

УДК 621.762+669.056.9+669.24.71849+620.17

О.Г. Гавриленко, О.М. Полярус, О.В. Жидельова, А.В. Мініцький

## ВПЛИВ ОБРОБКИ В МАГНІТНОМУ ПОЛІ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ МІЦНОСТІ ДЕТОНАЦІЙНИХ ПОКРИТТІВ СИСТЕМ WC-Co I Fe-Al

The paper investigates the influence of magnetic treatment on the destruction mechanism of detonation coatings of WC-Co and Fe-Al systems on the steel substrate at bend test. We establish that magnetic treatment enhances mechanical properties of the system “coating–substrate”. The plastic deformation of the system raises from 0,15 % to 0,35 % in the cracking moment. Tensions developed at the destruction moment increases from 700 to 1300 MPa for VK-15 hard-alloy, while for Fe<sub>3</sub>Al alloy deformation increases from 0,06 % to 0,2 % and tensions raises from 214 to 582. The enhancement of properties is caused by improving of the adhesion quality on the “coating–substrate” boundary as a result of elements redistribution at magnetic treatment.

### Вступ

Серед перспективних матеріалів інструментального та конструкційного призначення нині особлива увага приділяється матеріалам на основі систем WC-Co і Fe-Al. Матеріали на основі системи Fe-Al мають високий опір корозії та окисненню, стійкість у сульфідних середовищах, підвищену зносостійкість. Вони широко застосовуються в автомобілебудуванні як матеріали дисків регенераторів автомобільних газотурбінних систем, також перспективні для виробництва окремих вузлів і дисків газових турбін, що працюють за температур 630–680 °C [1–6]. Можливість використання матеріалів на основі алюмініду заліза (Fe<sub>3</sub>Al) як нагрівальних елементів, пористих газометалічних фільтрів, каталітичних підкладок, компонентів для роботи з розчинами солей тощо зумовлена унікальним комплексом властивостей, притаманних з'єднанню Fe<sub>3</sub>Al [7, 8].

Поряд із розробленням матеріалів для виготовлення деталей конструкційного призначення проводяться інтенсивні дослідження і в галузі розроблення захисних покриттів. Зносостійкі покриття із твердого сплаву на основі системи WC-Co широко використовуються у промисловості для напилення на ріжучий та формоутворюючий інструмент, у верстат-, автомобіле- та авіабудуванні для напилення на поверхні пар тертя, що дає можливість збільшити зносостійкість вузлів у 2–4 рази порівняно зі сталевими або чавунними деталями [9].

### Постановка задачі

Метою роботи є вивчення впливу магнітної обробки на експлуатаційні властивості де-

тонаційних покриттів конструкційного призначення, а також розроблення оптимальних технологічних режимів, що дасть можливість використовувати магнітну обробку в промисловості.

### Теоретичні відомості

Відомо, що однією з основних проблем газотермічних покриттів є внутрішні напруження, які виникають у матеріалі в результаті нерівноважних термічних умов при напиленні. Залишкові напруження можуть бути причиною відшарування та розтріскування покриття в процесі або після нанесення. В [8] було досліджено фізико-механічні властивості покриттів на основі Fe<sub>3</sub>Al, які були нанесені високошвидкісним газотермічним методом, розглянуто вплив швидкості розпилення частинок на мікроструктуру, залишкові напруження, міцнісні властивості та теплове розширення покриття Fe<sub>3</sub>Al. Показано, що цілісність і довговічність газотермічних покриттів на основі алюмініду заліза на конструкційних сталях може зменшуватися внаслідок великих залишкових напружень, що визначаються різницею в коефіцієнтах термічного розширення матеріалів покриття і підкладки. Авторами досліджено вплив плазмових інтерметалідних Fe-Al покриттів на втомну міцність підкладки з низьковуглецевої сталі. Показано що втомні тріщини в підкладці починаються на поверхні поділу підкладка–покриття; покриття руйнуються внаслідок міжламельного розтріскування та розшарування. Також раніше проводилися дослідження, які частково торкнулися питання визначення внутрішніх напружень у плазмових покриттях системи WC-Co, але в них не було описано і навіть не було запропоновано методи зниження рівня цих напружень [3].

