

УДК 621.793.06

## Нанесение износостойких покрытий с регулируемой твердостью с помощью сверхзвукового холодного газодинамического напыления

Т. И. Бобкова, А. А. Деев, Р. Ю. Быстров, Б. В. Фармаковский

### Введение

Одним из перспективных направлений в создании инновационного продукта является инжиниринг поверхности элементов металлических конструкций. Модификация поверхности осуществляется в основном за счет нанесения специальных функциональных покрытий [1], имеющих конкретные защитные функции против агрессивного коррозионного, механического воздействия или негативного влияния вторичных физических полей.

При этом предпочтение отдается тем новым технологиям, которые не оказывают вредного влияния на наносимую металлическую поверхность (термические напряжения, окисление и т. д.). С этой точки зрения неоспоримое преимущество имеет технология сверхзвукового холодного газодинамического напыления [2].

### Методика эксперимента

Сверхзвуковое холодное газодинамическое напыление (ХГДН) основано на эффекте образования напыленного слоя на фронтальной

поверхности подложки при набегании гетерофазного потока с частицами ( $D = 50$  мкм) при скоростях до 1100 м/с. Температура частиц существенно меньше их температуры плавления и не превышает 110 °С. К достоинствам технологии относятся высокая мобильность, минимальные требования к инфраструктуре предприятия и низкие капитальные вложения. Внешний вид установки показан на рис. 1.

Использование технологии нанесения покрытий системы металл—металл, металл—оксид, металл—карбид с высокой адгезионной прочностью и регулируемой твердостью по толщине покрытия из порошковых материалов методом сверхзвукового ХГДН повышает технический уровень и ресурс изделий судостроения и морской техники, энергетики, прецизионного машино- и приборостроения, транспорта, здравоохранения, жилищно-коммунального хозяйства, нефтехимической промышленности, агропромышленного комплекса и др.

На основании имеющегося опыта [3, 4] разработана оптимальная последовательность технологических операций [5], позволяющая получать покрытия с заданными эксплуатационными характеристиками:

- подготовка порошков и их смесей;
- подготовка поверхности, подлежащей напылению;
- нанесение покрытий;
- контроль качества, механических свойств и размеров покрытий.

В качестве материала основы использовались порошки Al—Zn—Sn фракцией от 30 до 50 мкм и Fe—Cr—Al фракцией от 20 до 40 мкм. В качестве упрочняющей порошковой компоненты использовались корунд, композиция карбида вольфрама с кобальтом, медь фракциями от 0,1 до 3 мкм.

Перед использованием порошки металлов, их смеси, металлические сплавы и композиционные порошки просушивали, а керами-

