

УДК 621.78

**А.Н. Михайлов**, д-р техн. наук, проф., **А.М. Петров**,  
**В.В. Головятинская**, **М.Г. Петров**Донецкий национальный технический университет, Украина  
Филиал кафедры ТМ Донецкого национального технического университета, Украина  
Днепропетровский государственный аграрный университет, Украина  
Тел./Факс: +38 (062) 3050104; E-mail: tm@mech.dgtu.donetsk.ua

## ИССЛЕДОВАНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ ФУНКЦИОНАЛЬНО-ОРИЕНТИРОВАННЫХ ДЕТОНАЦИОННО-ГАЗОВЫХ ПОКРЫТИЙ

*Установлена принципиальная возможность повышения износостойкости пары трения за счет создания на поверхности деталей детонационно-газовым напылением функционально-ориентированных покрытий, состоящих из последовательно чередующихся слоев износостойкого и антифрикционного материалов. Показано, что износостойкость пары трения с функционально-ориентированным покрытием зависит от соотношения площадей покрытий из антифрикционного и износостойкого материалов и их пространственной ориентации.*

**Ключевые слова:** детонационно-газовое напыление, свойства, износ, поверхность, твердый сплав, полиамид.

### Введение

Детонационно-газовое нанесение покрытий (ДГНП) – прогрессивная технология упрочнения и восстановления деталей [1, 2]. Физико-механические и эксплуатационные свойства детонационно-газовых покрытий, например, плотность, прочность, термостойкость, износостойкость при различных условиях трения и эрозии, сопротивление ударным нагрузкам, превышают соответствующие показатели покрытий, полученных другими способами газотермического нанесения покрытий, например, плазменным нанесением покрытий [3, 4].

Многие изнашиваемые детали нефтегазодобывающего, химического, металлургического оборудования, авиационной, судостроительной и другой техники, работают не только при высоких уровнях нагрузок, но и в конкретной совокупности эксплуатационных воздействий. При нанесении газотермических покрытий для обеспечения необходимых эксплуатационных характеристик таких деталей, сочетания и оптимизации различных свойств покрытий (прочность сцепления, износостойкость, коррозионная стойкость и т.д.), одним из эффективных технологических приемов является использование многослойных покрытий [5]. К многослойным газотермическим покрытиям относятся градиентные покрытия, в которых каждый промежуточный слой содержит несколько компонентов с градиентом концентрации, направленным от основы к внешнему слою, например, обеспечивающие плавное изменение химического состава, структуры и свойств (физических, механических и др.) по толщине покрытия. Технические характеристики и работоспособность многослойных покрытий при аналогичных условиях воздействия различных нагрузок и сред значительно выше, чем у однородных покрытий [6, 7].

Задачами выполненных исследований являются:

- анализ материаловедческих способов повышения износостойкости деталей;
- изучение функционально-ориентированных технологических приемов нанесения покрытий при использовании технологии ДГНП.

Цель данной работы – исследование свойств фрикционного детонационно-газового покрытия, состоящих из чередующихся слоев износостойкого и антифрикционного материалов на поверхности детали (образца).

### Основное содержание и результаты работы

Известно, что высокой износостойкостью обладают композиционные материалы с гетерогенной структурой, состоящей из твердых износостойких зерен, равномерно распределенных в упругопластичной металлической матрице [3, 8]. При нагружении гетерогенного материала нагрузка, действующая на пару трения, равномерно распределяется по твердым включениям, а в упругопластичной матрице происходит релаксация напряжений. Твердые включения являются барьерами для движущих дислокаций, что резко снижает скорость пластической деформации. Это приводит к снижению интенсивности схватывания при образовании контакта пар трения.

Высокими износостойкими свойствами обладают также композиционные волокнистые материалы, состоящие из матрицы армированной волокнами. Получают волокнистые композиционные материалы различными методами – литьем, сваркой, прессованием, намоткой, наплавкой, напылением [3, 9]. Особенность волокнистой композиционной структуры заключается в равномерном распределении, с повторяющейся геометрией, высокопрочных и высокомодульных волокон в пластической матрице. В волокнистых композициях механизм торможения роста трещин, имеющий место в традиционных сплавах, дополняется торможением роста трещин самими волокнами на поверхности материала матрицы с армирующими элементами.

