

УДК 621.793.71

## ИССЛЕДОВАНИЕ АДГЕЗИИ ПОКРЫТИЙ, ПОЛУЧЕННЫХ ВЫСОКОСКОРОСТНЫМ ГАЗОПЛАМЕННЫМ НАПЫЛЕНИЕМ

В.А. Клименов\*\*, Ж.Г. Ковалевская\*., К.В. Зайцев, А.И. Толмачев\*

Юргинский технологический институт ТПУ

\*Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, г. Томск

\*\*Томский политехнический университет

E-mail: klimenov@tpu.ru

*Проанализированы особенности адгезии покрытий на основе никеля, полученных высокоскоростным напылением на стальную основу с различной поверхностной морфологией. Показано, что ультразвуковая финишная обработка создает на поверхности основы волнистый субмикрорельеф, обеспечивающий формирование надежной адгезионной связи между покрытием и основой. Ультразвуковая финишная обработка предлагается как способ подготовки поверхности перед высокоскоростным газопламенным нанесением покрытий.*

### Введение

В последние 10–15 лет в мировой практике активно развивается и совершенствуется высокоскоростной способ формирования газотермических покрытий, получивший название «High-Velocity-Oxygen-Fuel» – высокоскоростное кислородное газопламенное напыление [1–3]. По сравнению с газопламенным и плазменным методом, процесс высокоскоростного газопламенного напыления обладает рядом преимуществ. Покрытия, полученные этим методом, отличаются высокой плотностью, адгезионной и когезионной прочностью, мелкодисперсной и гомогенной микроструктурой, низкими остаточными напряжениями [1]. Окисление высокоскоростных газопламенных покрытий при высоких температурах гораздо меньше, чем у дозвуковых [3]. Значения плотности и адгезионной прочности таких покрытий соизмеримы с детонационными и значительно превышают эти характеристики плазменных покрытий [1, 3].

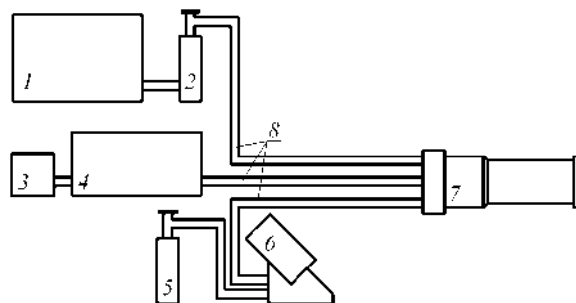
Имеющееся современное оборудование, расположенное на Юргинском машиностроительном заводе, позволило разработать технологию по созданию штока гидроцилиндров крепей шахтных комплексов с упрочняющими покрытиями. Однако контроль качества получаемых покрытий не дал полной картины взаимосвязи между параметрами процесса, формируемой структурой и свойствами покрытий. Поэтому целью данной работы стало исследование характера взаимодействия покрытия с основой при различных способах подготовки поверхности перед напылением.

### 1. Материалы и методы исследования

Покрытие наносили при помощи высокоскоростной газопламенной установки, предназначенной для нанесения износостойких, жаростойких, теплозащитных и мягких уплотнительных покрытий [3], рис. 1.

Установка включает: горелку, порошокпитатель, испаритель, панель управления и ряд вспомогательных устройств. Конструктивно горелка состоит из четырех основных частей: камеры сго-

рания в сборе, распределителя смеси газов, распределителя «вторичного» пропана, корпуса сопла в сборе. Питатель порошка обеспечивает точное дозирование и непрерывную подачу порошка в горелку. Подача порошка происходит под давлением транспортирующего газа, в качестве которого могут выступать азот или аргон. Испаритель служит для фазового превращения пропана. Внутри испарителя происходит подготовка пропана по нужным параметрам давления и температуры. Процесс напыления выполняется в автоматическом режиме. Панель управления с сенсорным экраном обеспечивает дистанционную настройку, регулирование и стабильность параметров процесса.



**Рис. 1.** Схема установки: 1) газовый баллон (пропан); 2) испаритель; 3) компрессор; 4) ресивер; 5) газовый баллон (азот); 6) порошокпитатель; 7) горелка; 8) шланги и кабели

Технические характеристики установки: скорость истечения струи газа на срезе сопла горелки 800 м/с; расход горючего газа (пропан) 250 л/мин; расход транспортирующего газа (азот) 40 л/мин; расход окислителя (сжатый воздух) 7...9 м<sup>3</sup>/мин; производительность при напылении металлов и сплавов до 18 кг/ч; толщина напыляемого слоя 0,03...10 мм; пористость покрытия менее 1,0 %; суммарная потребляемая электрическая мощность не более 5 кВт.

