

## НАНЕСЕНИЕ ТОНКИХ СЛОЕВ ПОКРЫТИЯ МЕТОДОМ ВЗРЫВНОГО ИМПУЛЬСНОГО НАПЫЛЕНИЯ

В.И. Овчинников<sup>1</sup> О.П. Реут<sup>2</sup>

<sup>1</sup>ОХП НИИ ИП с ОП ГНУ ИПМ НАН Беларуси

<sup>2</sup>ИПК и ПК БНТУ

г. Минск, Республика Беларусь

*В работе отражено экспериментальное изучение возможностей нанесения покрытий на поверхность сталей и нанопорошковых слоев на внутренние поверхности трубчатых материалов из частично ионизированных потоков порошковых смесей оксида алюминия и фуллерена  $C_{60}$  методом импульсного динамического нагружения с использованием взрывного заряда.*

**Ключевые слова:** взрыв, импульс, наночастицы, поток частиц, массоперенос, поверхность, покрытие, микроструктура

## APPLICATION OF THIN LAYERS OF COATINGS BY EXPLOSIVE PULSED SPRAYING

V. I. Ovchinnikov<sup>1</sup> O. P. Reut<sup>2</sup>

<sup>1</sup>OCHP research Institute IP s OP GNU IPM NAS of Belarus

<sup>2</sup>IPK and PC BNTU

Minsk, Belarus

*The paper reflects an experimental study of the possibility of coating the surface of steels and nanopowder layers on the inner surfaces of tubular materials from partially ionized streams of powder mixtures of aluminum oxide and fullerene  $C_{60}$  by pulsed dynamic loading using an explosive charge.*

**Keywords:** the explosion, the momentum, nanoparticles, particle flow, mass transfer, surface coating, microstructure

**E-mail:** OvchinnikovVI@yandex.ru

### Введение

Основой концепции моделирования и создания технологии обработки поверхности деталей с применением энергии взрыва, является комплексный подход, заключающийся в реализации рационального сочетания деформационного (Д) (ударно-волнового) воздействия, обработки высокоскоростным потоком частиц (ВПЧ) и неидеальной плазмы (НП) их комбинирования с определением механизмов формирования

поверхностного слоя материалов по оценкам прочности, напряженного состояния и микрогеометрии поверхности.

Как известно, нанесение покрытий на внутренние поверхности трубчатых материалов с соотношением внутреннего диаметра к длине 1:5 и более, способами ионноплазменного, газопламенного напыления и другими аналогичными, практически невозможно. Решение подобной задачи возможно с применением взрывных импульсных технологий использующих для разгона потоков микро- и наночастиц кумулятивные взрывные ускорители построенные на использовании в качестве энергоносителя энергии взрывчатых веществ (ВВ). В результате подрыва кумулятивного заряда происходит образование высокоскоростного потока, состоящего из частично ионизированной плазмы продуктов взрыва (неидеальной плазмы) и вводимых порошковых частиц. Поток частиц ускоренный взрывным ускорителем до скоростей 800–1200 м/с способен проникнуть в полость трубки на всю ее длину, а в результате прохождения прямой и отраженных ударных волн их колебаний внутри трубки частицы порошка распределяются на стенках трубки в виде слоя (покрытия) толщиной до 60 мкм.

### **1. Анализ возможных вариантов обработки**

Анализ возможных вариантов обработки поверхности высокоскоростными потоками микрочастиц с применением энергии взрыва показал, что совокупность схем обработки основана на четырех основных вариантах:

1-й вариант проявляется при параллельном развитии процессов схема (Д-НП), с образованием аморфного поверхностного слоя обрабатываемого материала, толщиной 10–30 мкм.

2-й вариант реализуется при параллельном введении в зону обработки высокоскоростного потока частиц порошка, ускоренного энергией взрыва по схеме (Д-ВПЧ), с образованием на обрабатываемой поверхности материала слоя защитного покрытия из частиц порошка.