Импульсный характер процесса ДГНП и возможность управления составляющими параметрами единичных циклов (вариабельность процесса) в процессе напыления порошкового материала позволяет формировать ориентировано расположенные участки покрытия с различными трибологическими и физико-механическими свойствами, в том числе, с помощью использования экранов [10]. Экран располагается в зоне истечения частиц порошкового материала с продуктами детонации между открытым торцом ствола установки и напыляемой деталью. Исполнение экранов согласовывается с формой поверхности детали – цилиндрическая, коническая, плоская и т. д.

То есть, технологические особенности ДГНП при нанесении на поверхность изделия детонационного покрытия позволяют использовать принципы функционально-ориентированного подхода при решении практических технологических задач. Например, на основе нанесения на поверхность детали чередующихся пространственно-ориентированных слоев из материалов с различными физико-механическими свойствами, возможно согласование свойств поверхности детали и особенностей ее контакта с поверхностью ответной детали, что обеспечивает возможность получение принципиально новых качеств покрытий [11, 12]. Такие покрытия по своему строению являются функционально-ориентированными покрытиями.

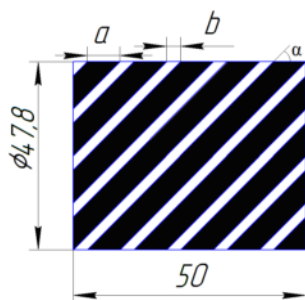


Рис. 1. Схема нанесения функционально-ориентированного покрытия:  $a$  – твердый сплав ВК 15;  $b$  – полиамид ПА-6

Для нанесения фрикционного покрытия в качестве износостойкого материала был выбран твердый сплав ВК15 ГОСТ 3882-74, обладающий высокой твердостью и износостойкостью [8], а для получения антифрикционного – порошок полиамида ПА-6 (мерканит), имеющий высокие антифрикционные свойства [13].

Покриття наносили на опытній установці детонаційно-газового нанесення покриттів DEPLA-3 на образці з сталі Ст 3 ГОСТ 380-94 довжиною 50 мм. Товщина покриття після круглого шліфування складала 0,8 мм, а діаметр образців з покриттям – 47,8 мм. Суммарна ширина єдиничного шару, що складається з твердої і м'якої фаз складала 10 мм, а кут нахилу шарів до осі обертання деталі приймали рівним 30, 45, 60°. Схема розташування і розміри шарів показані на рис. 1 і в табл.1, а на рис. 2 – зовнішній вигляд зразка з покриттям після проведення випробування.

Таблиця 1. Розміри функціонально-орієнтованих шарів

№	Шар ВК 15			Шар ПА-6			Fп/ Fв
	Ширина шару, мм	Площа шару		Ширина шару, мм	Площа шару		
		Fв, мм <sup>2</sup>	%		Fп, мм <sup>2</sup>	%	
1	7,0	5253,22	70	3,0	2251,38	30	0,43
2	8,5	6378,91	85	1,5	1125,69	15	0,18
3	9,25	6941,755	92,5	0,75	562,845	7,5	0,08

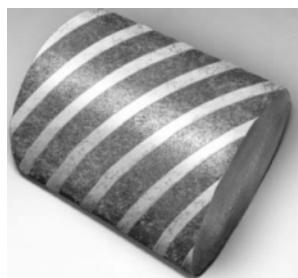


Рис. 2. Зовнішній вигляд зразка з покриттям

Підготовка порошків перед напыленням і контроль якості напылених покриттів проводили згідно ГОСТ 27953-88 «Покриття детонаційні. Загальні вимоги».

Напылені зразки піддавали візуальному огляду, визначали геометричні параметри напылених шарів мікрометром ГОСТ 6507-90, твердість шару з ВК15 по Роквеллу по ГОСТ 9013-59 шкала А.

Для визначення зносостійкості проводили прискорені випробування за схемою – циліндричний зразок з напыленим шаром – вкладиш з сталі 45 (ГОСТ 1050-74) з твердістю 42÷45 HRC. Враховуючи особливість структури функціонально-орієнтованого покриття, випробування проводили на спеціальному стенді, що забезпечує перекриття 5-ти парних шарів. Давлення на зразки складало 12,5 МПа, швидкість обертання – 3,75 м/с, час випробування 10 год. Для порівняння проводили випробування зразків, на які було нанесено покриття з одного твердого сплаву.