Відомо, що магнітне поле може впливати на дифузійні процеси та рухливість дислокацій у феромагнетиках [1–6, 9, 10]. Раніше у ряді праць було показано, що за допомогою обробки в магнітному полі можна вплинути на структуру, фазовий склад і, відповідно, властивості матеріалів. У [4] було показано, що для детонаційних покриттів на основі інтерметаліду NiAl обробка в магнітному полі призвела до суттєвих змін у напруженому стані системи покриття–основа. Для покриттів інструментального та конструкційного призначення також встановлено позитивний вплив магнітної обробки на їх працездатність. У працях [1, 2] було показано, що магнітна обробка позитивно впливає на підвищення міцності та зносостійкості детонаційних покриттів із твердих сплавів складу WC–9%Co і WC–15%Co. При цьому магнітна обробка призводить до принципових змін у характері руйнування покриттів, що в свою чергу спричинено дифузійними процесами та структурними змінами, які відбуваються у матеріалі внаслідок магнітної обробки. Особливістю твердого сплаву марки ВК-15 є наявність кобальтового складника. Кобальт, як відомо, є природним феромагнетиком, і йому, відповідно, притаманний атомний магнітний порядок. У процесі намагнічування відбувається взаємодія атомів кобальту із зовнішнім магнітним полем.

Поряд із цим експериментальні та теоретичні роботи, спрямовані на дослідження природи магнітних аномалій у феромагнітному Fe<sub>3</sub>Al, проводяться й нині, проте немає загальноприйнятої теорії щодо формування магнетизму впорядкованих сплавів Fe–Al з атомарним вмістом Al більше 25%.

Враховуючи наведені вище дані, слід зауважити, що дослідження впливу магнітного поля на властивості матеріалів, у т.ч. покриття на основі систем WC–Co та Fe–Al, становлять особливий інтерес.

### Експериментальна частина

Порошок складу Fe<sub>3</sub>Al з розміром частинок 5–60 мкм для напилення покриттів був отриманий механічним подрібненням зливка, виплавленого в електродуговій печі з вольфрамовим невитратним електродом на мідному водоохолоджуваному поді в середовищі очищеного аргону. Для гомогенізації структури зливок піддали ізотермічному відпалу у вакуумі при

1100 °C протягом 8 год з подальшим охолодженням у печі до кімнатної температури.

Порошок ВК-15 для напилення був виготовлений з механічної суміші порошків WC і Co з подальшим спіканням в атмосфері водню при  $T = 1600$  °C протягом трьох годин. Після спікання отриману губку було подрібнено у кульовому млині із твёрдосплавною футерівкою. Після розмолу, використовуючи стандартний набір сит, отримано фракцію для напилення –0063.

Напилення покриттів здійснювалося за допомогою детонаційно-газової установки “Дніпро-5 МА”, яка була розроблена в ІПМ НАН України. Як робочі гази використовували суміш ацетилену з киснем. Отримані покриття мали товщину ~300 мкм та пористість 1–2%.

Обробка в імпульсному магнітному полі проводилась на автоматичному коерцитиметрі ИКС 8–3. Режим обробки: індукція магнітного поля у вільному зазорі – 0,2–0,3 Тл, час намагнічування 1–2 хв.

При магнітній обробці в постійному полі зразок розміщувався між двома магнітними полюсами так, щоб лінії напруженості магнітного поля проходили спочатку через підкладку, а потім через покриття.

Зразки були виготовлені у вигляді прямокутних балок з розмірами 22 × 3 × 2 мм з конструкційної вуглецевої сталі Ст3 з покриттям, нанесеним на одну сторону.

Випробування зразків на згин проводили на автоматизованій випробувальній машині, що оснащена оптичним мікроскопом та камерою, зображення з якої передається на ПК, при цьому запис зображення в процесі випробування здійснювався через кожні 2 с. Триточковий згин зразків здійснювався навантажуючим пристроєм з електричним приводом, який дає змогу змінювати швидкість деформації в діапазоні 0,005–5 мм/хв та навантаження  $P$  до 500 Н. Швидкість рухомого упору становила 0,25 мм/хв. Значення навантаження виводилося на табло приставки “Мікротест 1”. Запис діаграми навантаження–переміщення виконувався за допомогою двокоординатного приладу Н307.