3-й вариант проводится при последовательном введении процессов в зону обработки. Первоначально проводится обработка по схеме (Д-НП), в результате в материале формируется поверхностный слой с высокой степенью деформации с неравновесным атомно-вакансионным состоянием структуры, затем производится обработка по схеме (Д-ВПЧ), в общем случае реализуется процесс по схеме (Д-НП) + (Д-ВПЧ). На поверхности образовавшегося деформационного слоя полученного по первому варианту, формируется слой защитного покрытия толщиной 30–40 мкм с микроструктурой, зависящей от размеров, состава применяемого порошка и технологических условий реализации процесса.

4-й вариант предполагает совмещение всех процессов и достигается при сочетании схемы (Д-НП) с процессом по схеме (Д-ВПЧ) в результате получаем комбинированную схему (Д-НП-ВПЧ), в структурном сочетании одновременного формирования поверхностного слоя обрабатываемого материала и защитного покрытия из материала порошка.

### **2. Метод и материалы эксперимента**

Обработка образцов производилась с применением установки (рис. 1) с взрывным ускорителем. В качестве взрывчатого вещества использовался аммонит 6ЖВ. Фоновое давление составляло порядка 2 ГПа, время воздействия ~100 мкс. В первом случае в качестве частиц применяли порошки SiC, фракции 5–10 мкм. Модельными образцами служили стали 10, 40. Во втором качестве частиц применяли смесь нанопорошков  $Al_2O_3$  и фуллерена  $C_{60}$  фракции 50–200 нм. Модельными образцами

служили титановые трубки длиной  $L = 80$  мм, внутренним диаметром 12 мм, наружным диаметром 16 мм, толщиной стенки 2 мм. Микроструктуру образцов до и после обработки исследовали на микроскопах "Метам – 21", электронном микроскопе "Camscan", элементный и фазовый состав определяли методами микрорентгеноспектрального и рентгенофазового анализа.

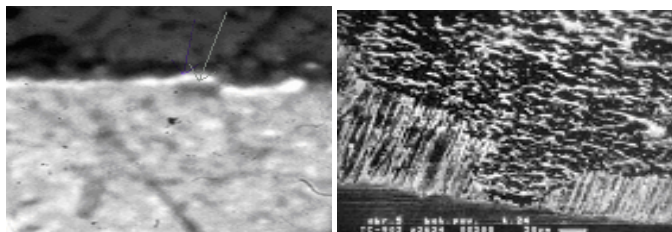


Рис. 1. Установка обработки материалов потоком микрочастиц

### 2.1. Результаты исследования и их обсуждение

При обработке поверхности сталей высокоскоростным потоком неидеальной плазмы продуктов взрыва в результате диффузии ионов азота, углерода и кислорода образуется поверхностный слой толщиной 30–40 мкм с измененной структурой и фазовым составом. Структура поверхностного слоя, формирующаяся при обработке потоком неидеальной плазмы, состоит из двух зон: поверхностной (верхний слой) – в виде белой нетравящейся полосы и диффузионного подслоя с выделениями в объеме зерен игл нитридов  $Fe_4N$  (рис. 2).

Поверхностный слой



а

б

Основа мишени

Рис. 2. Структура поверхностного слоя:

а – верхний слой по стрелке,  $\times 500$ , б – карбонитридный слой,  $\times 1000$

Согласно результатам рентгеноструктурного анализа на поверхности стали 40 в процессе соударения с потоком неидеальной плазмы взрыва, образуется слой с фазовым составом карбонитридного характера:  $\varepsilon$ -  $Fe_{2-3}(N, C)$ ,  $\gamma$  и  $\gamma'$  - фазы,  $Fe_3C$ ,  $Fe_3N$ . Испытания на твердость показали, что карбонитридная  $\varepsilon$ -фаза, полученная при одновременной диффузии в сталь азота и углерода, по сравнению с чисто азотистой менее хрупка, обладает повышенной твердостью (HV 400–450) и высокой износостойкостью.

