_3B ускладнена, при цьому найбільшу інтенсивність мають лінії α -Fe.

На рентгенограмах напиленого сплаву $Fe_{67}Ti_7B_{24}C_2$ (рис. 3, б) також присутні розмиті дифракційні максимуми, на фоні яких розміщені піки кристалічних фаз. На відміну від порошку ідентифікація фаз TiC , B_4C , Ti_2B_5 та графіту ускладнена. В порівнянні з покриттями із сплаву $Fe_{61}B_{37}C_2$ дифузні максимуми від аморфної фази в даному випадку мають велику інтенсивність. Це свідчить про збільшення об'ємного змісту аморфної фази у разі покриття із сплаву, що містить титан.

Аналіз мікроструктур початкових порошків та порівняння їх рентгенограм з рентгенограмами напилених покриттів показують, що в результаті напилення в обох сплавах виявляються істотні структурні зміни. На рентгенограмах порошків сплаву $Fe_{61}B_{37}C_2$ (рис. 2, а) найбільшу інтенсивність мають лінії монобориду заліза FeB .

Рентгенографічні також реєструються лінії α -Fe. Дифракційні віддзеркалення, відповідні напівбориду заліза Fe_2B , мають слабкішу інтенсивність, на рентгенограмах помітні тільки найбільш сильні його лінії. Слід зазначити, що ряд дифракційних віддзеркалень ідентифікувати складно із-за їх дуже слабкої інтенсивності.

На рис. 4 представлена структура покриття із сплаву $Fe_{61}B_{37}C_2$. Чітко виявляється моноборид заліза FeB у вигляді сірих включень округлої форми в матриці α -Fe. Мікротвердість FeB досягає 1650...1700 МПа. Між моноборидом заліза розміщені області фази Fe_2B і мілкодисперсні включення, якими, можливо, є Fe_3B та $Fe_3(B,C)$. Покриття мають шарувату будову, характерну для напилених структур.

Шаруватість структури напиленого покриття із сплаву $Fe_{67}Ti_7B_{24}C_2$ (рис. 4, г) у порівнянні із структурою покриття із сплаву $Fe_{61}B_{37}C_2$ виражена чіткіше. При

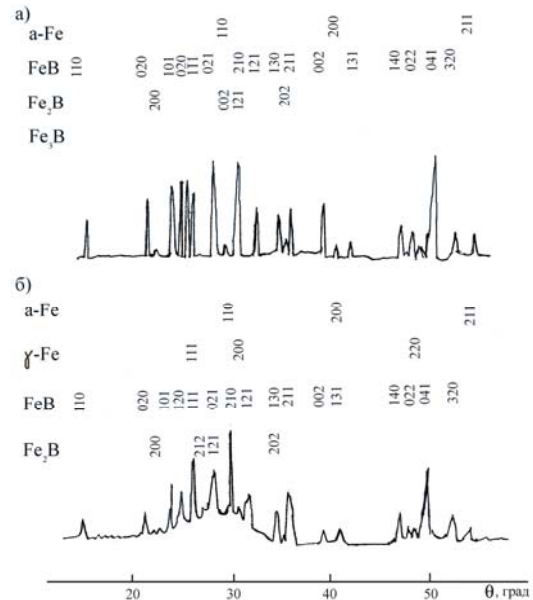


Рис. 2. Рентгенограми порошку (а) і покриття (б) з сплаву $Fe_{61}B_{37}C_2$

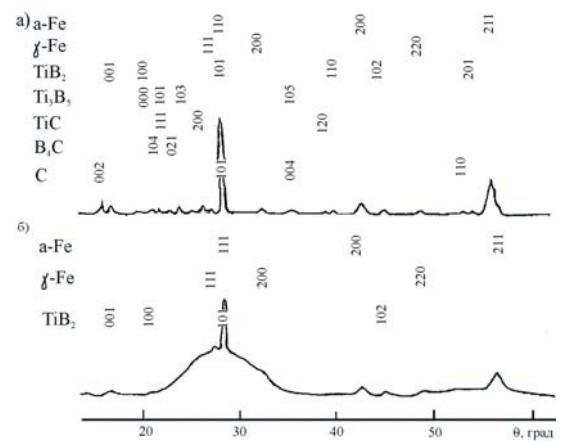


Рис. 3. Рентгенограми порошку (а) та покриття (б) із сплаву $Fe_{67}Ti_7B_{24}C_2$

цьому вона відрізняється меншою пористістю. В межах шарів можна відрізнити дві складові: світла непротравлена матриця (аморфна фаза з включеннями α -Fe) має мікротвердість 11000...14000 МПа та виділення, що відносяться в основному до TiB_2 .

