

6. В.А.Тарасов, В.Д. Баскаков, П.В.Круглов. Анализ наследственных преобразований технологических погрешностей при изготовлении кумулятивных зарядов // Вещества, материалы и конструкции при интенсивных динамических воздействиях. V Харитоновские тематические научные чтения: Труды международной конференции. ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», Саров, 2003. с.477-480.

## ДЕТОНАЦИОННОЕ НАПЫЛЕНИЕ И ЕГО ВОЗМОЖНОСТИ В ПОЛУЧЕНИИ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ПОКРЫТИЙ

*В.Ю. Ульяницкий, А.А. Штерцер*

Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН, Новосибирск, Россия

### Резюме

Созданное в ИГиЛ СО РАН оборудование нового поколения – детонационный комплекс CCDS2000 (Computer Controlled Detonation Spraying), позволяет наносить покрытия из широкого спектра материалов на различные подложки. CCDS2000 может работать на различных газовых топливах (ацетилене, пропан-бутане, МАФе, и др.). Приводятся свойства получаемых покрытий и примеры применения детонационного напыления в авиационном моторостроении, нефтегазовой индустрии и других отраслях промышленности, а также в создании научного оборудования.

**Ключевые слова:** детонационное напыление, газовая смесь, детонационный комплекс, покрытия.

### Введение

Явление газовой детонации широко известно и находит применение в различных технологиях, в частности в детонационном напылении (ДН). Эта технология появилась в середине прошлого века в США [1], несколько позже в России [2] и с тех пор применяется в машиностроении и других отраслях промышленности в целях получения функциональных покрытий, повышения ресурса работы и восстановления деталей. Обзор публикаций по ДН приведен в [3, 4]. Рабочий орган установки ДН включает ствол в виде трубы, в которой реализуется детонационное сжигание газовой смеси топливо + окислитель с образованием продуктов, имеющих температуру до 4500 К и массовую скорость за фронтом детонации до 1300 м/с. Вводимые в ствол порошковые частицы под воздействием высокотемпературного высокоскоростного газового потока нагреваются, как правило, до плавления, и разгоняются до скорости около полукилометра в секунду. При столкновении таких частиц с подложкой формируется прочное и плотное покрытие. Преимущество ДН перед другими газотермическими методами (плазменное и газопламенное напыление, HVOF, HVOF) заключается в высокой адгезии и низкой пористости получаемых покрытий, кроме того, напыляемые детали не деформируются.

В настоящей работе рассматриваются особенности детонационного комплекса CCDS2000, дающие возможность получать высококачественные покрытия, приводятся свойства ряда покрытий и их применения.

### 1. Детонационный комплекс CCDS2000 и используемые топлива

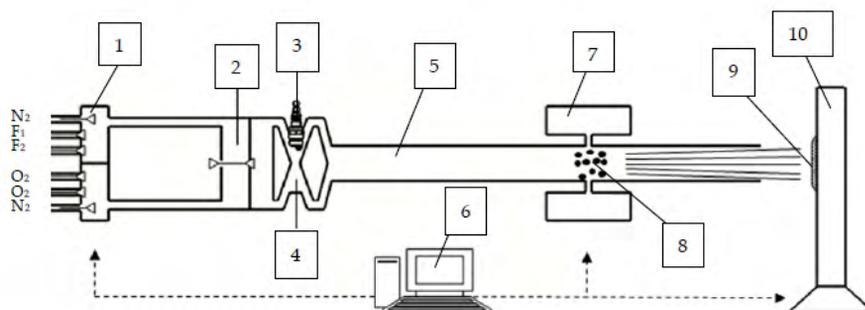
На базе многолетних исследований газовой детонации в ИГиЛ СО РАН создано оборудование нового поколения – детонационный комплекс CCDS2000 (Computer Controlled Detonation Spraying) [5 -7], позволяющее наносить покрытия из самого широкого спектра материалов на различные подложки. Основные элементы комплекса показаны на рисунках 1а, б, в. Рабочий орган (пушка) может также размещаться на промышленном роботе (рисунок 1д). Процесс ДН схематически показан на рисунке 2. В отличие от других газотермических технологий ДН является импульсным