### Обговорення результатів

На діаграмах випробувань зразків на згин (рис. 1, 2), до та після магнітної обробки, наведено характерні точки, які відповідають по-

чатку течії (А), моменту утворення тріщини (В), релаксації напруження після розкриття тріщини (С), деформації підкладки зі зруйнованим покриттям (D).

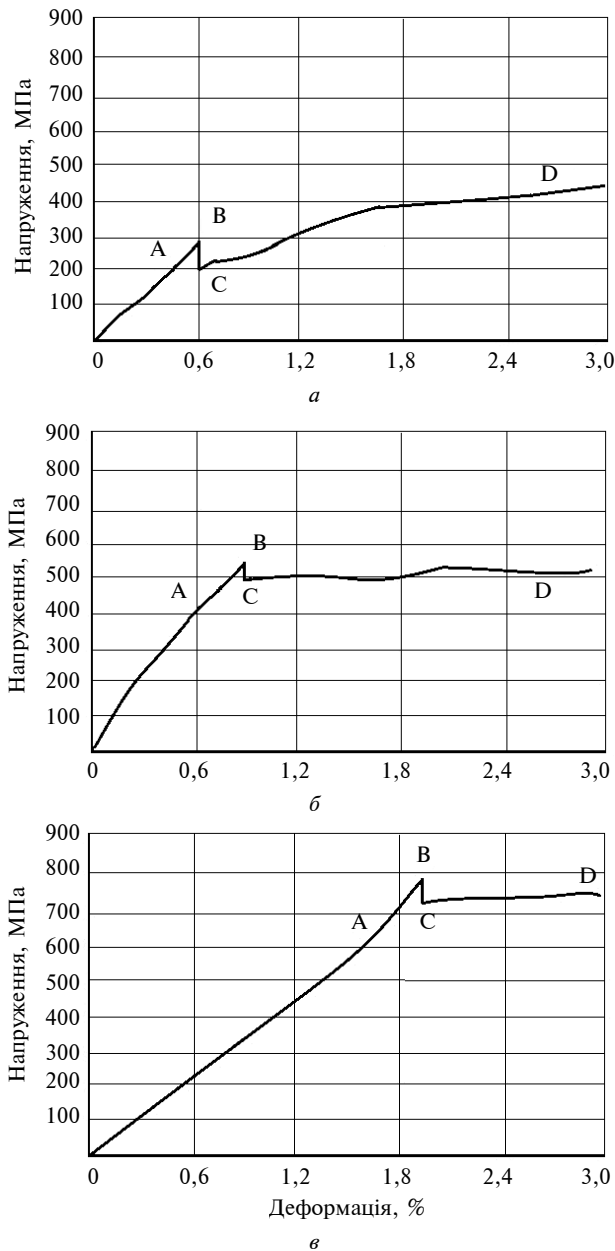


Рис. 1. Діаграми випробувань на згин зразків покриття  $Fe_3Al$  на підкладці Ст.3: а – без обробки; б – після обробки в імпульсному магнітному полі; в – після обробки в постійному магнітному полі

З первинного аналізу діаграм випливає, що напруження, яке відповідає моменту старту тріщини в системі покриття–підкладка для ВК-15 в обох випадках приблизно однакове і дорівнює ~360–380 МПа, а для  $Fe_3Al$  становить: без магнітної обробки – 129 МПа, після оброб-

ки в імпульсному магнітному полі – 346 МПа, після обробки в постійному магнітному полі – 314 МПа. Згідно з літературними даними, межа текучості для Ст.3 – 300 МПа, для інтерметаліду  $Fe_3Al$   $\sigma_{0,2} = 455$  МПа, а для твердого сплаву WC-Co з 15 % Co  $\sigma_{0,2} = 1500$  МПа. Отже, існує інтервал, в якому підкладка деформується пластично, а покриття – пружно. Це позначається як на характері діаграми навантаження, так і на механізмі утворення та розвитку тріщини в покритті.

