

## ПЕРСПЕКТИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ, СВОЙСТВА И ПРИМЕНЕНИЕ ДЕТОНАЦИОННЫХ ПОКРЫТИЙ

© 2011 М. В. Ненашев, С. Ю. Ганигин, А. Н. Журавлев, А. С. Дьяконов,  
С. А. Белокоровкин, Д. Ю. Карякин

Самарский государственный технический университет

Описаны новые направления в области детонационного напыления твердых износостойких покрытий. Приведены результаты исследования механических и триботехнических свойств наноструктурированных композиционных металлокерамических покрытий. Показана область применения детонационных покрытий в промышленности.

*Твердый сплав, керамика, наноструктурированные композиционные покрытия, ультрадисперсные алмазы.*

Детонационное напыление – это технология нанесения покрытий, в которой для разогрева и разгона порошкообразного материала используется энергия газового взрыва. Процесс реализуется циклически. Каждый цикл (выстрел) в камеру сгорания поступает газовая смесь, в ствол пушки помещается дозированное количество порошка, после чего с помощью искры инициируется детонация газовой смеси. Энергия взрыва нагревает и разгоняет частицы порошка по направлению к обрабатываемой детали и вбивает расплавленные частицы в поверхность, обеспечивая равномерную и плотную структуру покрытия, приближающуюся по свойствам к монолитным материалам. Во время выстрела скорость частиц превышает скорость звука, достигая (в зависимости от состава газовой смеси) от 420 м/с до 1300 м/с и более, а температура доходит до точек плавления материала порошков и основы -1500...2500°C. [1]

При столкновении расплавленного материала происходит микросварка и порошок прочно (на молекулярном уровне) соединяется с поверхностью детали. Необходимая толщина покрытия наращивается серией последовательных выстрелов. Для обработки больших поверхностей деталь перемещают перед стволом с помощью манипулятора. Достоинствами данного метода являются: низкая пористость покрытия, высокая прочность связи с основой обрабатываемой детали, незначительное термическое воздействие, позволяющее избегать нежелательных термонапряжений и коробления даже тонкостенных деталей сложной конструкции.

Физико-механические свойства и эксплуатационные характеристики детонационных покрытий зависят от множества технологических параметров: способа предварительной подготовки поверхности; влажности, химсостава, дисперсности и структуры напыляемых порошков, глубины загрузки порошка, состава газовой смеси и коэффициента заполнения этой смесью камеры сгорания детонационной установки, угла напыления, расстояния от среза ствола до наносимой поверхности и др. факторов. Большое количество управляемых параметров, влияющих на качество получаемых покрытий, вызывает необходимость проведения исследований по оптимизации технологических режимов нанесения покрытий. Такая необходимость возникает каждый раз при изменении, по крайней мере, одного входного параметра: дисперсности и дозировки порошка, состава газовой смеси и т.д. При этом отметим, что не все технологические факторы одинаково удобны для оперативного управления качеством покрытия (некоторые факторы заданы конструкцией детонационной установки, свойствами имеющихся порошковых материалов и т.д.).

Исследования триботехнических свойств твердых и сверхтвердых материалов ведущих фирм-производителей (Сэндвик Коромант и др.) показали, что при испытаниях по стандарту DIN 50330 уменьшение размера карбидной фазы в твердых сплавах вольфрамовой группы в три раза (с 3 мкм до 1 мкм) повышает твердость сплава до 2,5 раз и стойкость материала к сухому абразивному

изнашиванию в 5...70 раз, а к мокрому абразивному изнашиванию - до 22 раз.

Хрупкое разрушение твердосплавных покрытий также существенно зависит от размеров  $\alpha$ -фазы и развивается за счет образования и слияния внутрикристаллических хрупких изломов по кристаллографическим плоскостям скольжения, а также за счет вязкого сдвигового излома  $\beta$ -фазы. Уменьшение размера зерен и содержания кобальта в твердых сплавах влечет за собой уменьшение промежуточных слоев между зернами карбидной фазы и, следовательно, пониженную интенсивность вязкого излома  $\beta$ -фазы. Поэтому усталостная прочность мелкозернистых сплавов почти в два раза превышает стойкость крупнозернистых сплавов. Дальнейшее измельчение до субмикронных и наноразмеров приводит к созданию материалов с качественно новыми свойствами.

