

**Акопян В.В.,
Коновал В.П.,
Яковлева М.С.,
Гальцов К.Н.,
Бондаренко А.А.**

Институт проблем материаловедения
им. И. Н. Францевича НАН Украины,
г. Киев, Украина
E-mail: akopian@ukr.net

СТОЙКОСТЬ К АБРАЗИВНОМУ ИЗНАШИВАНИЮ ДЕТОНАЦИОННЫХ ПОКРЫТИЙ ИЗ КОМПОЗИЦИОННЫХ ПОРОШКОВ СИСТЕМЫ TiB₂-(Fe-Mo)

УДК 621.762:621.793.79

Методом детонационного напыления на стальных образцах получены покрытия из композиционных материалов системы TiB₂-(Fe-Mo). Исследована стойкость покрытий в условиях абразивного изнашивания. Исследовано влияние соотношения тугоплавкой составляющей (TiB₂) и металлической связки (Fe-Mo) в композиционных порошках на стойкость покрытий в условиях абразивного изнашивания, а также определены оптимальные составы покрытий для данных условий работы.

Ключевые слова: детонационные покрытия, композиционные порошки, диборид титана, металлическая связка, абразивный износ.

Вступление

Свойства рабочих поверхностей деталей и конструктивных элементов машин являются определяющими факторами их эксплуатационной надежности и долговечности. Увеличение срока эксплуатации деталей машин можно обеспечить подбором материала детали или создания на поверхности этих деталей покрытий, которые защищают их от изнашивания, высокотемпературного действия, агрессивных сред и т.д.

Наличие защитных покрытий дает возможность реализовать функциональный подход к созданию конструкционных материалов. Механическая прочность детали обеспечивается за счет материала основы, а сопротивление действию внешних факторов достигается локальным формированием на поверхности покрытий из другого материала [1].

Настоящая работа является развитием исследований, посвященных созданию новых композиционных материалов и покрытий из них системы TiB₂-(Fe-Mo). Ранее было показано, что в системе TiB₂-(Fe-Mo) помимо основных упрочняющих включений TiB₂ (с твердостью 31 - 33 ГПа) в металлической связке (с твердостью 3 - 4 ГПа) образуются соединения сложного борида (с твердостью 20 - 22 ГПа), а также интерметаллические фазы (7 - 10 ГПа), которые дополнительно повышают твердость композиционного материала [2].

Целью работы является оценка относительной износостойкости детонационных покрытий из композиционных порошков системы TiB₂-(Fe-Mo) с различным содержанием металлической связки 20, 40, 60, 80 масс. % (ТБФМ-20, ТБФМ-40, ТБФМ-60, ТБФМ-80 соответственно) в условиях абразивного износа.

Среди разнообразных способов создания защитных покрытий значительный интерес вызывает метод детонационного напыления. К достоинствам этого метода следует отнести возможность формирования покрытий с высокой плотностью и адгезией, что во многих случаях является необходимым условием их успешной работы в абразивной среде.

Процесс абразивного изнашивания материала можно рассматривать как действие твердых частиц на поверхность детали, с которой они контактирует (процесс трения частицы по поверхности детали). В некоторых случаях частицы могут скользить по поверхности контакта, вызывая ее пластическую деформацию, или проникать в поверхность материала и перемещаться вместе с ней, срезая при этом микрообъемы материала. Интенсивность абразивного износа зависит от твердости, размеров и формы абразивных частиц.

Методика и объекты эксперимента

Для получения композиционного порошка исследуемого состава шихту из исходных порошков диборида титана, железа и молибдена смешивали в определенных пропорциях (табл. 1) в планетарной мельнице в течение трех часов в среде ацетона. После этого полученный порошок прессовали, а затем спекали при 1450 - 1500 °С в вакуумной печи СВШ. Спеки дробили и просеивали через сито для получения порошков с размером частиц -63 + 40 мкм.

Напыление покрытий осуществляли с помощью детонационно-газовой установки «Днепр - 5 МА», которая разработана в ИПМ НАНУ. В качестве рабочих газов использовали ацетилен, кислород и воздух [3].

Соотношение компонентов в шихте для получения композиционного порошка ТБФМ

Материал	Соотношение компонентов в шихте мас.%		
	Fe	Mo	TiB ₂
ТБФМ-80	80		20
	69,6	10,4	
ТБФМ-60	60		40
	52,2	7,8	
ТБФМ-40	40		60
	34,8	5,2	
ТБФМ-20	20		80
	17,4	2,6	

Покрyтия наносили на стальные (Ст. 3) пластинки, и образцы для ускоренных испытаний на стойкость к абразивному изнашиванию. Для увеличения адгезии покрyтия к подложке поверхность образцов предварительно подвергли струйно - абразивной обработке. Микротвердость покрyтия определяли на приборе ПМТ-3 путем вдавливания алмазной пирамиды в полированную поверхность шлифа при нагрузке 0,5 Н.

