

Дослідження та контроль розповсюдження тріщини в боридних покриттях

С.М. Чернега*, доктор технічних наук

Ю.М. Подрезов, доктор фізико-математичних наук

І.Т. Ярмагов, М.О. Красовський

*Національний технічний університет України «КПІ», Київ

Інститут проблем матеріалознавства ім. І.М. Францевича НАН України, Київ

Запропоновано методику випробування когезійної міцності та тріщиностійкості дифузійних боридних покриттів за допомогою контролю процесу розповсюдження тріщини в світловому мікроскопі з одночасним записом кривої навантаження.

Розробка нових типів покриттів і вибір оптимальних умов їх нанесення вимагають оновлення і вдосконалення методик їх тестування. Особливо це важливо для покриттів конструкційного призначення, стійкість роботи яких залежить від здатності чинити опір механічним навантаженням. Такі покриття характеризуються когезійною міцністю, що визначається в момент руйнування самого покриття, і адгезійною міцністю, яка визначається в момент відриву покриття від основи. Існує велика кількість методів тестування, описаних в статтях, монографіях [1 – 4] і регламентованих у відповідних стандартах. Проте, якщо питання визначення міцності покриттів розглянуті досить детально, то проблеми, пов'язані з процесами поширення тріщин в системі покриття – матриця, вимагають додаткового вивчення. В роботі [2] вперше було запропоновано методику випробування когезійної міцності та тріщиностійкості покриттів за допомогою дослідження процесу розповсюдження тріщини з використанням світлового мікроскопу з одночасним записом кривої навантаження. Можна використовувати зразки з малою тріщиною для визначення тріщиностійкості покриттів, товщина яких коливається в межах 200 – 400 мкм. Зразки для випробувань мають форму прямокутної балки розміром 2 x 3 x 22 мм. Важливим методичним моментом при визначенні когезійної міцності покриттів є завдання визначення напруження старту тріщини. Найпростіше цей параметр визначається по стрибку на діаграмі навантаження. Оскільки величина стрибка залежить від співвідношення між товщиною покриття $a_{\text{п}}$ і товщиною матриці $a_{\text{м}}$, для коректної реалізації потрібно, щоб товщина покриття була досить великою – $a_{\text{п}} > 0,1a_{\text{м}}$. Зазначимо, що діаграма із стрибком спостерігатиметься лише у випадку, коли адгезійна міцність покриття з матрицею досить мала, і після руйнування покриття висота зразка зменшиться. Якщо адгезійна міцність висока – момент розповсюдження тріщини призведе лише до зміни податливості системи “зразок – машина”. Це проявляється на діаграмі навантаження у вигляді зміни кута нахилу кривої “навантаження – деформація”. Ця зміна також залежить від співвідношення вище згаданої товщини ($a_{\text{п}}$ і $a_{\text{м}}$) і різко зменшується при малій товщині “живого” перетину – ділянки між вершиною тріщини границею розподілу “покриття – матриця” (ГРПМ). Враховуючи малі розміри тріщини і “живого” перетину покриття і досить високу адгезійну міцність детонаційних покриттів, при проведенні експериментів особлива увага приділялась до фіксації моменту старту тріщини і відповідного напруження у

цей момент. Для фіксації моменту старту тріщини використовували випробувальну машину з високою точністю запису діаграми “навантаження – прогин” (чутливість зміни прогину при випробуваннях на 3-точковий згин 0,3 мкм). Для визначення тріщиностійкості та міцності покриттів використано методики, запропоновані в роботі [2]. Схема визначення тріщиностійкості покриття при розповсюдженні тріщини в площині, перпендикулярній границі розподілу “покриття – матриця”, показана на рис. 1 а і в площині, яка співпадає з площиною ГРПМ – рис. 1 б. Очевидно, що в першому випадку будуть вивчатись когезійні властивості, в другому адгезійні.