В ГОУ ВПО СамГТУ проводятся научные исследования в направлении уменьшения толщины кобальтовой связки между твердыми частицами и повышением абразивной стойкости материала покрытия за счет использования смеси порошков ВК-12 и  $Al_2O_3$  (корунд). За счет более высокой температуры плавления оксида алюминия по сравнению с кобальтом последний при взрыве, уже будучи в расплавленном состоянии, разбивается еще твердыми и более легкими и быстрыми частицами корунда. В полученном покрытии кобальт, содержащийся изначально только в порошке ВК-12, становится связующим как для карбида вольфрама, так и для диспергированных частиц  $Al_2O_3$  (рис. 1). В результате в получаемом покрытии средняя толщина кобальтовой связки между зернами уменьшается с 200...500 мкм до 50...100 нм.

Результаты сравнительных триботехнических испытаний традиционных и наноструктурированных твердосплавных покрытий приведены на рис. 2.

Испытания на абразивную стойкость проводили при следующих режимах: схема испытаний – «кольцо-плоскость»; среда – алмазная паста марки АСМ 3/2 НОМГ (ГОСТ 25593-83); давление – 25 МПа; контробразец – сталь 40Х (HRC 45); частота вращения – от 600 мин<sup>-1</sup>; приведенный диаметр поверхности трения – 5,5 мм; ширина

дорожки трения – 1 мм; длительность испытаний – 10 минут.

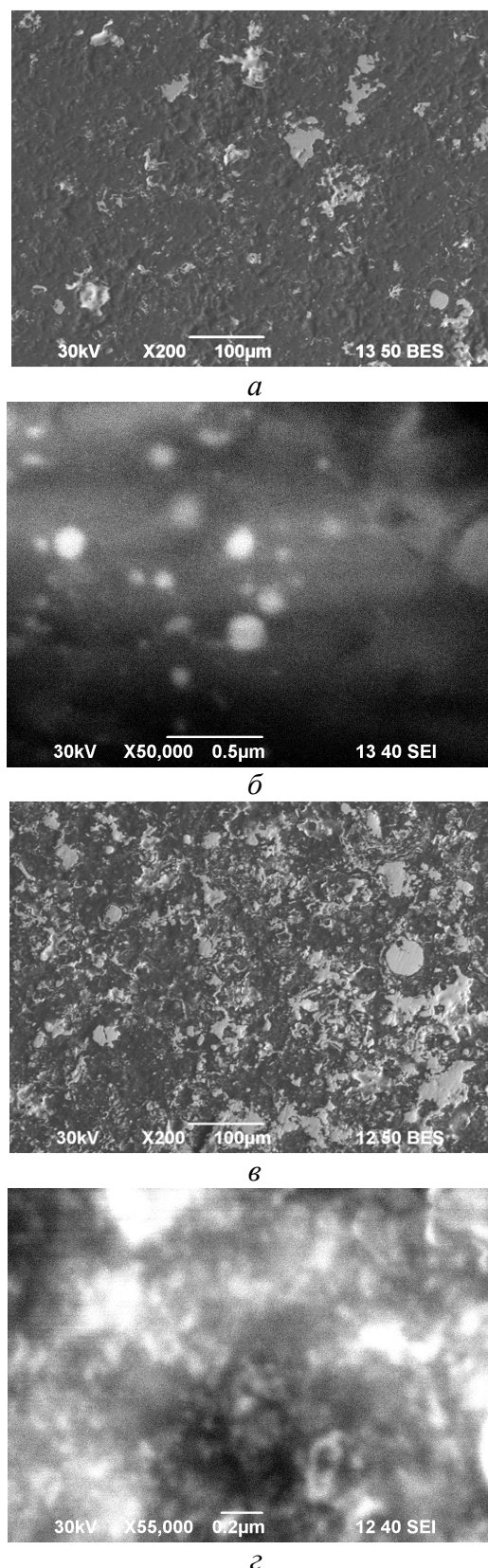


Рис. 1. Микро-(а, в) и наноструктура (б, г) композиционных покрытий:

а, б) 95%  $Al_2O_3$  + 5% WC-Co(12%);  
в, г) 50%  $Al_2O_3$  + 50% WC-Co(12%)