Структуру порошков и покрyтий исследовали на микроскопе МИМ-8, электронном микроскопе РЕМ-106.

Исследование свойств поверхности методом склерометрии проводили на приборе «МИКРОН-гамма» алмазным индентором Виккерса с углом при вершине 136° при режимах: нагрузка на инденторе – 240 г; длина царапания – 1 мм; скорость царапания – 5 мм/мин.

Изучая полученный трек царапины под микроскопом, определяли среднюю ширину (B , мкм.) дорожки разрушения покрyтия.

Для сравнения полученных результатов рационально оперировать массой удаленного материала при прохождении индентора. Массу удаленного материала находим по формуле [1].

$$M_i = V_i \cdot \rho_i = S_i \cdot L \cdot \rho_i, \quad (1)$$

где V – объем удаленного материала;

ρ – плотность материала;

$S_i = B^2_i \div 2,47$ – приведенная площадь удаленного материала для индентора с углом при вершине 136° (B – ширина трека);

L – длина трека ($L = 1$ мм) (рис. 1).

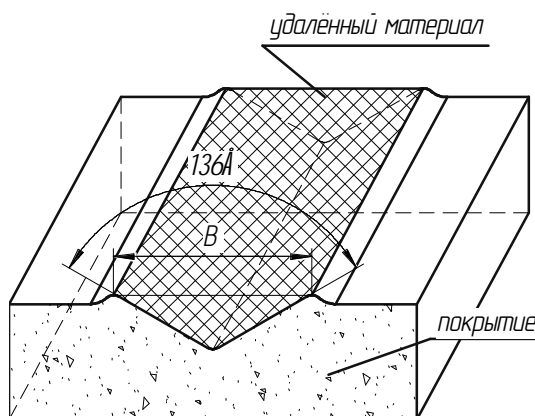


Рис. 1 – Схема поперечного сечения царапины:
 B – ширина следа

Также были смоделированы натурные испытания по схеме, представленной на рис. 2. В качестве абразивной среды использовали порошок карбида кремния размером 0,5 - 1 мм. Механизм износа материала зависит от соотношения твердостей абразива (H_{ab}) и испытуемого материала (H_m). Средняя твердость покрyтий ТБФМ 10 - 20 ГПа. В нашем случае карбид кремния имеет твердость 32,4 - 35,3 ГПа. При $H_{ab}/H_m > 1,3 - 1,4$, изнашивание происходит по механизму микрорезания. Выбор данного метода изнашивания обусловлен тем, что он является наиболее характерным для деталей машин и механизмов, работающих в условиях абразивной среды.

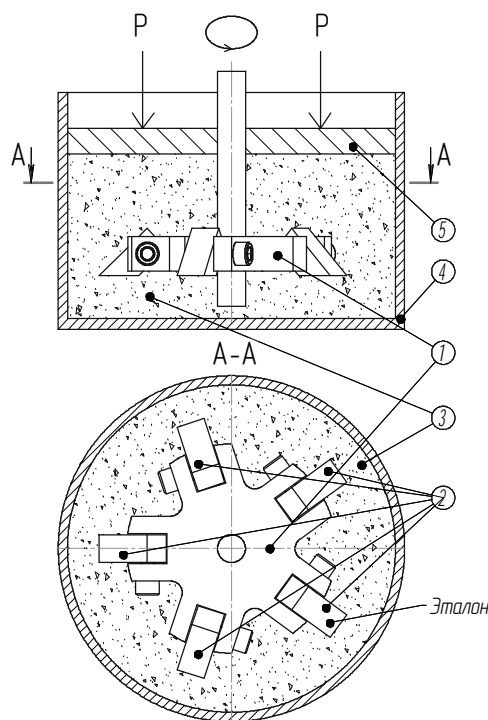


Рис. 2. Схема натурных испытаний на абразивный износ:
 1 – державка в сборе; 2 – образцы; 3 – абразивная среда;
 4 – корпус; 5 – контрнагрузка

Установка для испытаний состоит из державки, помещенной в корпус с абразивным материалом (карбид кремния). Ось, на которую вращение передается от привода (фрезерный станок) на державку, проходит через центр корпуса и контрнагрузки. Контрнагрузка создает противодействие в абразивной среде. Одновременно на установке испытывались 4 образца с покрытием ТБФМ и эталон из стали 65Г при следующих режимах: контрнагрузка -5 кг; скорость вращения -125 об/мин; пройденный путь -283 км; время испытания -120 часов.