На підставі результатів триботехнічних випробувань встановлено, що аморфні детонаційні покриття з евтектичних сплавів на основі заліза нікелю за зносостійкістю в умовах граничного тертя і тертя без мастила істотно

перевершують конструкційні та інструментальні сталі після термічної та хіміко-термічної обробки, а не рідко не поступаються детонаційним покриттям з твердих сплавів типу ВК (WC-Co). Так, наприклад, при терті без мастила і з мастилом при поворотно-поступальному ході на машині торцевого тертя детонаційні покриття із сплавів системи Fe-B-C з переважно аморфною структурою мають в 1,7...2,8 разів менші значення лінійного зносу в порівнянні з цементованою сталлю 20X (рис. 5).

При дослідженні детонаційних покриттів із сплаву евтектичного сплаву системи Fe-B-C, що містять близько 70 % аморфскладаючої, також встановлено [4], що їх зносостійкість близька до такої для сплаву ВК-15.

Характерною особливістю аморфних детонаційних покриттів є той факт, що вони сприяють підвищенню межі витривалості основи в обмеженому та необмеженому діапазонах. Цей факт представляє інтерес у зв'язку з тим, що в більшості випадків газотермічні покриття призводять до зниження цієї характеристики. Випробування зразків конструкційних сталей з аморфними детонаційними покриттями із сплавів Fe-B-C та Fe-Ti-B-C, в умовах скручування на вигин, показали підвищення межі витривалості в порівнянні із сталлю без покриття в середньому на 25-45 % залежно від складу покриття і його товщини.

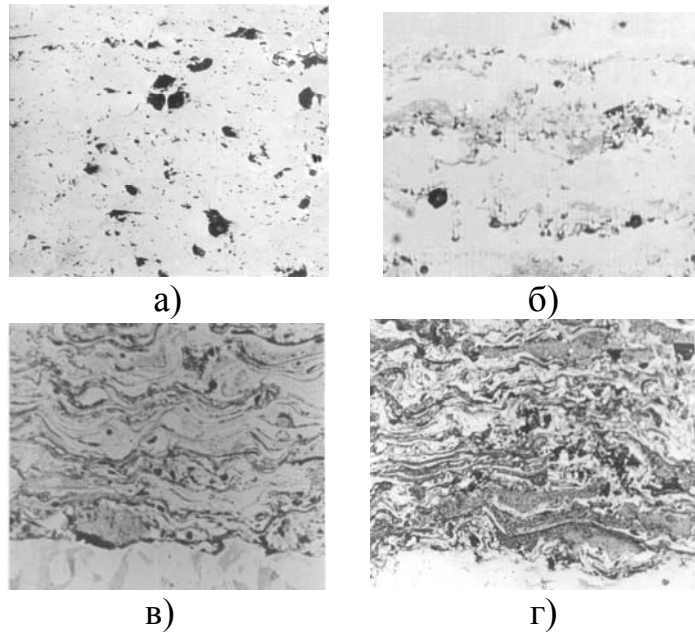


Рис. 4. Мікроструктура покриття із сплаву $Fe_{61}B_{37}C_2$ (а, в) та сплаву $Fe_{67}Ti_7B_{24}C_2$ (б, г)

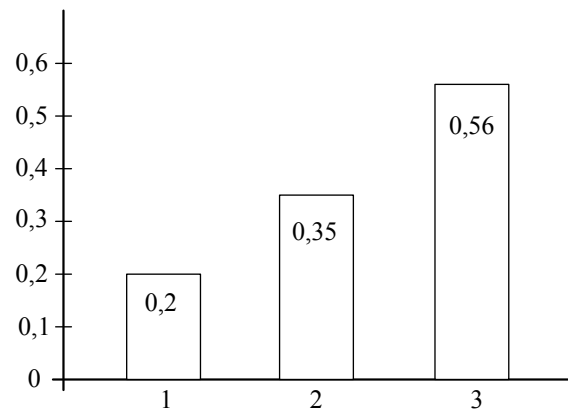


Рис. 5. Інтенсивність зношування аморфних покриттів із сплавів системи Fe-B-C (1-2) і цементованої сталі 20X (3) при терті з обмеженим мастилом (поворотно-поступальний хід, амплітуда 61 мм, швидкість ковзання - 0,023 м/с, питоме навантаження - 110 МПа, контртіло - цементована сталь 20X): - Fe-B-C; 2 - Fe-Ti-B-C, 3 - сталь 20X.