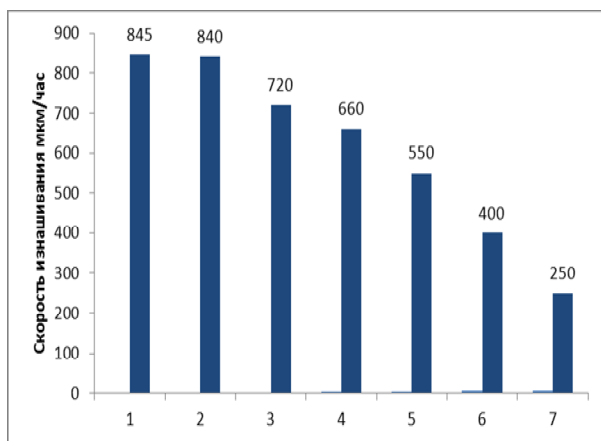


Рис. 2. Стойкости покрытий к абразивному изнашиванию:

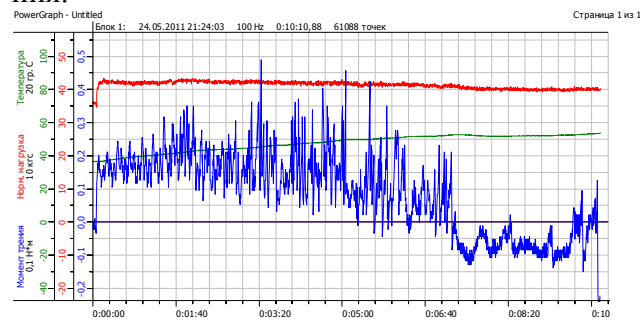
- 1 - 50%  $Al_2O_3$  + 50% WC-Co(12%);
- 2 - 80%  $Al_2O_3$  + 20% WC-Co(12%);
- 3 - 100%  $Al_2O_3$ ;
- 4 - 5%  $Al_2O_3$  + 95% WC-Co(12%);
- 5 - 20%  $Al_2O_3$  + 80% WC-Co(12%);
- 6 - 95%  $Al_2O_3$  + 5% WC-Co(12%);
- 7 - 100% WC-Co(12%)

Проведенные триботехнические испытания покрытий свидетельствуют о перспективности повышения износостойкости керамических покрытий на основе  $Al_2O_3$  путем добавления к ним порошка твердого сплава. Получаемые композиционные покрытия могут иметь достаточно широкий спектр применения в промышленности.

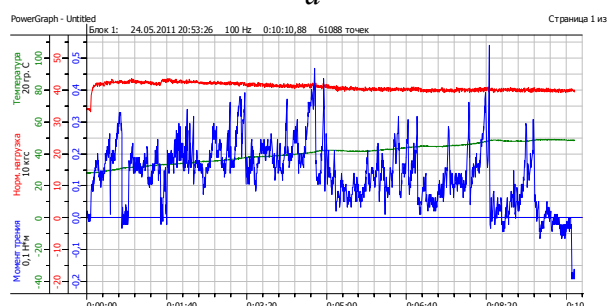
Исследования показали возможность дополнительного упрочнения наносимого материала за счет добавления в исходную смесь порошков для напыления ультрадисперсных алмазов, получаемых после высушивания и перемалывания водной суспензии УДА-В. Проведенные испытания показали повышение прочностных свойств материала в составе ВК-12 (70%) +  $Al_2O_3$  (5%) + УДА-В (25%) на 30% по сравнению с аналогичным покрытием без добавления ультрадисперсных алмазов. Эпюры триботехнических испытаний композиционных покрытий на абразивную стойкость при вышеописанных режимах приведены на рис. 3.

С точки зрения совершенствования технологии напыления детонационных покрытий важно выявить связи между технологическими режимами напыления и качеством получаемых покрытий. Одним из наиболее важных и доступных для управления технологических параметров, влияющих на температуру и скорость движения частиц напыляемых порошков, является коэффициент

заполнения камеры сгорания газовой смесью, представляющий собой отношение суммарного расхода газа за один цикл к суммарному объему ствола и камеры смешения.