Результаты эксперимента и их обсуждение

По режимам, приведенным в работе [3] были получены покрытия толщиной от 350 до 600 мкм с высокой плотностью. Как правило, толщины слоя композиционного покрытия более 100 мкм, уже достаточно, чтобы существенно замедлить процесс абразивного износа.

Детонационные покрытия из порошков ТБФМ представляют собой гетерофазный материал с достаточно равномерным распределением фаз. Фазовый состав материала покрытия наследует фазовый состав компактного материала ТБФМ [2]. Граница "покрытие - основа" ровная, без видимых дефектов. Визуально количество пор незначительное.

Анализ структур детонационных покрытий с различным содержанием металлической связки позволяет сделать вывод о том, что с уменьшением содержания металлической связки с 80 до 20 % структура детонационных покрытий переходит от дисперсно-упрочненного материала до металлокерамики, характеризуется уменьшением количества ламелей. Следует отметить, что покрытие ТБФМ-20 характеризуется низкой адгезией (25 МПа) в сравнении с другими материалами ТБФМ (80 - 125 МПа), что, вероятно, обусловлено недостаточным количеством металлической связки.

Для анализа стойкости к абразивному изнашиванию детонационных покрытий из разработанных материалов были проведены склерометрические исследования покрытия, так как принято считать, что прохождение индентора по поверхности покрытия имитирует поведение абразивной частицы при работе покрытия в абразивной среде. После испытания ширина следа от индентора на покрытие характеризуется наличием зоны потери материала покрытия (царапина) (рис. 1).

Изучая полученный трек царапины под микроскопом, определяли среднюю ширину (В, мкм.) дорожки разрушения покрытия. Результаты испытаний различных вариантов покрытий системы TiB₂-(Fe-Mo) с различным содержанием металлической связки приведены в табл. 2 и на рис. 3.

Для сравнения полученных результатов рационально оперировать массой удаленного материала при прохождении индентора (микрорезанье), так как именно этот механизм износа реализуется при абразивном изнашивании поверхности покрытия. Массу удаленного материала находим по формуле [1].

Результаты склерометрических исследований покрытий ТБФМ

Материал	Плотность покрытия ρ , г/см ³	Ширина трека B , мкм	Масса удалённого материала $M \cdot 10^{-4}$, мг	M_s / M_i
ТБФМ-80	7,01	27	20,7	3,08
ТБФМ-60	6,5	22,5	13,3	4,8
ТБФМ-40	5,5	17	6,4	9,9
ТБФМ-20	5,0	47	44	1,45
Эталон	7,82	45	63,8	1