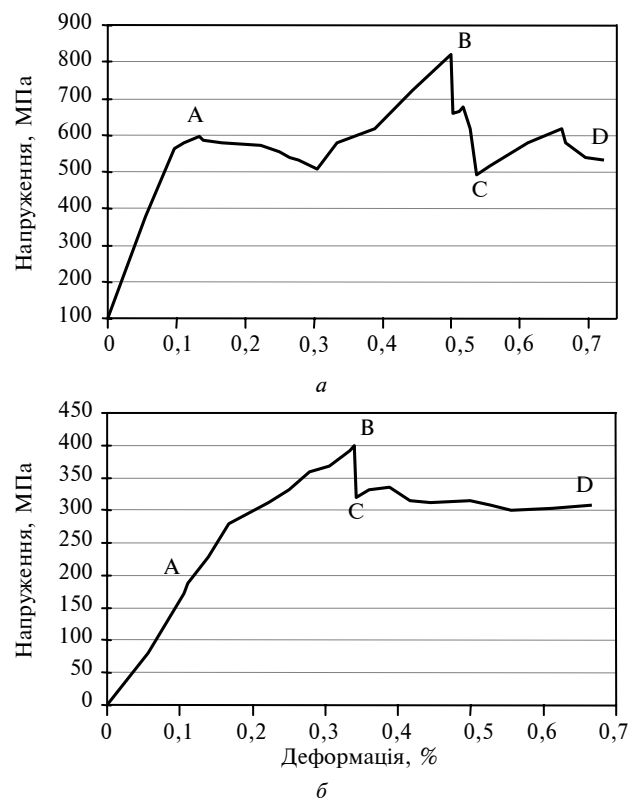


Рис. 2. Діаграми випробувань на згин зразків покриття з WC-Co на підкладці зі Ст.3: а – без обробки; б – після обробки в імпульсному магнітному полі

Оскільки при деформації системи покриття–підкладка в першу чергу відбувається пластична деформація сталеві підкладки, досягнутий на діаграмі в момент розтріскування покриття рівень напружень характеризує не міцність покриття, а зміцнення підкладки. Оцінювання напружень, які розвиваються в покритті, можна провести в припущенні жорсткого зв'язку між підкладкою та покриттям. У цьому випадку пластична деформація підкладки буде активувати пружну деформацію покриття, і в граничному випадку її величина буде збігатися з пластичною деформацією системи. Напруження в покритті в момент розтріскування мож-

на оцінити за величиною деформації, яка досягається в цей момент.

Приріст напруження в покритті за межами пружної області  $\sigma_n$  визначається із співвідношення

$$\sigma_n = E_n \cdot \varepsilon_{пл}, \quad (1)$$

де  $E_n$  – модуль пружності покриття,  $\varepsilon_{пл}$  – пластична деформація підкладки.

З урахуванням пружної деформації системи  $\sigma_{пр}$  отримуємо

$$\sigma_n = \sigma_{пр} + E_n \cdot \varepsilon_{пл}. \quad (2)$$

З проведених розрахунків можна зробити висновок, що в момент утворення тріщини в покритті пластична деформація у зразку ВК-15 без магнітної обробки становить  $\varepsilon_{пл} = 0,15\%$ , після неї  $\varepsilon_{пл} = 0,35\%$ . Для зразка  $Fe_3Al$  пластична деформація без магнітної обробки дорівнює  $0,06\%$ , а в зразках після обробки в імпульсному та постійному магнітних полях –  $0,09$  і  $0,2\%$  відповідно.

Підставляючи в рівняння (2) характерні для досліджуваних матеріалів значення модуля пружності: для ВК-15  $E \approx 300$  ГПа, для інтерметаліду  $Fe_3Al$   $E \approx 141$  ГПа, і враховуючи напруження початку пластичного плину системи  $\sigma_{пр}(VK-15) = 250$  МПа,  $\sigma_{пр}(Fe_3Al) = 150$  МПа, отримуємо напруження в момент руйнування покриття у зразку ВК-15 без магнітної обробки  $\sigma_n = 700$  МПа, після неї  $\sigma_n = 1300$  МПа. Для  $Fe_3Al$  без магнітної обробки  $\sigma_n \approx 214$  МПа, а в зразках після обробки в імпульсному та постійному магнітних полях –  $\sigma_n \approx 473$  МПа і  $\sigma_n \approx 582$  МПа відповідно. Отримані значення, з урахуванням наведеного механізму передачі деформації, можна розглядати як когезійну міцність покриття. Результати розрахунків свідчать про те, що її величина збільшується після магнітної обробки.