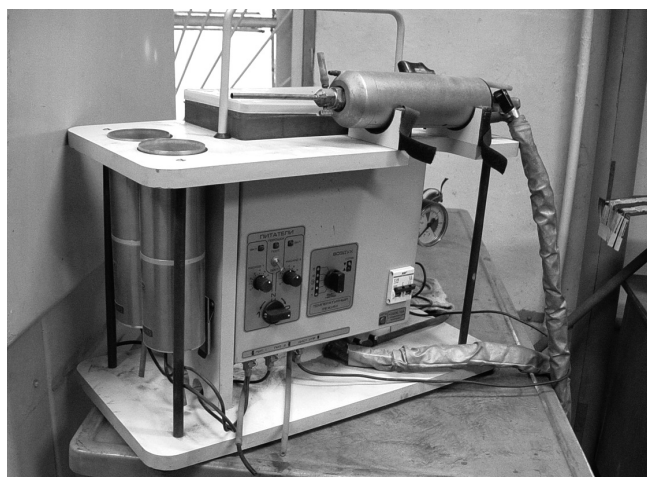


Рис. 1. Внешний вид установки ХГДН

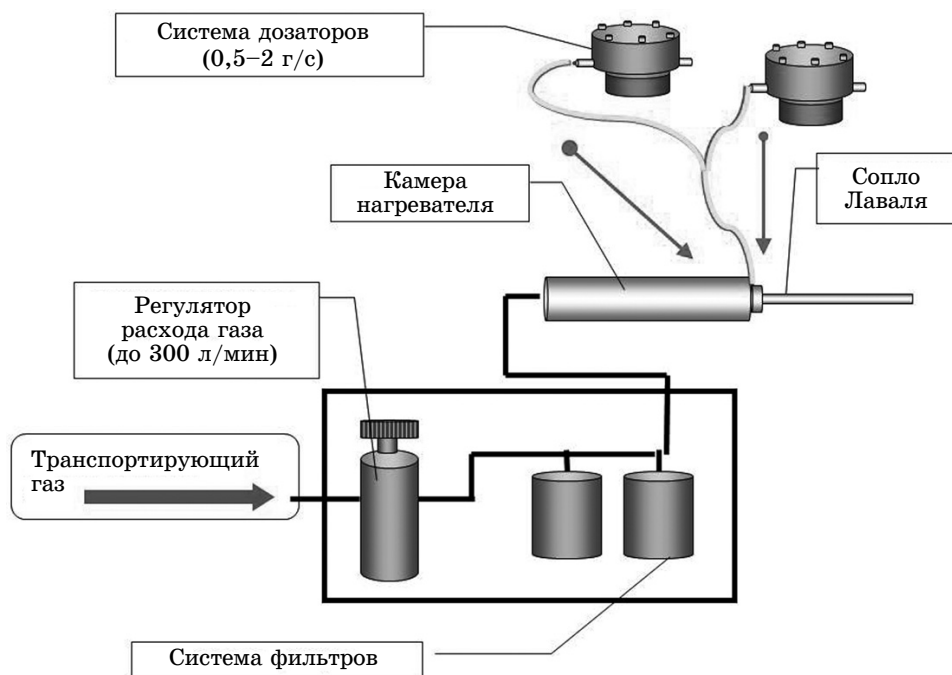


Рис. 2. Схема нанесения покрытия из двух одновременно работающих дозаторов

ческие порошки и их смеси прокаливали. Порошки сушили в сушильном шкафу при температуре выше 100 °С. Порошок упрочняющей компоненты прокаливали в электропечи при температуре выше 300 °С. Для порошковых смесей применяли смеситель типа «пьяная бочка». Порошок, подготовленный к напылению изделий, хранили в сушильном шкафу при температуре 50±5 °С и в дозатор установки загружали непосредственно из сушильного шкафа.

Поверхности, на которые будут нанесены покрытия, тщательно очищают и промывают от масла, грязи и ржавчины с помощью волосяных или металлических щеток уайт-спиритом по ГОСТ 3134. Очистке и промывке подлежат поверхности, прилегающие к напыляемым зонам на расстоянии не менее

50 мм, а также поверхности со следами масла. Поверхностям, подлежащим напылению, придают шероховатость струйно-абразивной обработкой.

Для нанесения покрытий используется сжатый воздух по ГОСТ 9.010.

На первой стадии предварительно вводят в сверхзвуковой поток воздуха армирующие неметаллические ультрадисперсные частицы Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (фракцией от 0,1 до 0,5 мкм из первого дозатора) и проводят обработку поверхности напыляемого изделия до образования ювенильной поверхности (скорость гетерофазного потока свыше 300 м/с), после чего первый дозатор отключают. На второй стадии при скоростях гетерофазного потока свыше 370 м/с (табл. 1) на ювенильную поверхность напыляемого изделия наносят порошок основы для

Таблица 1

Свойства покрытий, получаемых путем нанесения при различных режимах порошковых смесей различного состава

Порошковая композиция	Режимы напыления					Свойства получаемого покрытия		
	Давление сжатого воздуха, атм	Скорость гетерофазного потока, м/с	Температура сжатого воздуха, °С	Расход порошка, г/с	Расход сжатого воздуха, м <sup>3</sup> /мин	Твердость НВ	Адгезия, МПа	Толщина покрытия, мкм
Al—Zn—Sn+Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5	400–450	200	0,1–0,5	0,25–0,30	330–370	50–55	50–1000
Al—Zn—Sn+WC/Co	6	450–500	220	0,1–0,4	0,23–0,28	430–470	48–51	50–700
Al—Zn—Sn+Cu	4,7	370–410	170	0,2–0,6	0,25–0,30	280–350	60–65	50–1000
Fe—Cr—Al+Cu	5,8	580–620	320	0,3–0,9	0,25–0,30	370–400	55–60	50–1000

получения промежуточного слоя из второго дозатора. На третьей стадии производят нанесение покрытия из одновременно работающих двух дозаторов при увеличении содержания  $Al_2O_3$ , WC/Co или Cu в покрытии в пределах от 1,0 до 30,0 объем. % по линейной или иной зависимости, скорость при этом составляет от 400 до 650 м/с. Схематическое изображение напыления представлено на рис. 2. Реализация такой схемы нанесения позволяет получать покрытия с приведенными в табл. 1 свойствами.

