

УДК 621.785

С.М.Чернега, Ю.М.Подрезов, Д.М.Сидор

Національний технічний університет України «КПІ»

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

АДГЕЗІЙНА МІЦНІСТЬ ДИФУЗІЙНИХ ПОКРИТТІВ НА ОСНОВІ БОРИДІВ ЗАЛІЗА

Дослідженнями на триточковий згин визначена адгезійна міцність дифузійних легованих боридних покриттів. Показано, що адгезійна міцність боридних фаз залежить від типу легуючих елементів та товщини покриття.

Ключові слова: триточковий згин, адгезія, покриття, тріщина, боридні фази, міцність

Створення нових типів покриттів та вибір оптимальних умов їх нанесення вимагають постійного оновлення і вдосконалення методик тестування. Особливо це важливо для покриттів конструкційного призначення, стійкість роботи яких залежать від їх здатності опиратися механічним навантаженням. Такі покриття характеризуються адгезійною міцністю, що визначається в момент відриву покриття від основи. Існує велика кількість методів тестування, що описані в статтях, монографіях [1, 2] і регламентовані відповідними стандартами. Питання визначення міцності покриттів розглянуті достатньо детально, в той же час процеси розповсюдження тріщин в системі «покриття - матриця», вимагають додаткового вивчення.

Необхідність дослідження процесів тріщиноутворення та розповсюдження тріщини в покриттях обумовлена наступними міркуваннями. Значення міцності матеріалу відповідає енергії, що витрачається на розрив міжатомних зв'язків, і характеризує якість формування зв'язків при утворенні границі розподілу „покриття-матриця” або в самому покритті. При виконанні вимог стандартів механіки руйнування отримані значення міцності можуть бути використані не лише для порівняльної оцінки якості однотипних покриттів, але і для співставлення властивостей різномірних покриттів і навіть для порівняння покриттів з компактними матеріалами. В роботі запропонована оригінальна методика визначення міцності боридного покриття отриманого дифузійним методом, при розповсюдженні тріщини в площині, перпендикулярній границі розділу «покриття-матриця» (ГРПМ) (рис. 1а) і в площині, що співпадає з площиною ГРПМ (рис. 1,б). Зрозуміло, що в першому випадку будуть вивчатися когезійні властивості, в другому – адгезійні.

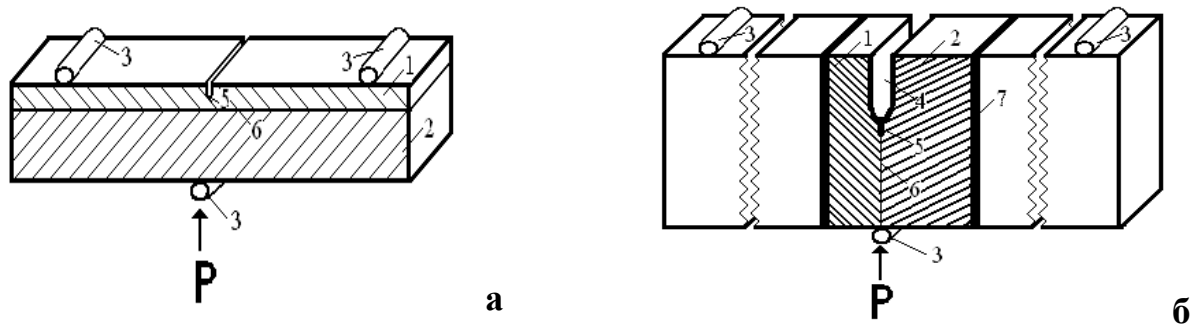


Рис. 1. Схема випробувань на тріщиностійкість зразка з покриттям: а – в площині, перпендикулярній ГРПМ; б – в площині, що співпадає з ГРПМ. 1 – покриття; 2 – матриця з ВТ-6, 3 – опірні ролик; 4 – механічний надріз; 5 – електроіскровий надріз; 6 – границя розділу «покриття - матриця»; 7 – клейове з'єднання.

Мета роботи полягала в дослідженні адгезійної та когезійної міцності та тріщиностійкості захисних боридних покриттів на сталях.