Зразки, по 3 шт. кожного виду, випробували при неперервній подачі індустріального масла МС-20 (ГОСТ 20779-75) з додаванням в мастильний матеріал 11 мас.% абразивного порошку (карбіда кремнію) дисперсністю 20÷40 мкм і мікротвердістю 28÷30 ГПа. До початку випробувань зразок прирабатували впродовж 5 год при постійному тиску рівному 15% від номінального. Після приработки зразок і контрольне промивали в ацетоні (ГОСТ 2603-79) і вважали на прецизійних вагах WA-21 з похибкою вимірювання 0,0005 г. Після закінчення випробувань зразок і контрольне повторно промивали і вважали.

Оцінку зносостійкості виробляли за середньої для випробуваних зразків інтенсивності изнашивания (ГОСТ 23.224-86), визначеної за формулою:

$$I = \frac{W}{L}, \quad (1)$$

де  $W$  – величина лінійного износу елементів трибопар;

$L$  – путь трения данного образца, соответствующий износу  $W$ , м.

При определении износа взвешиванием, значение линейного износа определяется по формуле:

$$W = \frac{\Delta G}{\rho A}, \quad (2)$$

где  $\Delta G$  - изменение массы образцов при испытании, кг;

$\rho$  – плотность изношенных материалов, кг/м<sup>3</sup>;

$A$  – контурная площадь контакта образцов, м<sup>2</sup>.

Путь трения определяли из соотношения:

$$L = \pi d N, \quad (3)$$

где  $N$  – количество полных оборотов вала;

$d$  – диаметр образца, мм.

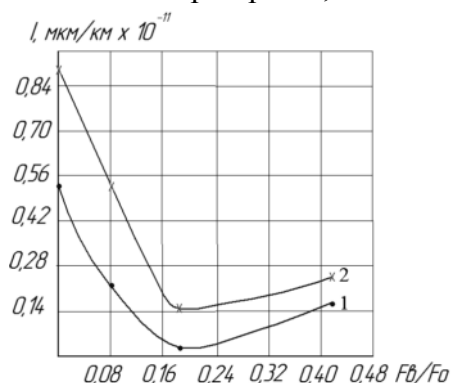


Рис. 3. Износ в зависимости от соотношения площадей мягкого и твердого слоев при угле 60°: 1 – покрытие; 2 – вкладыша

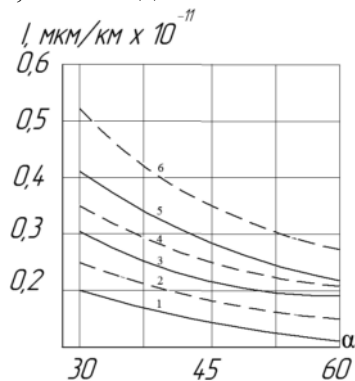


Рис. 4. Влияние угла наклона слоев на износостойкость при  $F_p/F_v$ : 1, 2 – 0,08; 3, 4 – 0,43; 5, 6 – 0,18; сплошной линией – покрытия, пунктиром – вкладыша

до  $0,05 \times 10^{-11}$  мкм/км и  $0,15 \times 10^{-11}$  мкм/км соответственно.

Износостойкость пары трения с функционально-ориентированным покрытием зависит от соотношения площадей твердого и мягкого слоев и угла наклона слоев по отношению к оси вращения детали (рис. 3 и 4).

Контроль внешнего вида покрытия показал, что внешние дефекты, а именно, сколы, вздутия, отслоения, трещины и раковины отсутствуют. Геометрические параметры нанесенных слоев покрытия соответствуют заданным (таблица 1).

Твердость слоев из ВК15 составляет 83÷85 HRA. Поверхность из твердого сплава имеет высокую чистоту, заметных задиров и других повреждений, несмотря на подачу в зону трения абразивных частиц, не наблюдается. На поверхности полимерных и твердосплавных слоев наблюдаются следы взаимобразных внедрений материала, имеющих локальный характер.