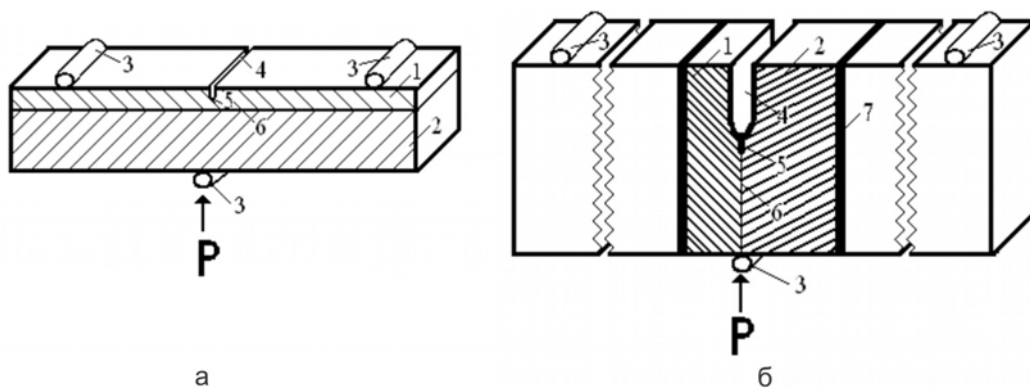
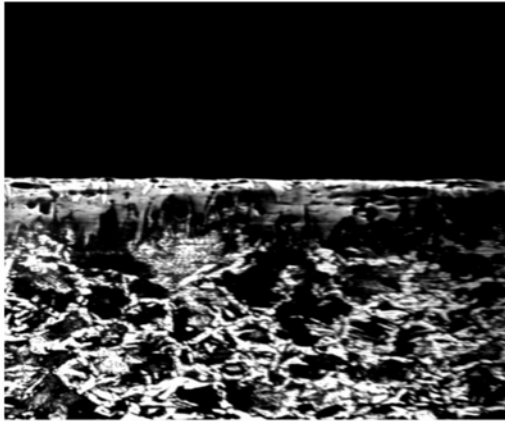


Рис. 1. Схема випробувань на тріщиностійкість зразків з покриттям. а – в площині, перпендикулярній ГРПМ, б – в площині, яка співпадає з площиною ГРПМ. 1 – покриття, 2 – матриця, 3 – ролики, 4 – механічний надріз, 5 – електроіскровий надріз, 6 – границя розподілу “покриття – матриця”, 7 – клейове з’єднання.

В якості об’єкту для досліджень було використано зразки сталі 45, на які шляхом хіміко-термічної обробки при температурі 1223 К в суміші порошоків на основі карбиду бору було отримано дифузійне покриття боридів заліза FeV та Fe_2V . Було виготовлено торцевий шліф (протравлений в 3 % спиртовому розчині азотної кислоти) та проведено металографічний аналіз за допомогою мікроскопу ЛОМО-МЕТАМ Р-1. Структура сталі 45 із боридним покриттям має голчасту будову і послідовно від поверхні складається із фаз FeV та Fe_2V , зерна останньої глибоко проростають в матрицю (рис. 2 а).

Результати металографічного аналізу свідчать про те, що товщина покриття складає 180 – 200 мкм. Границя розподілу матриці та покриття має нечіткий вигляд. Структура покриття складається з відносно щільної та однорідної верхньої частини та голкоподібних елементів структури, де між голками бориду Fe_2V спостерігаються ділянки твердого розчину бору в залізі із мікротвердістю 1,4 – 1,8 ГПа – у два рази більшою за мікротвердість матеріалу підкладки. Згідно з результатами попередніх досліджень боридне покриття має два шари: верхній – на основі сполуки FeV (мікротвердість 18,5 ГПа) та нижній – на основі Fe_2V (мікротвердість 14,5 ГПа). Як правило верхній шар більш твердий, але і більш крихкий. Цю інформацію отримують, як правило, з результатів випробувань на мікротвердість покриття. Дані прямих досліджень міцності, крихкості та тріщиностійкості цих покриттів практично відсутні. Тому наступним кроком в виконанні роботи було проведення механічних випробувань цих зразків.

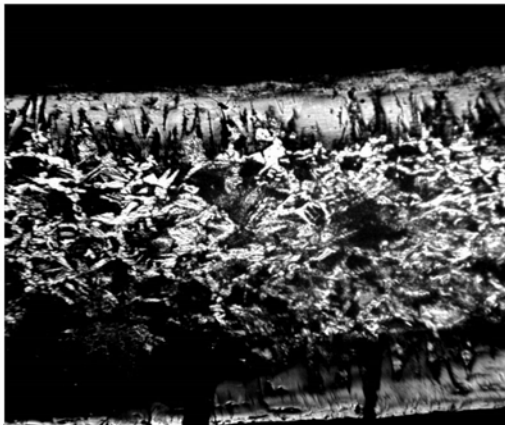
Зразок розміром $22 \times 4 \times 1,2$ мм було встановлено в захвати випробувальної машини для тестування на триточковий згин таким чином, щоб шліфувана поверхня зразка знаходилась навпроти оптичної вісі мікроскопу. Цей мікроскоп дозволяє переводити зображення на комп’ютер і аналізувати процес розповсюдження тріщини



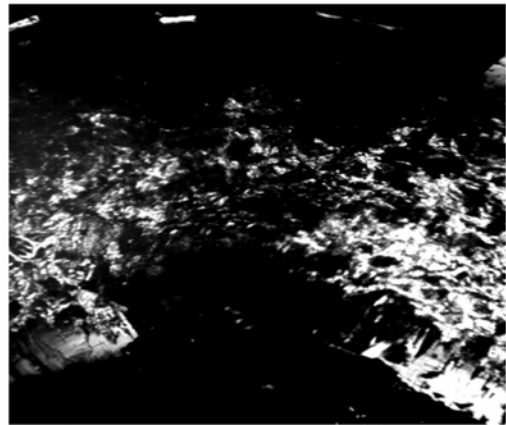
а



б



в



г

Рис. 2. Структура зразків сталі 45 з покриттям на основі боридів заліза FeB та Fe_2B в нормальному стані (а) та при навантаженнях 60 Н (б), 70 Н (в) та 90 Н (г). $\times 100$.