©С.М.Чернега, Ю.М.Подрезов, Д.М.Сидор

Матеріали та методика

Для дослідження використовували боридні покриття отримані дифузійним боруванням. Зразки матеріалу основи (сталі 20 та У8) розміщували в тиглі з нержавіючої сталі 10Х18Н9Т і засипали порошковою суміш на основі технічного карбиду бору з добавками легуючих елементів раціонального складу та фтор місткого активатора –фторопласту. Порошкову суміш відокремлювали від атмосфери печі азбестовою прокладкою. Герметизацію контейнерів проводили розробленим в роботі [5] порошковим способом без застосування плавких затворів.

Нагрівання тиглів і наступну ізотермічну витримку проводили в лабораторній печі типу СНОЛ - 1,6,2,5.1/11М. Процес дифузійного насичення проводили по раціональних режимах для кожної марки сталі в залежності від необхідної товщини покриття (50-200 мкм) при температурі 1223 К, тривалістю 2-4 години 9табл.10.

Таблиця 1

Склади порошкових сумішей для борування сталей

Склад порошкової насичуючої суміші, при 1%мас. фторопласту	Вміст у боридних фазах легуючого металу		
	Спектральний аналіз	Рентгено-спектральний аналіз, % мас.	
		FeB	Fe ₂ B
V ₄ C + Co	0.79	0.231	
V ₄ C + Mo	0.38	0.38	0,32
V ₄ C + W	0.4	0.4	0,36

Зразок розміром 22*4*1,2 мм. встановлюють в захвати випробувальної машини для тестування на триточковий згин таким чином, що шліфувана поверхня зразка знаходилась навпроти оптичної осі мікроскопа ЛОМО-МЕТАМ Р-1. Цей мікроскоп, в свою чергу, за допомогою ССД-камери переводить зображення на комп'ютер, що дозволяє аналізувати процес розповсюдження тріщини в реальному часі та співставити момент руйнування покриття з відповідною напругою, яка фіксується випробувальною машиною. Крім того такий випробувальний комплекс дозволяє спостерігати еволюцію розповсюдження тріщини в покритті.

Для визначення адгезійної міцності використовувались спеціальні захвати подовжувачі, які наклеювались з обох сторін зразка і в площину межі розподілу покриття – матриця вводився електроерозійний надріз глибиною 2 мм, після чого зразок випробувався на триточковий згин на універсальній випробувальній машині CERAM TEST.

Результати досліджень

При аналізі отриманих діаграм навантаження зразків з відповідними покриттями (Рис.2а) можна виділити три характерні стадії структурних змін, які відбуваються як в покритті так і в матриці (Рис.2б). На першій стадії відбувається навантаження системи зразків без видимих змін в структурі матеріалу. Друга стадія відповідає досить довготривалому нелінійному зміцненню зразка. При цьому на цій стадії починаються процеси утворення та розвитку радіальних когезійних тріщин в поверхневому шарі покриття. Згідно з отриманими результатами дослідження на цій стадії ми маємо можливість розрахувати границю міцності досліджених покриттів з використанням формули для розрахунку на триточковий згин (1)

$$\sigma = \frac{3PL}{2bh^2} \quad (1)$$

де, σ – напруга; P – навантаження; L - відстань між опорами;
 h – висота зразка; b – ширина зразка

Зусилля P визначалось за моментом першої появи тріщини на відеокадрі.

На третій стадії відбувається розвиток системи тріщин, які супроводжуються розміщенням системи покриття – матриця. Розрахунки механічних властивостей покриттів показали, що найбільшу міцність має зразок з найменшою товщиною покриття складу Fe – В – W (281 МПа). Покриття складу Fe – В – Со становить 190 МПа, а покриття складу Fe – В – Мо – 239 МПа (Таблиця 2).

Таблиця 2.