Использование функционально-ориентированных покрытий, состоящих из последовательно расположенных слоев твердой и мягкой фаз, обеспечивает повышение износостойкости трущихся пар по сравнению с покрытием, состоящим из одного твердого материала. Если при напылении 100 % поверхности твердым сплавом ВК15 износ составил: покрытия –  $0,53 \times 10^{-11}$  мкм/км, вкладыша  $0,87 \times 10^{-11}$  мкм/км; то при напылении функционально-ориентированного покрытия с углом 60°, состоящего на 85% из твердого сплава и на 15% из антифрикционного материала, в условиях испытаний износ, как по покрытию, так и по вкладышу, уменьшился

Известно [14], что при трении в зоне контакта происходят сложные физико-химические процессы, зависящие от условий трения (скорости трения, давления, температуры), применяемых материалов, окружающей среды. Значительное повышение износостойкости наблюдается при образовании в процессе трения, так называемой, сервовитной пленки. Механизм образования пленки зависит от материалов, участвующих в работе пары трения, условий трения, вида смазочных материалов. Способность сервовитного слоя выдерживать те или иные нагрузки однозначно зависит от того, в какой степени в зону контакта пары трения будут поступать продукты износа мягкого и твердого слоев покрытия, что зависит от соотношений площадей этих слоев и их пространственной ориентации по отношению к характеру перемещения ответной пары трения.

В условиях эксперимента с увеличением площади занятой полимером стойкость против износа растет, а затем снижается. Очевидно, что увеличение площади занятой полимером улучшает качество смазывания трущихся поверхностей, а при дальнейшем увеличении этой площади уменьшается площадь поверхности твердого сплава в качестве опорной структуры, что приводит к повышению износа. Выявлено влияние угла наклона слоев по отношению к оси вращения детали, что функционально связано с характером транспортировки (массопереносом) продуктов износа и частиц абразивного порошка в зонах трения соответствующих слоев покрытия. Лучшие результаты были получены на образцах имеющих соотношение площадей  $F_{п}/F_{в} = 0,18$  и угол наклона слоев к оси вращения детали  $60^{\circ}$  (рис.3, 4).

#### **Заключение**

Эффективность исследованного функционально-ориентированного покрытия, состоящего из последовательно расположенных под углом к оси вращения детали слоев твердого износостойкого и мягкого антифрикционного материалов, обусловлена, прежде всего, возможностью оптимизации условий взаимного переноса продуктов износа полимера на твердый сплав и продуктов износа твердого сплава на полимер, что в процессе эксплуатации пары трения изменяет свойства этих слоев. Этот эффект взаимного массопереноса продуктов износа твердых и мягких слоев покрытия обеспечивает наличие большего положительного градиента механических свойств в покрытии, что, как известно, является хорошей предпосылкой улучшения условий трения. Например, отсутствие мягкого слоя в зоне трения твердого слоя покрытия его функции в той или иной мере выполняют окисные пленки и другие вторичные структуры [14, 15], а внесение в процессе эксплуатации покрытия в мягкие слоя продуктов износа твердых слоев обеспечивает эффект аналогичный характеру поведения волокнистой композиционной структуры покрытия [3, 9]. Кроме того, расположение слоев покрытия под углом к оси вращения детали, образующих винтовые линии, приводит к тому, что продукты износа частично выносятся из зоны трения.

Подтверждена целесообразность повышения качества покрытий путем нанесения функционально-ориентированных покрытий, разработанных на основе сочетания особенностей эксплуатации деталей и свойств их контактирующих поверхностей.

#### **Список литературы:**

1. Бартенев С.С. Детонационные покрытия в машиностроении / С.С. Бартенев, Ю.П. Федько, А.И. Григоров. – Л.: Машиностроение, 1982. – 216 с.
2. Зверев А.И. Детонационное напыление покрытий / А.И. Зверев, Е.А. Шаривкер, Е.А. Астахов. – Л.: Судостроение, 1979. – 232 с.
3. Поляк М.С. Технология упрочнения: в 2 т. / М.С. Поляк. – М.: Л.В.М. «СКРИПТ». Машиностроение, 1995. - т. 1. – 832 с., т. 2. – 688 с.