Відзначимо, що фізичне трактування виявленого ефекту залишається неоднозначним, оскільки магнітна обробка може або безпосередньо зміцнювати покриття, підвищуючи його міцність, або впливати на механізм поширення тріщини на міжфазовій межі та передачу деформації з матриці в покриття, змінюючи структурний стан в області міжфазової межі.

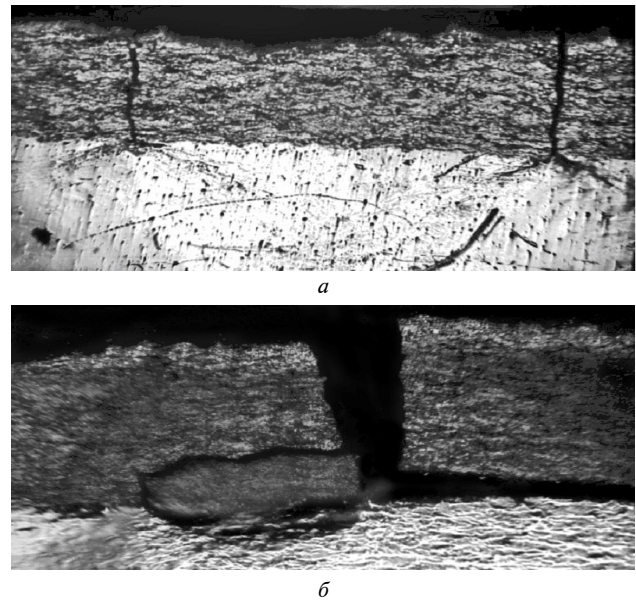


Рис. 3. Розповсюдження тріщини у покритті зі сплаву ВК-15 на підкладці зі сталі Ст.3: *a* – після магнітної обробки; *b* – без магнітної обробки

Результати аналізу процесу поширення тріщини в досліджуваних матеріалах свідчать про відмінність механізмів руйнування системи покриття–підкладка. Якщо в матеріалі, що піддавався магнітній обробці, руйнування покриття супроводжується розвитком пластичної деформації в тілі сталевій підкладки без будь-яких ознак деградації на межі покриття–підкладка (рис. 3, *a* і 4, *b*, *в*), то, у випадку необробленого матеріалу, руйнування покриття супроводжується яскраво вираженим відшару-

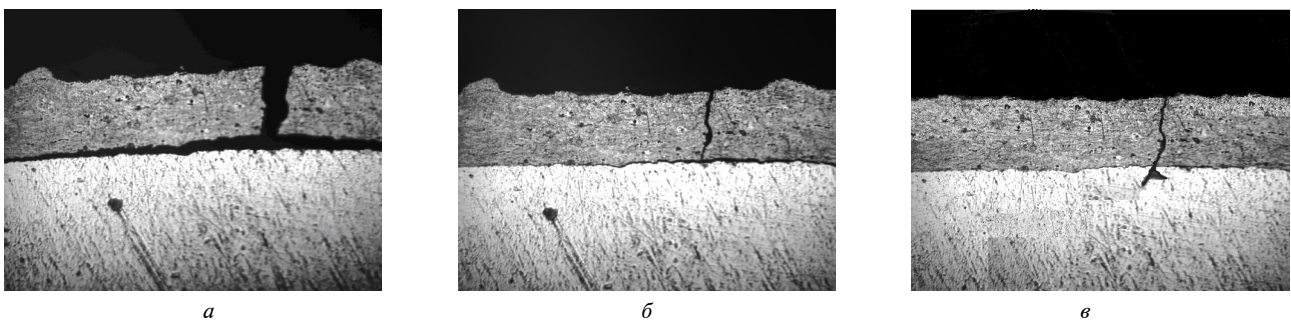


Рис. 4. Розповсюдження тріщини у покритті зі сплаву  $Fe_3Al$  на підкладці зі сталі Ст.3: *a* – без обробки; *b* – після обробки в імпульсному магнітному полі; *в* – після обробки в постійному магнітному полі

ванням міжфазової межі (рис. 3, б і 4, а). Виникнення макродефектів на межі розділу призводить до деградації механічних властивостей матеріалу в цілому.

Таким чином, у всіх досліджуваних у роботі випадках позитивний вплив магнітної обробки проявляється не стільки у зміцненні покриття, скільки у покращенні структури міжфазової межі.