процессом, состоящим из последовательности циклов (выстрелов). Обычно при напылении установка работает в режиме до 10 циклов в секунду, хотя комплекс CCDS2000 обеспечивает скорострельность до  $50 \text{ сек}^{-1}$  и на его основе может быть создан импульсный детонационный двигатель [8]. Комплекс обладает рядом отличительных особенностей, позволяющих эффективно контролировать процесс напыления. Подача газов в камеру смешения-зажигания осуществляется через сменные жиклеры с калиброванными отверстиями с использованием быстродействующих клапанов FESTO со временем срабатывания 3 - 4 мсек. За счет стабилизатора давления, в опорной полости которого поддерживается избыточное давление более 0.11 МПа, обеспечивается звуковое истечение газов из жиклеров, что позволяет прецизионно дозировать компоненты в детонирующей смеси путем открывания-закрывания соответствующих клапанов по заданной программе. При этом имеется возможность создавать продольно стратифицированный заряд, когда на разных участках ствола формируется разные по составу детонирующие смеси. Это особенно важно, когда основной (рабочий) заряд в стволе представляет собой трудно инициируемую газовую смесь и для ее надежного детонирования в начале ствола формируется слой из легко инициируемой смеси (заряд – бустер).



**Рисунок 1.** Детонационный комплекс CCDS2000: а) рабочий орган (пушка), состоящий из ствола, блока газораспределения и порошковых дозаторов; б) блок управления на базе промышленного компьютера; в) пушка в комплекте с 3-х координатным манипулятором; д) пушка на промышленном роботе

Камера смешения и зажигания специальной конструкции [5] позволяет эффективно смешивать подаваемые газовые компоненты и формировать детонационный фронт практически сразу на выходе из нее в ствол. Это позволило уменьшить длину ствола в сравнении детонационными установками старого типа, где детонационный фронт формируется на участке, иногда занимающем значительную часть ствола. С уменьшением длины ствола и размеров блока газораспределения уменьшились габариты всей установки, что дает возможность ее монтажа на промышленном роботе (см. рисунок 1д).



**Рисунок 2.** Принципиальная схема детонационного комплекса CCDS2000: 1- блок подачи газов; 2- стабилизатор давления; 3- свеча зажигания; 4- камера смешения и зажигания; 5- ствол; 6- управляющий компьютер; 7- дозатор порошка; 8- порошок в стволе; 9- обрабатываемая деталь; 10- манипулятор

CCDS2000 может работать на различных газовых топливах (водороде, ацетилене, пропан-бутане, МАФе и др.) Для нанесения высокотемпературной керамики и керметов используется высокоэнергетический ацетилен, обеспечивающий в эквимольной смеси с кислородом скорость детонации  $D = 2934$  м/с, температуру за детонационным фронтом  $T = 4516$  К и массовую скорость продуктов детонации  $u = 1311$  м/с. Для напыления металлов, особенно легкоплавких, целесообразно использовать газовые смеси с более низкой температурой за фронтом детонационной волны, например, смесь на основе пропана  $C_3H_8 + 3O_2$  ( $D = 2580$  м/с,  $T = 3769$  К,  $u = 1179$  м/с). Проведенные недавно исследования показывают, что перспективным топливом для ДН является также газ МАФ (метилацетилен – алленовая фракция) [9, 10]. Газовая смесь МАФ +  $3O_2$  имеет детонационные параметры:  $D = 2539$  м/с,  $T = 4097$  К,  $u = 1153$  м/с.

## 2. Свойства детонационных покрытий и их применение

В сравнении с другими газотермическими технологиями ДН позволяет получать наиболее прочные и плотные покрытия. Микроструктура некоторых покрытий показана на рисунке 3. Основными характеристиками металлического или твердосплавного покрытия обычно являются пористость, адгезия и твердость. Для изнашиваемых поверхностей важным показателем является также износостойкость в условиях абразивного воздействия, поэтому ряд покрытий испытывается по стандарту ASTM G65 на специальном стенде; износ измеряется потерей объема покрытия при трении с вращающимся обрешиненным диском и подачей зернистого абразива на поверхность контакта [11].