В качестве напыляемого материала применяли порошок на основе никеля марки ПР-Н65Х25С3Р3 (Fe – 5 мас. %; С – 1,5 мас. %; Cr – 26 мас. %; Si – 2,3 мас. %; В – мас. 3 %; Ni – остальное) с размером частиц 30...50 мкм [4]. Напыление образцов

осуществлялось при дистанции напыления – 200 мм; с углом напыления  $90^\circ$ ; линейной скоростью перемещения горелки 21 мм/с. Покрытие формировалось послойно толщиной 500...800 мкм на цилиндрических образцах из стали 20.

Предварительная подготовка поверхности осуществлялась несколькими способами. Токарная обработка проводилась на станке ТУМ-35 при числе оборотов шпинделя – 900 об/мин и подаче – 0,07 мм/об. Последующее шлифование производилось на этом же станке с использованием наждачной бумаги Mirka esowet зернистостью P1000. Ультразвуковая обработка проводилась устройством для ультразвуковой финишной обработки УЗГК-02 мощностью 200 Вт; усилием прижима индентора 70...75 Н; частотой колебаний индентора 24 кГц. Число оборотов шпинделя токарного станка составило 100 об/мин; подача 0,2 мм/об [5]. Струйно-абразивную обработку проводили в специальной камере дробеструйным аппаратом, который направляет на обрабатываемую поверхность в струе сжатого воздуха с давлением 0,5...0,6 МПа и скоростью 15...30 м/с частицы электрокорунда зернистостью 1,5...2 мм.

Приведенные исследования основаны на оптическом анализе морфологии поверхности с большой точностью измерений, который проводился на профилометрическом комплексе MICRO MEASURE 3D station. Было исследовано состояние поверхности основы до напыления и после отрыва покрытия. С помощью графической программы оценена площадь очагов схватывания основы с покрытием [6].

## 2. Результаты и их обсуждение

При проведении газотермического напыления на воздухе большое значение имеет предварительная подготовка поверхности детали перед напылением, так как состояние поверхности определяет качество адгезионной связи на границе раздела «покрытие-основа» [7–10]. Высокоскоростное напыление задает особые условия осаждения частиц материала на подложку со сверхвысокими скоростями, что обеспечивает высокое напорное давление при растекании частиц о подложку, а значит, не требует сложной морфологии поверхности основы. Исходя из выше сказанного, в работе предлагается несколько способов подготовки поверхности перед напылением. После точения, наряду с классическим методом струйно-абразивной обработки поверхности, предложен способ подготовки поверхности шлифованием и ультразвуковой финишной обработкой. Ультразвуковая финишная обработка заключается в пластическом деформировании поверхностных слоев основы инструментом, колеблющимся с ультразвуковой частотой [5]. Формирующийся при ультразвуковой обработке ячеистый микрорельеф, мелкозернистая, с высокой плотностью дефектов кристаллического строения структура поверхностного слоя и внутренние напряжения сжатия могут обеспечить надежную адгезионную связь [11].

Рельеф поверхности после токарной обработки имеет определенную периодичность, заданную режимами точения, рис. 2, а. Результаты профилометрического анализа показали, что шаг неровностей по вершинам составляет 0,13 мм с высотой  $R_{\max} \sim 9$  мкм, шероховатость  $R_a = 1,15$  мкм, рис. 2, б. Морфология поверхности определяется качеством точения.

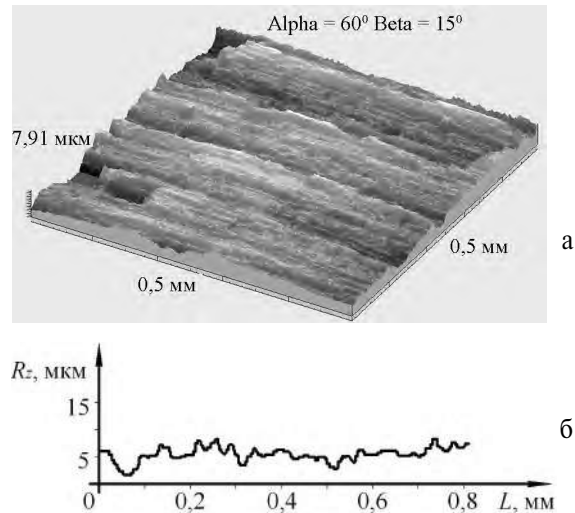


Рис. 2. Состояние поверхности образцов из стали 20 после точения: а) морфология; б) профилограмма

Как показали результаты профилометрического анализа, поверхность образца после струйно-абразивной обработки представлена морфологией, состоящей из совокупности кратеров, оставленных частицами корунда после удара о поверхность, рис. 3, а.