При отработке режимов напыления установлено, что оптимальное расстояние от среза сопла до подложки составляет 20–25 мм. При этом достигается равномерность покрытия в радиусе 5–7 мм, при меньших расстояниях возможно перекрытие воздушного потока, что может привести к нарушению работоспособности оборудования. Кроме того, при расстояниях менее 5 мм и более 30 мм снижается эффективность использования порошка. Скорость сканирования выбирают из расчета получения покрытия толщиной 0,4–0,5 мм за один проход. В среднем она составляет 0,35 м/мин. Рабочие порошки обладают различной сыпучестью, и настройка производительности питателя (количество порошка, выдаваемого питателем в единицу времени в тракт подачи порошка в сопло) осуществляется индивидуально для каждого порошка. Необходимая скорость газового потока обеспечивалась давлением воздуха на входе установки 0,6 МПа, температурой газового потока 450 °С. Температура частиц при этом не превышает 110 °С. При напылении покрытий ось сопла ориентируется перпендикулярно к обрабатываемой поверхности, так как при отклонении от этого направления уменьшается эффективность напыления. При отклонении от перпендикуляра в пределах 10° наблюдается незначительное уменьшение эффективности.

Исследования микроструктуры и пористости по микрофотографиям показали, что покрытия становятся более однородными по своей структуре, пористость уменьшается и появляются области с повышенной твердостью при введении армирующих компонентов. Характерная микрофотография шлифа покрытия представлена на рис. 3.

Для более детального изучения нанесенных покрытий был использован исследовательский комплекс НаноСкан-3D — прибор, сочетающий в себе функции твердомера и сканирующего зондового микроскопа [63]. Главным отличием НаноСкан-3D является применение

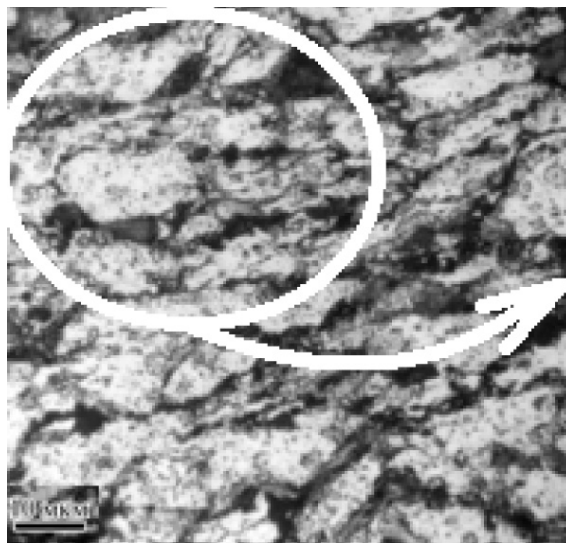


Рис. 3. Микрофотография шлифа покрытия Al—Zn—Sn 30 %  $Al_2O_3$

пьезорезонансного зонда с высокой изгибной жесткостью консоли. Использование режима резонансных колебаний позволяет осуществлять контроль контакта острия зонда с поверхностью по изменению двух параметров: амплитуды  $A$  и частоты  $F$  колебаний зонда. Это позволяет разделить соответственно вязкую и упругую компоненты взаимодействия острия с поверхностью и различать упругую поверхность и вязкое загрязнение на ней, неизбежно возникающее на открытом воздухе, а также измерять механические свойства поверхностей. Высокая изгибная жесткость консоли зонда позволяет проникать сквозь вязкий слой до контакта с упругой поверхностью, а также проводить индентирование и царапание поверхности. В качестве накоенчиков используются алмазные инденторы разных типов.