а



б

Рис. 3 Эпюры триботехнических испытаний композиционных покрытий:  
а)  $Al_2O_3$  5% + 95% WC-Co(12%) + УДА-В 25%, скорость изнашивания 270 мкм/ч, твердость  $HV = 1400 \text{ кгс/мм}^2$ ; б)  $Al_2O_3$  5% + 95% WC-Co(12%), скорость изнашивания 662 мкм/ч; твердость  $HV = 1500 \text{ кгс/мм}^2$

В связи с этим проведено исследование по поиску рационального коэффициента заполнения ствола (с использованием автоматизированной детонационной установки «Обь»), обеспечивающего нанесение твердосплавного детонационного покрытия с наилучшими качественными показателями при следующих прочих условиях: топливо – ацетилен (48%), окислитель – кислород (52%), инертный газ – азот; частота следования выстрелов – 5 Гц (производительность при этом составляет около 1,8 кг/ч); дистанция напыления – 150 мм. Каждая частица наносимого порошкового материала ВК-12 представляет собой сферу, состоящую из карбида вольфрама (88%), плакированного кобальтом (12%). Дисперсность частиц составляет 30...40 мкм (рис. 4). За один выстрел формируется пятно покрытия диаметром 20 мм и толщиной порядка 15 мкм (рис. 5).

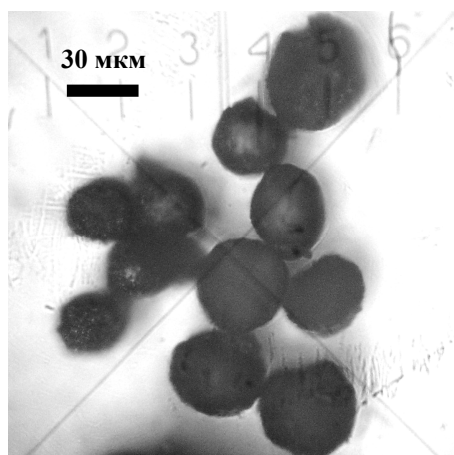


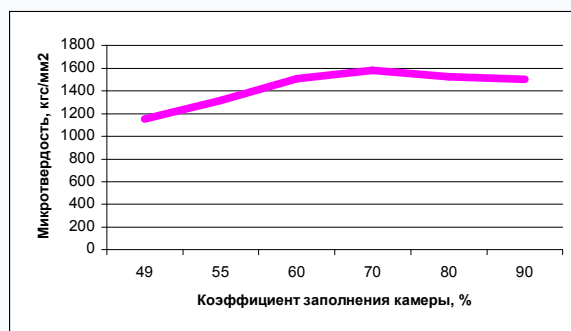
Рис. 4. Частицы порошка ВК-12



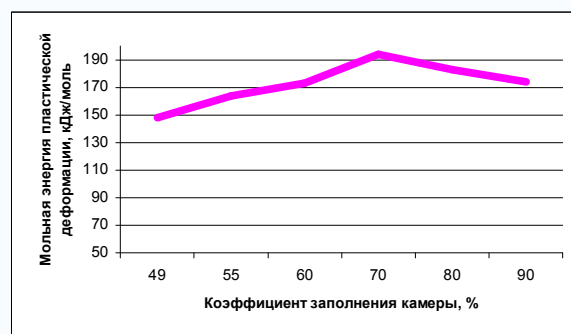
Рис. 5. Профиль пятна покрытия

Для испытаний готовились образцы (пластины из стали 45), на которые настреливали покрытие ВК-12 (50 выстрелов) при коэффициентах заполнения камеры сгорания (в %) 49, 55, 60, 70, 80, 90. На полученных образцах исследовали триботехнические свойства (скорость изнашивания, момент трения, температуру саморазогрева) твердосплавных покрытий по вышеописанной методике, изучали микроструктуру полученных покрытий с помощью растрового электронного микроскопа JSM-6390, оценивали микротвердость по Виккерсу при нагрузке на индентор 100гс и энергию активации пластической деформации, а также определяли прочность сцепления покрытия с основой при испытаниях на сдвиг.