в реальному часі та співставляти момент руйнування покриття з відповідним напруженням, яке фіксується. Крім того такий випробувальний комплекс дозволяє спостерігати за еволюцією розповсюдження тріщини в покритті.

В роботі було проведено дослідження деформаційно-силових властивостей покриття в ході безперервного активного навантаження (за схемою триточкового згину) та одночасної покадрової фотозйомки.

При навантаженні зразка в пружній області ($P = 60$ Н, що відповідає напрузі 311 МПа) спостерігається розповсюдження тріщини від поверхні в глиб покриття (рис. 2 б). Руйнування його відбувається за крихким механізмом і тріщина практично миттєво перерізає все покриття і зупиняється за його межами в залізній матриці, збагаченій бором. При цьому тріщина пройшла крізь повздовжню витягнуту пору і далі перпендикулярно поверхні зразка – крізь сферичну пору.

При досягненні напруження $P = 70$ Н на кривій навантаження спостерігається ділянка зменшення зразка, що свідчить про пластичні релаксаційні процеси в матриці. Далі спостерігається довготривалий процес деформаційного зміцнення. Під час пластичної деформації відбувалося подальше розтріскування покриття шляхом розвитку існуючих та новоутворених тріщин (рис. 2 в). Спостерігається також утворення та розвиток пор безпосередньо в об'ємі матриці.

При докладанні зусилля $P = 90$ Н на діаграмі навантаження чітко спостерігається стадія остаточного руйнування. На рис. 2 г добре видно розповсюдження тріщини в залізну матрицю та наявність розшарування її на границі покриття – матриця.

На кінцевій стадії навантаження зразків відбувається подальше руйнування покриття шляхом збільшення відстані між блоками розтріскування. Продовжується також розповсюдження тріщин в матрицю та утворення пор по всьому об'єму матриці та поверхні покриття.

Таким чином показано, що руйнування покриття відбувається при напрузі 311 МПа, що відповідає моменту розповсюдження крихкої тріщини через всю поверхню покриття. На границі фаз FeB, Fe₂B не спостерігається особливостей розповсюдження руху тріщини, в той же час на стиснутих волокнах відбувається створення пор. При збільшенні деформації крихкі тріщини з покриття розповсюджуються в залізну матрицю. При цьому в цілому об'ємі зразка, включаючи покриття з обох сторін, та матриці йде процес утворення пор. Запропонована методика досліджень дозволяє вивчати особливості руйнування покриттів дифузійного типу FeB.

Література

1. Подрезов Ю.Н., Минаков Н.В. Особенности упрочнения сплавов технически чистого титана при одноосном растяжении и прокатке. // Электронная микроскопия и прочность материалов. – Киев: ИПМ, 1998. – С. 14 – 18.
2. Подрезов Ю.Н., Коржова Н.П., Ярмагов И.Т. Новая методика оценки механических свойств интерметаллидных покрытий // Наукові нотатки. – 2009. – № 26. – С. 45 – 55.
3. Чернега С.М. Кавітаційне зношування дифузійних легованих боридних покриттів на сталях // Металознавство та обробка металів. – 1998. – № 1–2. – С. 36 – 41.
4. Velikanova T.Ya., Bondar A.A., Artyukh L.V. Metallic Materials with High Structural Efficiency. – Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, Boston, London, 2004.

Одержано 12.01.10

С.М. Чернега, Ю.Н. Подрезов, И.Т. Ярмагов, Н.А. Красовский

Исследование и контроль распространения трещин в боридных покрытиях

Резюме

Предложена методика испытания когезийной прочности и трещиностойкости диффузионных боридных покрытий с помощью исследования процесса распространения трещины в оптическом микроскопе с одновременной записью кривой нагрузки.

S.M. Chernega, Y.N. Podrezov, I.T. Yarmatov, N.A. Krasovsky

Investigation and control of cracks propagation in boride coatings

Summary

The test procedure and fracture toughness of diffusion boride coatings by research of the process of crack propagation in an optical microscope with the simultaneous recording of the load curve is offered.