Результати розрахунку когезійної міцності покриттів

№	Покриття	P, Н	a, мм	b, мм	σ , МПа
1	Fe – В - Мо	63	1,04	5,85	239
2	Fe – В - Со	87	1,4	5,61	190
3	Fe – В - W	50	0,88	5,51	281

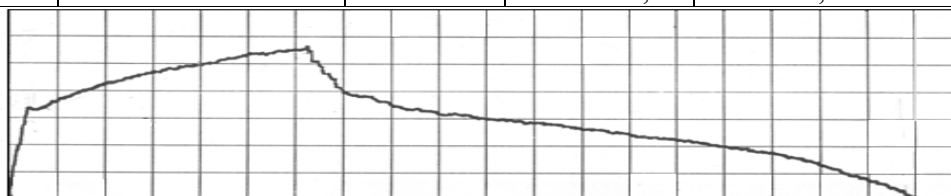


Рис.2. Діаграма навантаження зразка з покриттям системи Fe–В–Со на сталі 20 (1,2,3-різні стадії деформації)

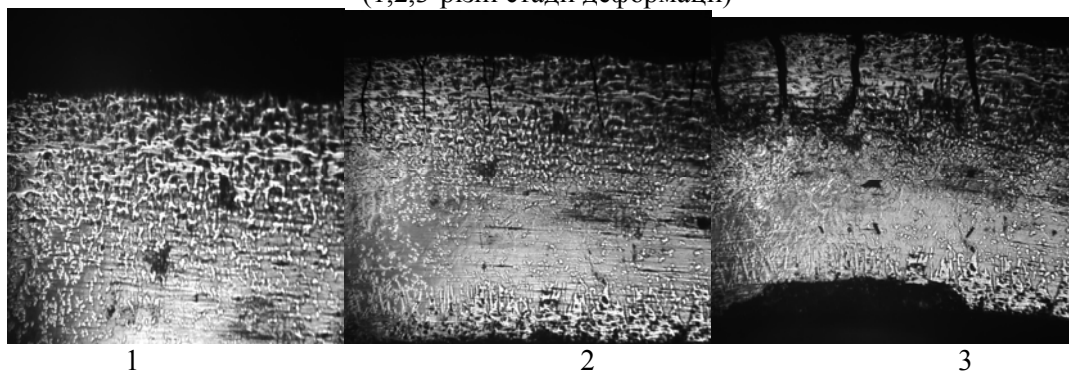


Рис.2. Мікроструктури покриття системи Fe–В–Со на сталі 20 (а); що відповідають різним стадіям деформації (1,2,3)

З наведеної таблиці (табл.3) видно, що адгезійна міцність покриттів отриманих ХТО виявилась малою: для покриття з W сягає 13 МПа, для покриття з Со – 29,2 МПа, для покриття з Мо - 41,1 МПа. Міцність клейового з'єднання 120 МПа. Такі низькі значення адгезійної міцності можна пояснити наявністю в боридному покритті крихкого при поверхневого шару з великим вмістом бору.

Таблиця 3.

Напруга та геометричні розміри зразків

Зразок	P, Н	b, мм	h, мм	L, мм	σ , МПа
Клейове з'єднання	260,405	2,95	5,06	60	120
В-W	20,65	2,93	5,08	60	13
В-Со	43,3	2,95	5,01	60	29,2
В-Мо	60,2	2,95	5,05	60	41,1

Фрактографічні дослідження показали змішаний характер руйнування: поверхневі шари руйнуються переважно за крихким механізмом, більш глибокі шари демонструють ямковий характер руйнування. В крихких приповерхневих шарах спостерігається тріщини розшарування в паралельній площині розподілу покриття – матриця.

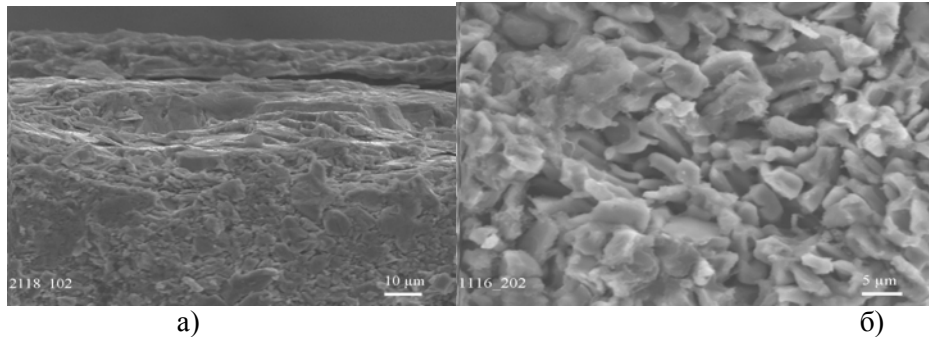


Рис. 3 Фрактографія боридного шару; а) площина когезії; б) площина адгезії

Дослідження розповсюдження тріщин в площині межі розподілу покриття –матриця дозволяє визначити найбільш слабкий шар, який демонструє найменшу енергію руйнування (рис 3а).