4. Хасуи А. Наплавка и напыление / А. Хасуи, О. Моригаки. – М.: Машиностроение, 1985. – 240 с.
5. Кулик А.Я. Газотермическое напыление композиционных порошков / А.Я. Кулик, Ю.С. Борисов и др. – Л.: Машиностроение, 1985. – 200 с.
6. Rabin V.H. Function ally Gradient Materials/ V.H. Rabin, I. Shiota. – MRS Bulletin. – № 20, January 1995.
7. Способ получения функционально-градиентных покрытий: патент США № 4751099. – 24 декабря 1986.
8. Порошковая металлургия. Материалы, технология, области применения: справочник / И.М. Федорченко, И.Н. Францевич, И.Д. Радомысльский. – К.: Наук. думка, 1985. – 624 с.
9. Карпинос Д.М. Новые композиционные материалы / Д.М. Карпинос, Л.И. Тучинский, Л.Р. Вишняков. – Киев: издательское объединение «Вища школа», 1977. – 312 с.
10. Буря А. И. Использование технологических приемов детонационно-газового напыления порошка для улучшения триботехнических и физико-механических свойств наносимых покрытий / А. И. Буря, А. М. Петров, М. Г. Петров // Труды 8-го международного симпозиума по фрикционным изделиям и материалам (Ярославль, Россия, Яроффри 28-30 сентября 2010), 2010. – С. 138 – 141.
11. Михайлов А.Н. Основы синтеза функционально-ориентированных технологий машиностроения. – Донецк: ДонНТУ, 2009. – 346 с.
12. Михайлов А.Н. Повышение износостойкости пары трения за счет функционально-ориентированных покрытий / А.Н. Михайлов, М.Г. Петров, В.В. Головятинская, А.М. Петров // [Современные проблемы техносферы и подготовки инженерных кадров]: сборник трудов VI Международной научно-практической конференции на острове (Джерба с 11 по 18 октября 2012 г.). – Донецк: ДонНТУ, 2012. – С. 196 – 199.
13. Калинин Э.Л. Свойства и переработка термопластов: справочное пособие / Э.Л. Калинин, М.Б. Саковцева. – Л.: Химия, 1983. – 288 с.
14. Костецкий Б.И. Поверхностная прочность материалов при трении / под ред. Б.И. Костецкого. – К.: Техника, 1976. – 292 с.
15. Гаркунов Д. Н. Триботехника / Д. Н. Гаркунов. – М.: Машиностроение, 1985. – 424 с.

Надійшла до редакції 31.01.2013.

**О.Н. Михайлов, О.М. Петров,  
В.В. Голов'ятинська, М. Г. Петров  
ДОЦІЛЬНІСТЬ ВИКОРИСТАННЯ ФУНКЦІОНАЛЬНО-ОРІЄНТОВАНИХ ДЕТОНАЦІЙНО-ГАЗОВИХ ПОКРИТТІВ**

*Встановлена принципова можливість підвищення зносостійкості пари тертя за рахунок створення на поверхні деталей детонаційно-газовим напыленням функціонально-орієнтованих покриттів, які складаються з шарів зносостійкого та антифрикційного матеріалів, що послідовно чергуються. Показано, що зносостійкість пари тертя з функціонально-орієнтованим покриттям залежить від співвідношення площ покриттів з антифрикційного та зносостійкого матеріалів та їх просторової орієнтації.*

**Ключові слова:** детонаційно-газове напылення, властивості, знос, поверхня, твердий сплав, поліамід

**A. Mikhailov, A. Petrov,  
V. Goloviatinskaya, M. Petrov  
EXPEDIENT USE OF PERFORMANCE-BASED DETONATION GAS FLOORS**

*We detected principal opportunity of the wear resistance increasing of the friction pair due to functional-oriented coatings creation on surfaces of parts through the detonation-gas spaying, consisting of alternating layers of wear-resistant and anti-friction materials. It is shown that the wear resistance of the friction pair with a functional-oriented coating depends on the ratio of the areas of anti-friction coatings and wear-resistant materials and their spatial orientation.*

**Key words:** detonation-gas spaying, properties, depreciation, surface, hard alloy, polyamide.