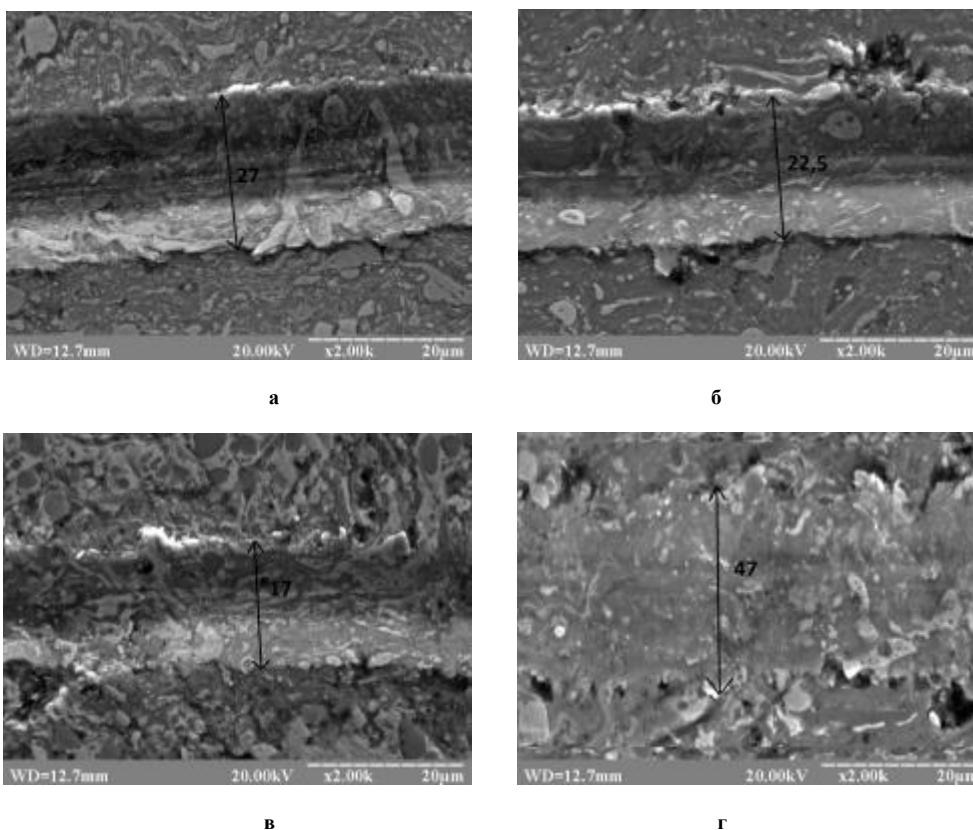


Рис. 3 – Микроструктуры покрытий после склерометрических исследований:
а – ТБФМ-80; б – ТБФМ-60; в – ТБФМ-40; г – ЯФМ-20

Были проведены смоделированные натурные испытания на стойкость к абразивному изнашиванию. Испытания проводились на установке, схема которой показанная на рис. 3. В качестве абразивной среды использовали порошок карбида кремния размером 0,5 - 1 мм.

Испытания с регистрацией времени и массы начинались после притирки образцов. В представленном эксперименте износ происходит за счет вращения образцов в среде абразивных частиц.

Износ определялся по потере массы, поскольку с помощью измерения массы можно более точно характеризовать изменения образцов после трения, чем посредством определения изменения линейных размеров. Результаты об относительном износе материала покрытия к эталону представлены табл. 3.

Результаты испытаний на стойкость к абразивному изнашиванию покрытий ТБФМ

Материал	Масса удалённого материала M , мг	M_s / M_i
ТБФМ-80	13,1	2,80
ТБФМ-60	8,45	4,34
ТБФМ-40	3,85	9,53
ТБФМ-20	25,75	1,43
Эталон	36,7	1

Полученные экспериментальные данные (рис. 4) приведены в относительных единицах (износ эталона к износу покрытия). Как видно из (рис. 4), разница результатов при склерометрическом методе и испытаний в абразивной среде незначительная. Отличия результатов находятся в пределах 3 - 8 %, что указывает на возможность замены длительных испытаний в абразивной среде (близких к натурным условиям работы деталей машин и механизмов) на ускоренные склерометрические исследования.

В работе исследовали влияние количества металлической связки на износостойкость полученных покрытий в условиях абразивного изнашивания. Анализируя результаты (рис. 4), видно, что относительная износостойкость покрытий увеличивается в ряду ТБФМ-20*→ТБФМ-80→ТБФМ-60→ТБФМ-40. Износостойкость увеличивается с уменьшением количества металлической связки, а также с увеличением твердости покрытия. Исключением является покрытие из композиционного порошка ТБФМ-20, в котором ожидаемое повышение относительной износостойкости для покрытия с минимальным содержанием металлической связки не произошло, так как сплошность покрытия нарушилась после 90 часов испытания, что указывает на низкую адгезию и когезию покрытия. Вероятно, это связано с тем, что в структуре покрытия уже недостаточно металлической связки что, в свою очередь, приводит к хрупкости покрытия и интенсивному выкрашиванию отдельных зерен боридов при соударении с абразивными частицами.

Детонационное покрытие ТБФМ-40 имеет наименьшие значения износа. С одной стороны, покрытие ТБФМ-40 содержит значительное количество твердых зерен боридов, а с другой стороны - количества металлической фазы достаточно для того, чтобы удерживать зерна тугоплавкой фазы в структуре покрытия.