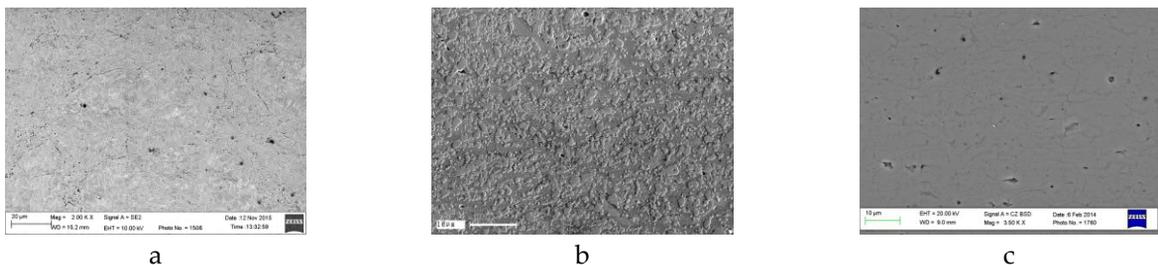


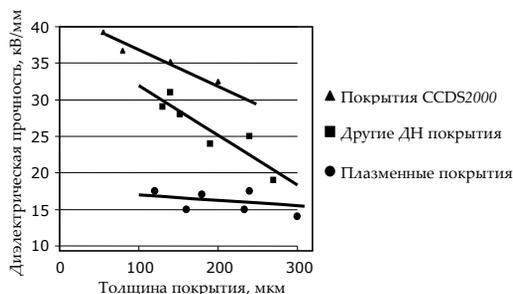
Рисунок 3. Микроструктура покрытий: а) нихром, б) твердый сплав WC/Co, с) оксид алюминия

В таблице 2 приведены свойства твердосплавного и ряда металлических покрытий. Представляют интерес также керамические покрытия, с одной стороны, как износостойкие, с другой, как электроизолирующие. Наиболее часто применяется оксид алюминия, причем технология CCDS обеспечивает наиболее высокую диэлектрическую прочность покрытий (рис. 4а), что объясняется низкой пористостью и отсутствием микротрещин [12].

Таблица 2. Свойства покрытий из различных сплавов [10]

Покрытие	Плотность, g/cm <sup>3</sup>	Абразивный износ, мм <sup>3</sup> /1000 об.	Адгезия, МПа	Твердость		Пористость, %
				HRa	HV <sub>300</sub>	
Нихром Ni80Cr20	8.4	35.7	105	68	300	≈ 1
Самофлюсующийся сплав NiCr17Si4B4	6.9	55.1	97	80	700	≈ 1
Нержавеющая сталь FeC0.2Ni2.2Cr13Mn0.8	7.7	17.5	99	75	500	≈ 1
Чугун FeC2.6Ni15Cu7Cr2.2 Si2.2 Mn1	7.3	55.5	95	74	500	1-2
Бронза CuAl8.5Fe4Ni5Mn1.5	7.5	108.7	93	65	300	< 0.5
Кермет WC/Co (75/25)	13.2	4.9	210	83	900	< 0.5

Детонационные покрытия находят применение в самых различных областях техники и научного эксперимента. Так, для нефтегазовой индустрии разработана технология электроизоляции резьбового соединения элементов буровой колонны методом ДН (рисунок 4б).



а



б

**Рисунок 4.** Керамические покрытия: а) диэлектрическая прочность алюмооксидных покрытий, полученных по разным технологиям [12], б) ниппель буровой колонны с покрытием из  $Al_2O_3$

Особенно эффективно ДН при нанесении твердосплавных покрытий, поэтому на всех предприятиях авиационного моторостроения только оно используется для обработки кромок антивибрационных полок лопаток газовых турбин в целях повышения износостойкости (рисунок 5а). Технология CCDS дает возможность наносить покрытия на сложные поверхности различной геометрии, такие как упомянутые кромки антивибрационных полок лопаток газовых турбин (рисунок 5а) и детали буровой телеметрии (рисунки 5б, с).



А



б

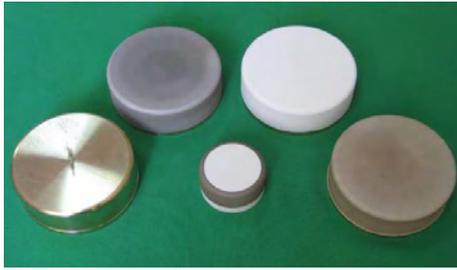


с

**Рисунок 5.** Лопатки газовых турбин (а) и детали буровой телеметрии (б, с) с твердосплавными покрытиями

Детонационные покрытия успешно работают на деталях электрофизической аппаратуры, применяемой в ядерных исследованиях, и оборудования для переработки отработанного ядерного топлива (рисунок 6).