### 2.2. Результаты обработки трубчатых изделий

Высокоскоростным потоком микрочастиц порошка  $Al_2O_3$ , с размером частиц 1–20 мкм проводили обработку трубчатых изделий с внутренним диаметром 20 мм и длиной 100 мм из стали и титана. В результате исследования установлено, что покрытие на внутренней поверхности имеет наибольшую толщину (порядка 20–30 мкм) в начале трубки, где поток неидеальной плазмы взрыва и смеси порошковых микрочастиц имеет

максимальную плотность, далее идет перераспределение плотности потока. Передняя часть потока провзаимодействовав со стенкой трубки, осаждает определенную долю частиц на ее поверхности. Под действием остальной части потока, формирующей ударные волны на поверхности преграды, происходит перемешивание материала нанесенного слоя и приповерхностной части материала трубки, находящегося в неравновесном состоянии. Данное перемешивание осуществляется на атомарном уровне, что становится возможным в результате термического и ударного разрушения, расплавления или химического разложения материала трубки и напыляемого порошка. Результаты такого перемешивания зависят от параметров ударной волны, нагружающей границу контакта, физико-механических характеристик материалов частицы и трубки, их состояния перед взаимодействием и т.д. На рис. 3, а представлена микроструктура покрытия нанесенного на внутреннюю поверхность титановой трубки.

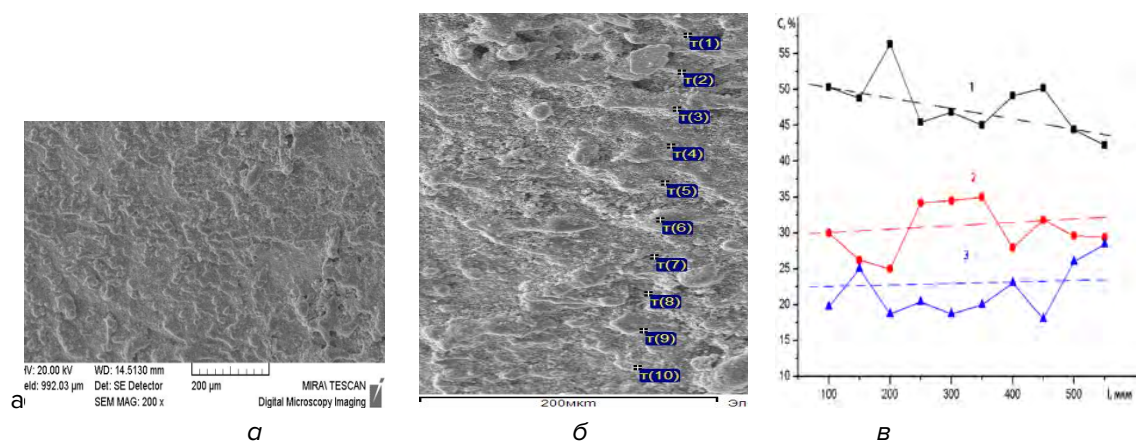


Рис. 3. Микроструктура покрытия на внутренней поверхности титановой трубки: а – структура покрытия; б – микрорентгеноспектральный точечный анализ; в – распределение: 1–Ti, 2–Al, 3–C

Результаты проведенного микрорентгеноспектрального анализа (рис. 3, в) в различных точках с поверхности покрытия (рис. 3, б), наличие и распределение по поверхности элементов соответствующих наносимым частицам порошков подтверждают возможность нанесения покрытия на внутреннюю поверхность трубок.

### 3. Механизмы взаимодействия ионизированного газово-порошкового потока с поверхностью мишени

Взаимодействие ионизированного газово-порошкового потока с преградой характеризуется диффузией и массопереносом в материале преграды, который, по крайней мере, в верхних поверхностных слоях мишени может протекать по трем основным механизмам:

1-й, адсорбция, хемосорбция и проникание в процессе диффузии ионов азота, углерода, кислорода плазмы в материал стальной преграды с образованием модифицированного поверхностного слоя;

2-й, массоперенос дискретных микрочастиц под действием инерционных сил в квазижидкий (расплавленный) материал преграды [1,2];

3-й, массоперенос путем полного или частичного перемешивания материалов покрытия и основы на атомарном (или молекулярном) уровне [3,4].

В результате взаимодействия высокоскоростного потока микрочастиц с преградой происходит частичное проникание микрочастиц в материал преграды на глубину 1–10 мм в зависимости от скорости микрочастиц и материала преграды [2]. Проникание частиц сопровождается потерей массы последних. Материал частицы перемешивает-

ся в зоне канала с квазижидким, разупрочненным материалом преграды, создавая область, агрегатное состояние, которой определяется частичной или полной деструктуризацией. Есть основания утверждать, что именно наличие подобных областей, а также зон высокой дефектности вблизи канала и обуславливает собой значительное изменение механических свойств образца [5].