Детонаційний метод в порівнянні з іншими методами газотермічного напилення забезпечує найбільш високий рівень межі витривалості (рис. 6) [2].

Таким чином, в результаті дослідження зносостійкості аморфізованих покриттів встановлено, що найбільш переважним варіантом покриття з погляду забезпечення максимальної зносостійкості можуть бути щільні однорідні покриття, структура яких представлена аморфною матрицею з незначними мікрокристалічними включеннями твердих фаз.

Що стосується досягнення максимальної міцності зчеплення при детонаційному напиленні, то очевидно, вона відповідає режиму, що забезпечує максимальний зміст аморфної фази і мінімальному змісту розчинених газів.

Висновки

1. Дані приведені на рис. 1 указують, що з погляду аморфізації покриттів застосування пропан-бутан-кисневої детонаційної суміші ефективно для порошків з розміром частинок до 40 мкм.

2. На підставі результатів триботехнічних випробувань в умовах поворотно-поступального ходу встановлено, що аморфізовані покриття із сплавів на основі заліза та нікелю за зносостійкістю при граничному терті та терті без мастила істотно перевершують конструкційні й інструментальні сталі після термічної та хіміко-термічної обробки, а у багатьох випадках також не поступаються детонаційним покриттям з твердих сплавів типу ВК WC-Co. Так, наприклад, при терті без мастила та з мастилом на машині торцевого тертя детонаційне покриття із сплавів системи Fe-Ti-B-C переважно з аморфною структурою мають у 1,7...2.8 разів менше значення лінійного зносу в порівнянні з цементованою сталлю 20X.

3. Встановлено, що аморфні детонаційні покриття сприяють підвищенню межі витривалості основи. Випробування зразків конструкційних сталей з аморфними детонаційними покриттями із сплавів Fe-Cr-B-Ni-C, Fe-Ni-B, Fe-Ni-Cr-Mo-B, Fe-Cr-Mo-B, проведені на втомній машині Schenck типа Punn в умовах скручування на вигин, показали підвищення межі витривалості в порівнянні із сталлю без покриття, на 20...25 % залежно від складу покриття та його товщини.

Список літератури: 1. Куницкий Ю.А., Коржик В.И., Борисов Ю.С. Некристаллические металлические материалы и покрытия в технике. –К., Техника, 1988, - 198 с. 2. Исследование структуры и свойств борсодержащих сплавов / М.Д. Егоров, Ю.Л. Сапожников, Р.М. Кацель, Ю.В. Шахазаров / Композиционные покрытия: Тез. 3-й н.-т. конф. –Житомир: Житомирский фил. КПИ, 1985. –С.36-37. 3. Астахов Е.А. Детонационный комплекс «Перун-С» для нанесения защитных покрытий. Автоматическая сварка, -2003. –С. 38-43. 4. Астахов Е.А., Коржик В.И., Чернышев А.В. Детонационное напыление аморфных и микрокристаллических покрытий. –К. –Брошюра. Общество «Знание», УССР, 1990. -20 с.

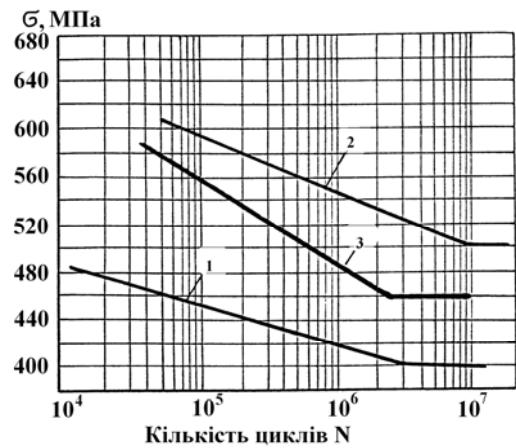


Рис. 6. Графіки Велера для сталі 45 (1) з аморфними детонаційними (2) та плазморовими (3) покриттями із сплаву Fe-B-C [6]

Поступила в редколлегию 15.05.2012.