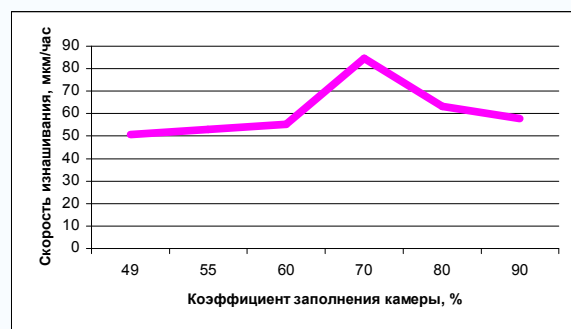
Результаты испытаний приведены на рис. 6. Исследования показали, что в исследуемом диапазоне изменения коэффициента заполнения ствола газовой смесью зависимость скорости изнашивания, микротвердости, мольной энергии пластической деформации



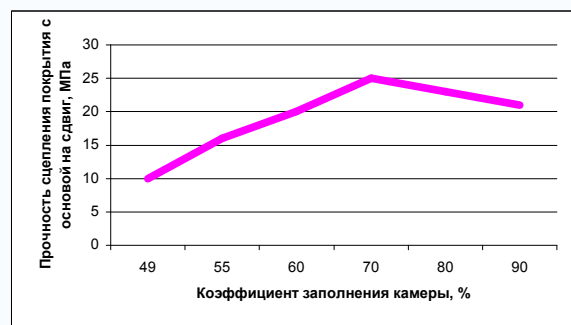
а



б



в



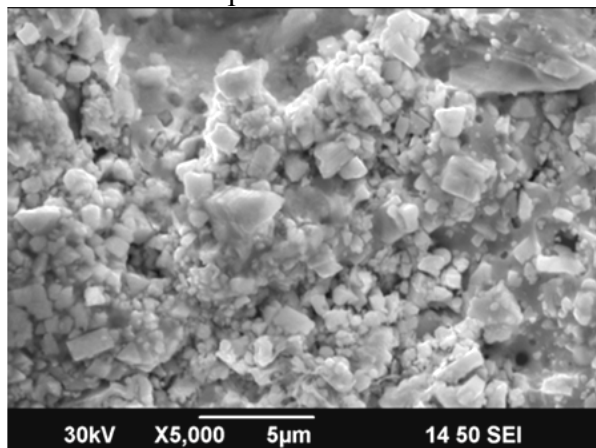
г

Рис. 6. Результаты оценки механических и триботехнических свойств детонационных покрытий ВК-12: микротвердости (а), мольной энергии пластической деформации (б), скорости изнашивания (в), прочности сцепления на сдвиг (г)

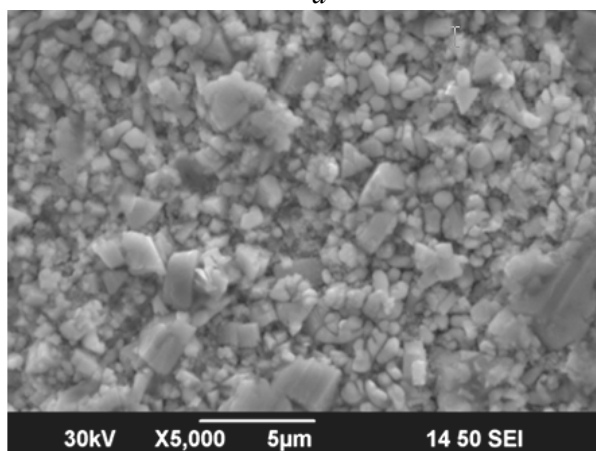
и прочности сцепления покрытия с основой имеют экстремум в области значения коэффициента 70%. С увеличением коэффициента заполнения камеры газовой смесью от 49 до 70% наблюдается практически линейный рост мольной энергии пластической дефор-

мации, обусловленный аккумулярованием энергии взрыва в форме запасенной энергии при пластической деформации наносимых частиц (наклеп частиц подтверждается ростом микротвердости). По достижении запасенной энергии критической величины (соответствующей экстремуму) материал покрытия переходит в максимально твердое, но хрупкое состояние. Зависимость между мольной энергией пластической деформации и скоростью изнашивания указывает на то, что ведущий механизм изнашивания покрытия имеет усталостную природу.

Анализ микроструктуры покрытий выполняли на полированных и протравленных шлифах (рис. 7). Анализ микроструктуры показал, что при коэффициенте заполнения ствола газовой смесью 49% покрытие является недостаточно плотным (пористым), с заметными границами между отдельными частицами, что может являться следствием недостаточного разогрева и разгона частиц напыляемого порошка.