Измерительная система НаноСкан-3D позволяет измерять топографию и карты механических свойств поверхности на одном ее участке. Это дает возможность сравнивать топографию и распределение механических свойств. Кроме того, НаноСкан-3D позволяет проводить нагружение и царапание поверхности иглой зонда и измерять твердость методами индентирования и склерометрии, а также измерять модуль упругости с использованием уникальной методики силовой спектроскопии. Характерное изображение поверхности шлифа покрытия Al—Zn—Sn 30 %  $Al_2O_3$  представлено на рис. 4. Сравнение рельефа поверхности и карты распределения механических свойств (рис. 5) показывает, что более светлые области на изображении

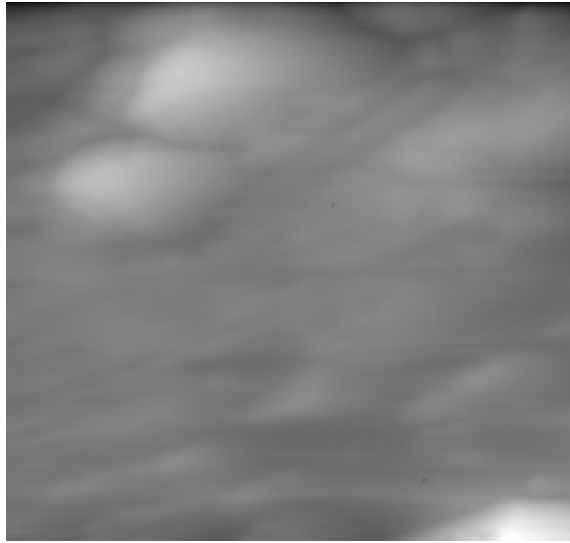


Рис. 4. Рельеф поверхности области, указанной на рис. 3

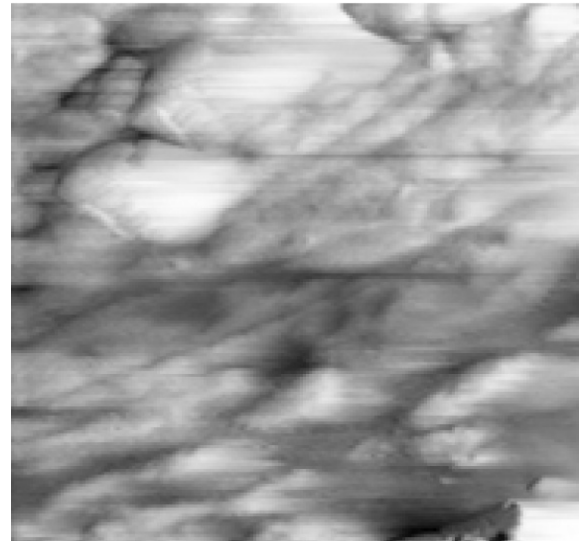


Рис. 5. Карта распределения механических свойств области, указанной на рис. 3

поверхности соответствуют более светлым областям на карте распределения механических свойств, что говорит о наличии неоднородности микротвердости в толще покрытия.

Возможности прибора позволяют построить трехмерную карту поверхности и производить измерения, непосредственно привязываясь к топографии. Характерное изображение поверхности представлено на рис. 6.

Возвышения и впадины на поверхности покрытия соответствуют более твердой и более мягкой фазам, которые неравномерно вышлифовываются при изготовлении шлифа.

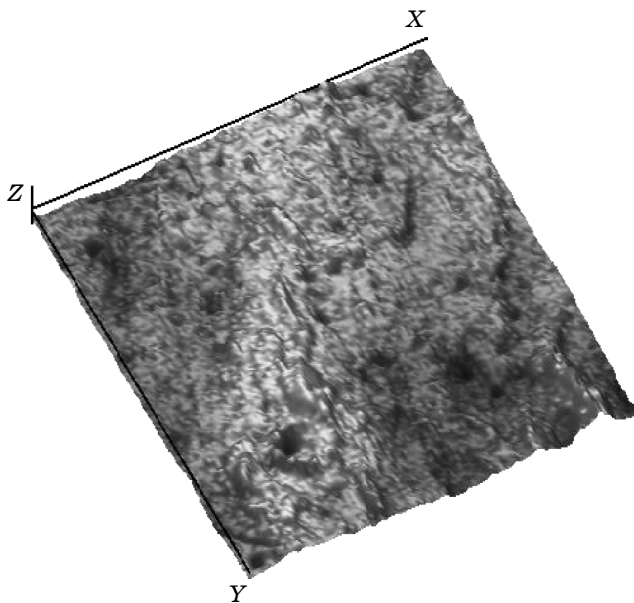


Рис. 6. Трехмерная карта поверхности покрытия Fe—Cr—Al+Cu

Исследования микротвердости доказывают неоднородность композиционного покрытия по свойствам, а следовательно, наличие двухфазной структуры. Причем разница в процентном содержании армирующих компонентов не влияет на наличие или на отсутствие зон с различной микротвердостью.