У упомянутых выше алюмооксидных покрытий адгезия и когезия на стальной подложке достигает 70 МПа, твердость 1200HV (нагрузка 200 г), пористость 0,6%, диэлектрическая прочность превышает 25 кВ/мм при толщине слоя менее 300 мкм. Высокая температура плавления ( $2044^{\circ}C$ ) в сочетании с указанными прочностными характеристиками и низкой пористостью дает возможность наносить жаростойкие и огнестойкие покрытия из  $Al_2O_3$  на различные металлы, а также на угле- и стеклопластики.



а



б

**Рисунок 6.** Применение ДН в атомной технике: а) подушки суппортов с керамической изоляцией и антифрикционным слоем из бронзы (проект ITER), б) кольца с твердосплавным покрытием, применяемые в оборудовании для измельчения отработанного ядерного топлива

### Заключение

Технология CCDS, реализуемая на детонационном комплексе CCDS2000, позволяет наносить прочные плотные функциональные покрытия из широкого спектра материалов на различные подложки.

### Список литературы

1. R. Poorman, H. Sargent, and H. Lamprey. Method and Apparatus Utilizing Detonation Waves for Spraying and other Purposes // U.S. Patent No. 2714563, patented Aug. 2, 1955.
2. С.С. Бартенев, Ю.П. Федько, А.И. Григоров. Детонационные покрытия в машиностроении // Л.: Машиностроение, Ленингр. отд-ние, 1982, 250 с.
3. V. Ulianitsky, A. Shtertser, S. Zlobin, and I. Smurov. Computer-Controlled Detonation Spraying: From Process Fundamentals Toward Advanced Applications // Journal of Thermal Spray Technology, 2011, v. 20, No. 4, p. 791-801.
4. L. Pierre L. Fauchais, Joachim V.R. Heberlein, Maher I. Boulos. Thermal Spray Fundamentals. From Powder to Part // New York: Springer Science + Business Media, 2014, 1566 p.
5. В.Ю. Ульяницкий, А.Л. Кириякин, А.А. Штерцер, С.Б. Злобин. Установка для детонационного напыления покрытий // Патент РФ № 2 399 430, опубл. 20.09.2010, бюл. 26.
6. В.Ю. Ульяницкий, А.Л. Кириякин, А.А. Штерцер, С.Б. Злобин. Установка для детонационного напыления покрытий // Патент РФ № 2 399 431, опубл. 20.09.2010, бюл. 26.
7. В.Ю. Ульяницкий, А.Л. Кириякин, А.А. Штерцер, С.Б. Злобин. Импульсный дозатор порошка // Патент РФ № 2 400 310, опубл. 27.09.2010, бюл. № 27.
8. В.Ю. Ульяницкий, А.А. Штерцер, С.Б. Злобин, А.Л. Кириякин. Способ получения тяги // Патент РФ № 2330979, опубл. 10.08.08, бюл. 22.
9. В.Ю. Ульяницкий, А.А. Штерцер, И.С. Батраев. Исследование детонации газового топлива на основе метилацетилена и аллена // Физика горения и взрыва, 2015, т.51, № 2, с. 118-124.
10. И.С. Батраев. Использование многокомпонентного топлива метилацетилен-алленовая фракция (МАФ) при детонационном напылении // Упрочняющие технологии и покрытия, 2017, № 1, с. 14-19.
11. С.Б. Злобин, В.Ю. Ульяницкий, А.А. Штерцер. Сравнительный анализ свойств наноструктурных и микроструктурных керметных детонационных покрытий // Упрочняющие технологии и покрытия, 2009, № 3, с. 3-11.
12. В.Ю. Ульяницкий, И.С. Батраев, А.А. Штерцер. Детонационные покрытия из оксидов // Упрочняющие технологии и покрытия, 2015, № 9, с. 37-44.
13. V. Ulianitsky, A. Shtertser, V. Sadykov, I. Smurov. Development of Catalytic Converters Using Detonation Spraying // Materials and Manufacturing Processes, 2016, v. 31, is. 11, p. 1433-1438.
14. С.Б. Злобин, И.С. Батраев, В.Ю. Ульяницкий, А.А. Штерцер. Восстановление деталей электроцентробежного насоса детонационным напылением // Упрочняющие технологии и покрытия, 2012, № 5, с. 20-24.