а



б

Рис. 7. Микроструктура детонационных покрытий ВК-12 при коэффициенте заполнения ствола газовой смесью 55% (а) и 80% (б) (травление 40с в растворе плавиковой и азотной кислот (50/50%))

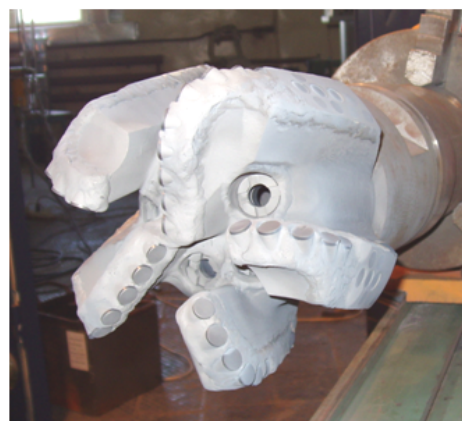
С увеличением коэффициента заполнения наблюдается повышение плотности и равномерности расположения зерен карбида вольфрама. После коэффициента заполнения 60% граница между частицами практически исчезает, а прочность сцепления покрытия с основой на сдвиг устанавливается возле максимальной отметки 25МПа.

### Опыт применения детонационных покрытий в промышленности

Высокие эксплуатационные свойства детонационных покрытий обусловили широкое применение в Самарском промышленном регионе технологии детонационного напыления. В настоящее время по договору с ОАО «Волгабурмаш» детонационные твердосплавные покрытия успешно применяются для упрочнения шарошек трехшарошечных (рис. 8,а) и алмазных (рис. 8,б) буровых долот. Достижимый эффект (при толщине покрытия 200 мкм) – существенное повышение абразивной стойкости бурового инструмента, практически полное исключение выпадения породоразрушающего вооружения при работе на забое, снижение отказов по причине растрескивания шарошек.



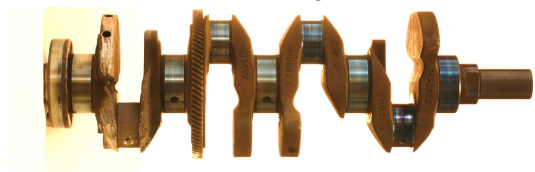
а



б



в



з



д



е



ж

Рис. 8. Область применения детонационных покрытий

Высокие прочностные и адгезионные свойства покрытий позволяют использовать детонационные покрытия для восстановления штампового инструмента, например вырубных штампов для сепараторов подшипников качения, а также пуансонов (рис.

8, в). В автомобильной промышленности детонационные покрытия находят применение, в частности, для восстановления и упрочнения изношенных шеек коленчатых валов (рис. 8,з). Выявленная при испытаниях высокая фрикционная совместимость пары трения «твердосплавное детонационное покрытие – серебряное покрытие» нашла применение при изготовлении дисков разгрузки центробежных насосов типа ЦНС (рис. 8,д). При этом на рабочую поверхность одного диска наносится твердосплавное покрытие, а на рабочую поверхность другого – антифрикционное серебряно-алмазное покрытие. В машиностроении детонационные покрытия широко применяются для восстановления изношенных шпинделей (рис. 8,е). Теплоизоляционные покрытия оксида алюминия применяют для ресурсоповышающей обработки медных сопел сварочных горелок (рис. 8,ж). Одной из наиболее эффективной области применения твердосплавных покрытий, является упрочнение элементов сельскохозяйственной техники, например, лап сошников.

Отмеченные приложения далеко не исчерпывают область возможного использования детонационных покрытий. Круг обрабатываемых деталей непрерывно расширяется, а методики и оборудование для детонационного напыления непрерывно совершенствуются, открывая новые перспективы и сферы применения данной технологии.