Результати вимірювання тріщиностійкості в площині адгезії показали, що найбільш слабким шаром є шар FeB. Значення тріщиностійкості складало $0,5 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2}$, зазначимо, що така тріщиностійкість достатньо мало, навіть як для кераміки (значення тріщиностійкості конструкційної кераміки $3 - 10 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2}$). Дані фрактографічного аналізу поверхні адгезійного руйнування наведені на рис. 3б. Поверхня розповсюдження тріщини виявляє наявність дрібних структурних елементів бориду заліза, яка складає $2 - 5 \text{ мкм}$. Тріщина розповсюджується переважно по границі розподілу між цими структурними елементами.

Висновки

1. Результати дослідження механічних властивостей дифузійних боридних покриттів легованих Mo, Co, W показали, що найбільшу міцність має зразок з найменшою товщиною покриття складу (Fe, W)B і становить 281 МПа, покриття складу (Fe, Co)B – 190 МПа та покриття складу (Fe, Mo)B – 239 МПа.
2. Досліджена топографія поверхні поперечного зламу боридних шарів, відповідно легованих Mo, Co, W. Встановлено, що поверхня зламу досліджених шарів по товщині перерізу покриття має градієнтну структуру, яка характеризується зміною механізму руйнування по глибині зразка, пов'язаною з двофазною будовою боридних шарів.
3. Аналіз характеру руйнувань боридних шарів після механічних випробувань на триточковий згин свідчить про те, що руйнування відбувається за крихким механізмом. Крихкий механізм руйнування обумовлений швидким розвитком крихкої тріщини, що спостерігався в експерименті *in situ*. Когезійна міцність досліджених шарів знаходиться на рівні 180 – 200 МПа, це пов'язано з пористістю приповерхневого дифузійного шару FeB.
4. Випробування на триточковий згин показало, що міцність клейового з'єднання становить 120 МПа, таким чином розроблена нами методика може бути використана для тих покриттів в яких напруження адгезії (при випробуванні зразків без тріщини) менша за 120 МПа або при випробуванні на тріщиностійкість у випадку коли навантаження менше 150 Н. Також обмеженням при випробуванні на тріщиностійкість є наявність малої адгезії коли напруження на зразок з тріщиною менше ніж 20 Н, через руйнування зразка на стадії нанесення механічного надрізу.
5. За результатами випробування досліджуваних зразків на триточковий згин, була визначена адгезійна міцність кожного з покриттів. Адгезійна міцність для покриття з W становить 13 МПа, для покриття з Co – 29,2 МПа, для покриття з Mo - 41,1 МПа., та величиною і розподілом залишкових напружень в боридних шарах.

1. Ю. Н. Подрезов, Н. В. Минаков Особенности упрочнения сплавов технически чистого титана при одноосном растяжении и прокатке. Электронная микроскопия и прочность материалов. Киев: ИПМ, 1998.
2. Борирование стали. Ворошнин Л. Г., Ляхович Л. С. М., «Металлургия», 1978, 240 с.
3. Спосіб герметизації контейнерів при ХТО металевих виробів /Чернега С.М., Лоскутов В.Ф., ЛоскутоваТ.В., Єгорова О.М., Дяченко О.А. //Деклараційний патент на винахід № 54844 А. - 17.03.2003. Бюл. №3
4. Чернега С.М. Комплексное насыщение углеродистых сталей бором и хромом в активированной среде // Изв.ВУЗов. Черная металлургия.-1999.- №11.- С.58-60.
5. Чернега С.М. Влияние коррозии на кавитационный износ диффузионных покрытий // Изв.ВУЗов. Черная металлургия.- 2000.- №5.- С.31-36.
6. Чернега С.М. Кавитационное разрушение диффузионных легированных боридных покрытий на сталях // Изв.ВУЗов. Черная металлургия.- 2000.- №7.- С.50-54.