Передняя часть потока провзаимодействовав с преградой, осаждает определенную долю частиц на его поверхности. Под действием остальной части потока, формирующей ударные волны на поверхности преграды, происходит перемешивание материала нанесенного слоя и приповерхностной части материала преграды, находящегося в неравновесном состоянии. Данное перемешивание осуществляется на атомарном уровне, что становится возможным в результате термического и ударного разупрочнения, расплавления или химического разложения материала преграды и напыляемого порошка. Результаты такого перемешивания зависят от параметров ударной волны, нагружающей границу контакта, физико-механических характеристик материалов частицы и преграды, их состояния перед взаимодействием и т.д.

### **Выводы**

Комплексное воздействие ионизированного газово-порошкового потока в режиме динамического легирования, характеризующееся диффузией и массопереносом в материале преграды из стали, позволяет модифицировать поверхность изделия с образованием поверхностного слоя ~30–40 мкм с фазовым составом карбонитридного характера и износостойкостью в 1,4–1,8 раза выше, чем у исходной. Показано, что методом ударно-волнового нагружения возможно получение покрытий на внутренние поверхности трубчатых изделий.

### **ЛИТЕРАТУРА**

1. Отчет «Разработать модель процесса обработки сталей высокоскоростным потоком частиц порошка и неидеальной плазмы» НИИ ИП с ОП БГНПК ПМ НАНБ. – Минск, 2004. – 17с.
2. Анализ Эффекта сверхглубокого проникания в условиях высоких давлений / С.К. Андилевко [и др.] // Изменение свойств материалов под действием высоких давлений. Сб.научн. трудов –Киев: ИПМ АНУССР, 1986, с.134–138.
3. Сверхглубокое проникание частиц порошка в металлическую преграду в условиях переменного по ее толщине поля давлений / С.К. Андилевко [и др.] // Порошковая металлургия. – Минск: Высшая школа, 1987, Вып. 11. – с.6–11.
4. Зворыкин, Л.О. Подвижность атомов в металлах при прохождении ударных волн / Л.О. Зворыкин, В.М. Фальченко // Применение высоких давлений для получения новых материалов и создания интенсивных процессов химических технологий. Тез. докл. – Москва, 1986, ч.1. – С. 23..
5. Ворошнин, Л.Г. Упрочнение быстрорежущей стали Р6М5 при динамическом микролегировании термической обработки / Л.Г. Ворошнин, В.Г. Горобцов, В.А. Шилкин. –ДАН БССР, 1985, XXIX–№1,с.57–58.

### **REFERENCES**

1. The report, "to Develop a model of the process of steel processing, high-speed flow of powder particles and nonideal plasma" research Institute SP with OP BGNP PM of NASB, Minsk, 2004, 17 p. (in Russian)
2. Andilevko S. K., Roman O. V., Usherenko S. M., Romanov. C. analysis Of the effect of ultra-deep penetration at high pressures. In the book.: Changing the properties of materials under high pressures. SB.nauchn. papers – Kiev: IPM, ANOSR, 1986, pp. 134–138. (in Russian)
3. Andilevko S. K., Roman O. V., Usherenko S. M., Romanov.C. ultra-Deep penetration of powder particles into the metal barrier in conditions of variable thickness of the pressure field.– Powder metallurgy Mn.: Higher school–1987, Vol.11, pp. 6–11. (in Russian)
4. Zworykin L. O.,Filchenkov. M., Mobility of atoms in metals during the passage of shock waves.– In the book.: Application of high pressures to produce new materials and to create intensive processes of chemical technology. Texas. Dokl. Moscow, 1986, part 1, p. 23. (in Russian)
5. Voroshnin L. G., Gorobtsov V. G., Shilkin V. A. Strengthening of high-speed steel R6M5 with dynamic microleaching heat treatment. DAN BSSR, 1985, XXIX, No. 1, p. 57–58. (in Russian)

*Статья поступила в редакцию в окончательном варианте 25.04.18*