### Библиографический список

1. Бартенев, С.С. Детонационные покрытия в машиностроении. [Текст] / С.С. Бартенев, Ю.П. Федько, А.И. Григоров – Л.: Машиностроение, Ленингр. отд. - 1982. -215с.
2. Тушинский, Л.И. Исследование структуры и физико-механических свойств покрытий. [Текст] / Л.И. Тушинский, А.В. Плохов Новосибирск: Наука, 1986. -216с.
3. Астахов, Е.А. Научно-технологические основы управления свойствами детонационных покрытий [Текст]: дис. ... д-ра техн. наук: 05.03.06 / Е.А. Астахов; НАН Украины; Институт электросварки им. Е.О.Патона. - Киев, 2005. – 382с.
4. Ульяницкий, В.Ю. Физические основы детонационного напыления [Текст] дис. ... д-ра техн. наук: 01.02.05/ В.Ю. Ульяницкий: ИГиЛ СО РАН. – Новосибирск, 2001. - 242 с.

## PERSPECTIVE TECHNOLOGIES, PROPERTIES AND APPLICATION OF DETONATION COVERINGS

© 2011 M. V. Nenashev, S. J. Ganigin, A. N. Zhuravlev, A. S. Dyakonov, S. A. Belokorovkin,  
D. Yu. Karyakin

Samara State Technical University

New directions in the field of a detonation dusting of firm wearproof coverings are described. Results of research mechanical and tribotechnical properties nanostructured composite ceramic-metal coverings are resulted. The scope of detonation coverings in the industry is shown in the article.

*Firm alloy, ceramics, nanostructured composite coverings, ultradisperse diamonds.*

### Информация об авторах

**Ненашев Максим Владимирович**, доктор технических наук, профессор, проректор по научной работе Самарского государственного технического университета. E-mail: [max71@mail.ru](mailto:max71@mail.ru). Область научных интересов: технология производства и утилизации энергонасыщенных веществ, покрытия специального назначения.

**Ганигин Сергей Юрьевич**, кандидат технических наук, доцент Самарского государственного технического университета. E-mail: [gverdcitelly@gmail.com](mailto:gverdcitelly@gmail.com). Область научных интересов: детонационные технологии, системы автоматизированного управления.

**Журавлев Андрей Николаевич**, кандидат технических наук, старший научный сотрудник Самарского государственного технического университета. E-mail: [zan.samgtu@mail.ru](mailto:zan.samgtu@mail.ru). Область научных интересов: твердые материалы и покрытия, технология сборочного производства, механика разрушения твердых тел.

**Дьяконов Александр Сергеевич**, старший преподаватель Самарского государственного технического университета. E-mail: [tribo@rambler.ru](mailto:tribo@rambler.ru). Область научных интересов: абразивный инструмент.

**Белокоровкин Сергей Александрович**, аспирант Самарского государственного технического университета. E-mail: [SpiderBSA@mail.ru](mailto:SpiderBSA@mail.ru). Область научных интересов: противозносные покрытия, долотостроение.

**Карякин Дмитрий Юрьевич**, аспирант Самарского государственного технического университета. E-mail: [dilun7@mail.ru](mailto:dilun7@mail.ru). Область научных интересов: детонационные покрытия, режущий инструмент.

**Nenashev Maxim Vladimirovich**, Doctor of Technical Science, the professor, the pro-rector on scientific work of Samara State Technical University. E-mail: [max71@mail.ru](mailto:max71@mail.ru). Area of research: detonation technologies, special purpose coverings.

**Ganigin Sergey Juryevich**, Candidate of Technical Science, senior lecturer of Samara State Technical University. E-mail: [grail@rambler.ru](mailto:grail@rambler.ru). Area of research: detonation technologies, automated management systems.

**Zhuravlev Andrey Nikolayevich**, Candidate of Technical Science, senior scientific employee of Samara State Technical University. E-mail: [zan.samgtu@mail.ru](mailto:zan.samgtu@mail.ru). Area of research: firm materials and coverings, technology of assembly manufacture, the mechanic of destruction of firm bodies.

**Belokorovkin Sergey Alexandrovich**, post-graduate student of Samara State Technical University. E-mail: [SpiderBSA@mail.ru](mailto:SpiderBSA@mail.ru). Area of research: tribotechnical coverings, technology of chisel's production.

**Dyakonov Alexander Sergeevich**, The senior teacher of Samara State Technical University. E-mail: [tribo@rambler.ru](mailto:tribo@rambler.ru). Area of research: detonation coverings, abrasive tool.

**Karyakin Dmitriy Yuryevich**, post-graduate student of Samara State Technical University. E-mail: [dilun7@mail.ru](mailto:dilun7@mail.ru). Area of research: the detonation coverings, the cutting tool.