### Висновки

Досліджено вплив магнітної обробки на механізм руйнування систем детонаційне покриття Fe<sub>3</sub>Al–підкладка Ст.3 та детонаційне покриття ВК-15–підкладка Ст.3 при випробуваннях на вигин. Встановлено, що обробка в маг-

нітному полі досліджуваних зразків підвищує їх механічні властивості більше, ніж у 2 рази. Виявлене підвищення властивостей зумовлене поліпшенням якості адгезії на межі покриття–підкладка в результаті перерозподілу елементів в області межі під час магнітної обробки.

Оскільки магнітна обробка дає можливість з мінімальними затратами істотно підвищити експлуатаційні характеристики напилених покриттів конструкційного та спеціального призначення, то проведення в подальшому досліджень за даною темою є перспективним. Зокрема, актуальним є питання впливу обробки покриттів у магнітному полі на міцність покриттів в умовах циклічних змін температур експлуатації.

1. *Bednarczyk I., Kuc D., Niewielski G.* The structure of FeAl and Fe<sub>3</sub>Al–5%Cr intermetallic phase-based alloys after hot deformation processes // Archives of Materials Science and Engineering. – 2008. – N 1. – P. 5–8.
2. *Thermally grown Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> on a H<sub>2</sub>-annealed Fe<sub>3</sub>Al alloy: Stress evolution and film adhesion / P.Y. Hou, A.P. Paulikas, B.W. Veal, J.L. Smialek // Acta Materialia. – 2007. – N 55. – P. 5601–5613.*
3. *Sikka V.K., Viswanathan S., McKamey C.G.* Development and commercialization status of Fe<sub>3</sub>Al-based alloys // Proc. of the 1st Int. Symposium on Structural Intermetallics, Sept. 26–30, 1993. – Pennsylvania, 1993. – P. 483–491.
4. *Wright R.N., Totemeier T.C.* Microstructure and Properties of Iron Aluminide Coatings // J. Therm. Spray Technol. – 1998. – P. 1–14. – <http://www.netl.doe.gov/publications/proceedings/02/materials/richard-wright.pdf>
5. *Morris D.G., Dadras M., Morris M.A.* The influence of chromium addition on order and ductility in FeAl intermetallic // J. De Physique IV. – 1993. – P. 429–434.
6. *Исследование влияния магнитного поля на остаточные напряжения в детонационных покрытиях NiAl-Re / Е.Н. Полярус, В.Е. Оликер, Т.Я. Гридасова и др. // Порошковая металлургия. – 2011. – № 9–10. – С. 121–127.*
7. *Взаимодействие блоховских стенок с дислокациями в слабых полях / Л.А. Чеботкевич, А.А. Урусовская, В.В. Ветер, А.Д. Ершов // ФТТ. – 1967. – 9, вып. 4. – С. 1093–1097.*
8. *Hayashi S., Takahashi S., Yamamoto M.* Magneto-Plastic Effect in Nickel and Nickel-Cobalt Alloy Single Crystals // J. Phys. Soc. – 1968. – 32, N 2. – P. 949–957.
9. *Xia J.* Thermal oxidation treatment of iron aluminide for improved tribological properties // Surface Engineering. – 2005. – N 1. – P. 6–12.
10. *Effect of alloying element on mechanical properties of Fe<sub>3</sub>Al and FeAl alloys / Guo Jianting, Sun Chao, Tan Minghui, Li Hui // Acta Metall Sin (Chinese EDN). – 2006. – N 1. – P. 20–25.*
11. *Головин Ю.И.* Магнитопластичность твердых тел // ФТТ. – 2004. – 46, вып. 5. – С. 769–803.
12. *Влияние магнитной обработки на микроструктуру и прочностные свойства детонационных покрытий WC-Co / В.Е. Оликер, Ю.Н. Подрезов, И.Т. Ярмагов и др. // Порошковая металлургия. – 2011. – № 2–3. – С. 16–23.*
13. *Исследование влияния магнитной обработки на микроструктуру и абразивную стойкость детонационных покрытий WC-Co / В.Е. Оликер, Т.Я. Гридасова, И.И. Тимофеева и др. // Там же. – № 9–10. – С. 19–24.*