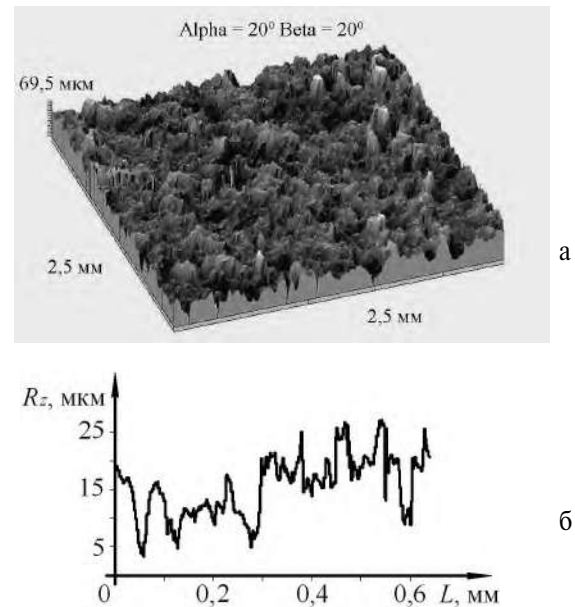


Рис. 3. Состояние поверхности образцов из стали 20 после струйно-абразивной обработки: а) морфология; б) профилограмма

В процессе многократного воздействия частиц абразива на поверхность образца, происходит выравнивание ее шероховатости ( $R_a = 4,38$  мкм), за счет откалы-

вания первичных микровыступов и наложения кратеров друг на друга, рис. 3, б. Получаемый рельеф имеет зубчатое строение с высотой выступов до 34 мкм.

После точения и шлифования выступы микронеровностей сглаживаются до  $R_{\max} \sim 6$  мкм, за счет чего увеличивается опорная поверхность. Шероховатость снижается до  $R_a = 0,85$  мкм, рис. 4.

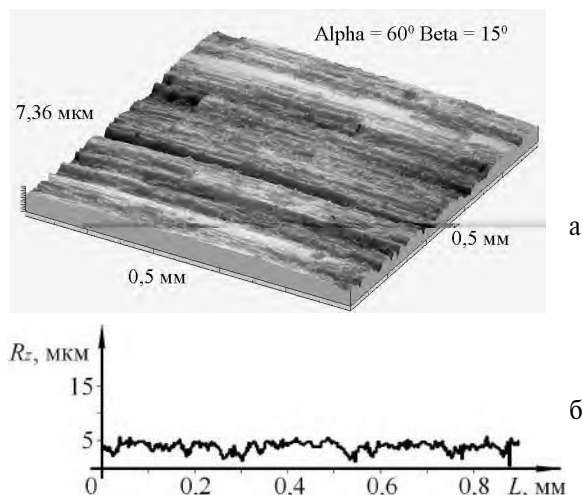


Рис. 4. Состояние поверхности образцов из стали 20 после шлифования: а) морфология; б) профилограмма

Ультразвуковая финишная обработка приводит к формированию на поверхности основы микрорельефа, обусловленного относительным движением выглаживающего инструмента и образца ( $R_a = 0,7$  мкм), рис. 5. Формируемый профиль микронеровностей в направлении подачи инструмента имеет волнистое строение с шагом неровностей 0,2 мм и высотой  $R_{\max} \sim 4$  мкм. Вдоль движения инструмента формируется субмикрорельеф задаваемый многократным прерывистым импульсным воздействием инструмента. Периодичность формируемого субмикрорельефа составляет около 5 мкм, рис. 5, б.

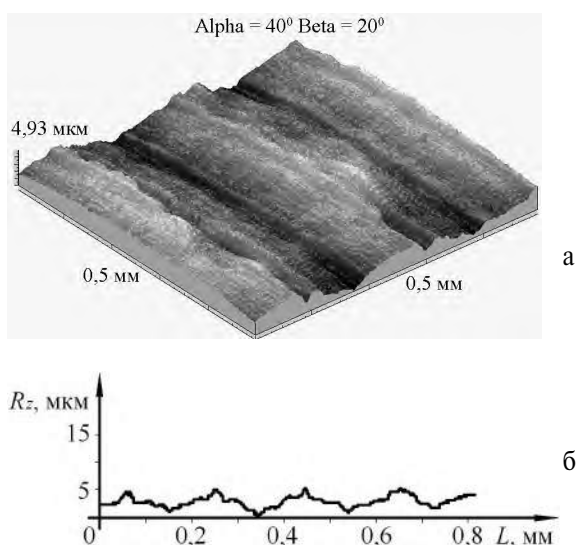


Рис. 5. Состояние поверхности образцов из стали 20 после ультразвуковой финишной обработки: а) морфология; б) профилограмма

На основе проведенного профилометрического анализа установлено, что максимальная эффективная площадь контакта поверхности формируется при струйно-абразивной обработке основы. Рельеф поверхности в этом случае представлен совокупностью зубчатых выступов, неориентированных в пространстве. После шлифования и ультразвуковой финишной обработки максимальная эффективная площадь контакта поверхности меньше и примерно одинакова. Однако геометрия формируемых профилей сильно отличается. После шлифовки на поверхности образцов сохраняются направленные следы режущего инструмента, не удаленные в процессе шлифования и образующие острые риски. После ультразвуковой финишной обработки рельеф поверхности точения сглаживается, и формируется субмикрорельеф, состоящий из следов множественных ударов ультразвукового инструмента.