**Микротвердость, ГПа, покрытий, измеренная с помощью НаноСкан-3D**

Al—Zn—Sn+Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> :	
матрица . . . . .	0,59
армирующий компонент . . . . .	2,14
Al—Zn—Sn+WC/Co:	
матрица . . . . .	0,59
армирующий компонент . . . . .	4,59
Al—Zn—Sn+Cu:	
матрица . . . . .	0,59
армирующий компонент . . . . .	1,64
Fe—Cr—Al+Cu:	
матрица . . . . .	1,26
армирующий компонент . . . . .	1,64

**Заключение**

Проведенные исследования показывают универсальность технологии сверхзвукового ХГДН. Возможность регулировать твердость напыляемого покрытия путем введения армирующих компонентов является неоспоримым преимуществом представленного метода.

По отработанной технологии можно производить ремонт и восстановление ответственных деталей и узлов (примеры на рис. 7). К перспективным областям практического использования предложенной технологии также относятся: элементы ГТД, пары трения,





Рис. 7. Примеры ХГДН: а — райзеры для морских буровых платформ с защитным покрытием; б — антифрикционное покрытие на подшипниках скольжения для морской техники

ротора электродвигателей, детали металлургического оборудования и т. д.

Ожидаемая экономическая эффективность от применения разрабатываемой технологии должна обеспечиваться вследствие кардинального улучшения потребительских и эксплуатационных свойств (коррозионная стойкость, износостойкость) изделий за счет использования в качестве основы экономичных конструкционных сталей и функциональных покрытий с улучшенными характеристиками.

Технология ХГДН может успешно реализовываться при восстановлении посадочных поверхностей под подшипники корпусных де-

талей, герметизации трещин блоков двигателей, пневматических и гидравлических трубопроводов, баков, радиаторов и испарителей холодильников, автокондиционеров, теплообменников, а также при нанесении функциональных покрытий для защиты от коррозии и т. д.

*Работа выполнена в рамках договора о партнерстве с Лаппеенрантским технологическим университетом «Развитие материалов и технологий для Арктики» от 01.02.2012 г.*

### Литература

1. Фармаковский Б. В., Улин И. В. Функциональные материалы и покрытия — пути и надежды // По пути созидания. Т. 2. СПб.: ЦНИИ КМ «Прометей», 2009. С. 149–163.
2. Джуринский Д. В. Разработка методики исследования и оптимизация технологии сверхзвукового «холодного» газодинамического напыления при консолидации алюминиевых конструкций // Вопр. материаловедения. СПб. 2004. № 1. С. 41–48.
3. Разработка технологических подходов получения наноструктурированных композиционных порошков методом сверхскоростного механосинтеза / Н. В. Маренников, Д. А. Геращенко, Е. Ю. Бурканова, Е. А. Самоделькин // Вопр. материаловедения. 2010. № 2. С. 64–67.
4. Юрков М. А., Васильев А. Ф., Геращенко Д. А. Разработка технологических процессов свехзвукового гетерофазного переноса для получения наноматериалов в виде покрытий широкого спектра применения: сб. докл. Междунар. науч.-практ. симп. «Наноструктурные функциональные покрытия для промышленности» в рамках Харьковской нанотехнологической ассамблеи. Т. 1. Харьков: ННЦ «ХФТИ»; ИПП «Контраст», 2006. 251 с.
5. Пат. RU 2362839 С1. Способ нанесения наноструктурированных износостойких электропроводящих покрытий / Б. В. Фармаковский, Р. Ю. Быстров, А. Ф. Васильев [и др.].
6. Гоголинский К. В., Львова Н. А., Усеинов А. С. Применение сканирующих зондовых микроскопов и нанотвердомеров для изучения механических свойств твердых материалов на наноуровне (обобщающая статья) // Завод. лаборатория. Диагностика материалов. 2007. Т. 73, № 6. С. 28–36.