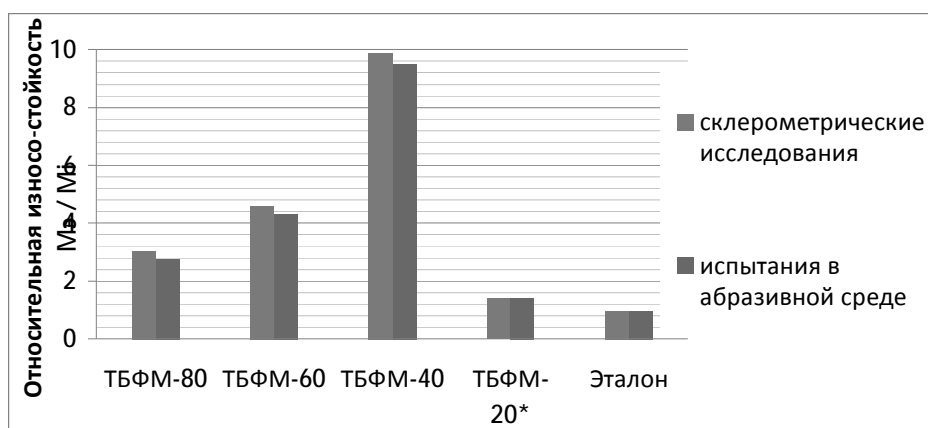


Рис. 4 – Относительная износостойкость покрытий ТБФМ по отношению к образцу эталона (сталь 65Г) (ТБФМ-20* – время испытания 90 часов)

Выводы

В результате исследований по относительной стойкости к абразивному изнашиванию покрытий из композиционных порошков системы $TiB_2-(Fe-Mo)$ установлено, что износостойкость покрытий увеличивается в ряду ТБФМ-20*→ТБФМ-80→ТБФМ-60→ТБФМ-40. Покрытие из композиционного порошка ТБФМ-20 характеризуется максимальным уровнем износа, так как после 90 часов испытания нарушилась сплошность покрытия, что может быть связано с низкой когезией и адгезией покрытия.

Можно рекомендовать замену длительных с моделированных испытаний в абразивной среде на ускоренные склерометрические испытания, поскольку разница результатов находится в пределах 3-8 %.

Детонационное покрытие ТБФМ-40 является перспективным для упрочнения деталей машин и механизмов, работающих в условиях абразивного изнашивания.

Литература

1. Борисов Ю.С. – Газотермические покрытия из порошковых материалов / Ю.С. Борисов, Ю.А. Харламов, С.Л. Сидоренко, Е.Н. Ардртовская. – К.: Наукова думка. – 1987. – 550 с.
2. Уманский А.П. Формирование структурно-фазового состава композиционных материалов на основе дигборида титана с железо молибденовой связкой / А. П. Уманский, В. В. Акоюн, М.С. Стороженко, И.С. Марценюк // Труды III -й международной Самсоновской конференции «Материаловедение тугоплавких соединений». – К. – 2012. – С.25.
3. Уманский А. П. Структура и свойства детонационных покрытий из композиционных порошков системы $TiB_2-(Fe-Mo)$ / А. П. Уманский, В. В. Акоюн, М.С. Стороженко и др. // Міжвузівський збірник "НАУКОВІ НОТАТКИ", Луцьк. – 2013. – № 41. – С. 247-253.

Поступила в редакцію 24.02.2014

Akopian V.V., Konoval V.P., Yakovleva M.S., Gal'tsov K.N., Bondarenko A. A. Wear-resistance under abrasive conditions of detonation coatings of TiB₂-(Fe-Mo) composite powders.

The detonation method is used to deposit TiB₂-(Fe-Mo) composite coatings on steel 3 specimens. The mechanical and tribotechnical properties of these coatings are studied in comparison with steel 65G etalon. The abrasive wear of coatings is investigated. The influence of the ratio of refractory component (TiB₂) and metal binder (Fe-Mo) in the composite powder on resistance to abrasive wear are studied. It is established that coatings of TiB₂-40 wt.% (Fe-Mo) composite have greater wear resistance. The coatings of TiB₂-40 wt.% (Fe-Mo) composite have a good adhesion and cohesion strength (up to 125 MPa). The development coatings are prospective for parts of abrasive wear.

Key words: detonation coatings, composite powders, titanium diboride, metal binder, abrasive wear.

References

1. Borisov Yu.S., Kharlamov Yu.A., Sydorenko S.L., Ardrtovskaia E.N. Gazotermicheskie pokrytia iz poroshkovykh materialov, Kiev "Naukova dumka", 1987, 550 s.
2. Umanskiy A.P., Akopian V.V., Storozhenko M.S., Martsenuk I.S. Formirovanie strukturno-fazovogo sostava kompozitsionnykh materialov na osnove diborida-titana s zhelezo-molibdenovoi svyazkoy, Trudy III mezhdunarodnoy Samsonovskoy konferentsii "Materialovedenie tugoplavkih soedineniy", Kiev, 2012, S.25.
3. Umanskiy A.P., Akopian V.V., Storozhenko M.S. et.al. Struktura i svoystva detonatsionnykh pokrytiy iz kompozitsionnykh poroshkov sistemy TiB₂-(Fe-Mo), Mizhvuzivskiy zbirnyk "Naukovi notatky", Lutsk, 2013, No41, S. 247 -253.