После механического отрыва напыленного покрытия с исследуемых поверхностей был проведен повторный профилометрический анализ с оценкой площади очагов схватывания покрытия с основой.

Во всех случаях, при отрыве покрытия от основы поверхность имеет следующий вид: очаги схватывания напыляемых частиц с основой чередуются с зонами вторичного окисления. На профилограммах наблюдается увеличение совокупного значения шероховатости за счет выступов, сформированных напыленными частицами, оставшимися после отрыва покрытия, рис. 6.

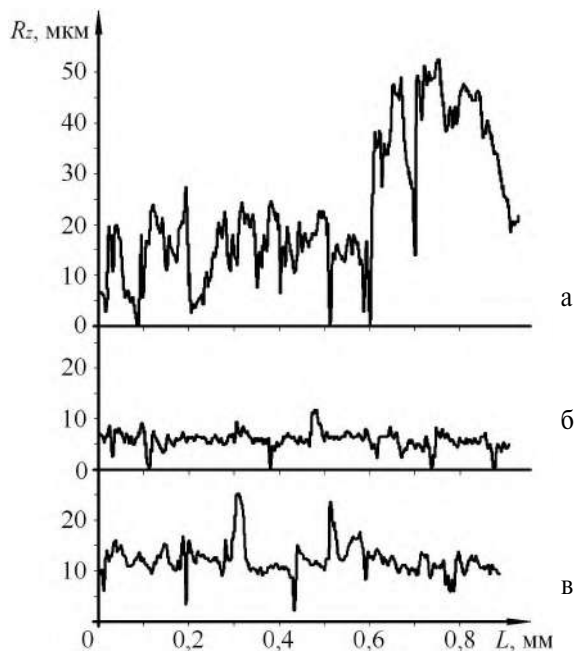


Рис. 6. Профилограммы поверхности основы после отрыва покрытия: а) струйно-абразивная обработка; б) шлифование; в) ультразвуковая финишная обработка

Значение совокупной шероховатости включает в себя шероховатость участков, имеющих исходный рельеф и покрытых не оторвавшимися частицами.

Таким образом, по значениям шероховатости поверхности после отрыва покрытия, можно провести качественную оценку адгезии между покрытием и основой, подготовленной разными способами.

На рис. 6, а, представлена профилограмма поверхности основы после отрыва покрытия с предварительной струйно-абразивной обработкой. При сравнении с рис. 3, б, видно, что часть профиля сформирована рельефом основы, а часть – напыленными частицами. Шероховатость получаемой поверхности  $R_a$  составляет 6,99 мкм.

Профили поверхности основы, полученные после отрыва покрытия, нанесенного на шлифованную и обработанную ультразвуковым инструментом поверхность, имеют сложный вид, рис. 6, б, в. По рисунку полученных профилей трудно различить зоны сформированные рельефом основы и напыленных частиц. Однако общая шероховатость в обоих случаях возрастает. Причем на поверхности обработанной ультразвуковым инструментом более чем в два раза.

Количественная оценка адгезии напыленных покрытий была проведена с помощью оценки совокупной площади очагов схватывания напыленных частиц и основы. Известно, что чем больше площадь очагов схватывания напыленных частиц и основы, тем выше адгезионная прочность покрытия [10].

**Таблица.** Результаты оценки адгезии между покрытием и основой

Способ предварительной обработки поверхности	Исходная шероховатость основы $R_a$ , мкм	Шероховатость после отрыва покрытия $R_a$ , мкм	Совокупная площадь очагов схватывания частиц и основы, %
Струйно-абразивная	4,38	6,99	53
Шлифование	0,85	1,05	24
Ультразвуковая финишная обработка	0,7	1,97	38

С помощью графической программы было определено, что при отрыве покрытия, напыленного на основу после струйно-абразивной обработки, площадь очагов схватывания составляет около 53 %, что соответствует высоким показателям адгезионной прочности между покрытием и основой [9, 10]. На поверхности шлифованной основы площадь очагов схватывания составляет около 24 %, а на основе с ультразвуковой обработкой – около 38 %. В таблице представлены результаты по анализу морфологии поверхности образцов после отрыва покрытий и значения совокупной площади очагов схватывания покрытия и основы.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Arvidsson P.E. Comparison of Superalloy Coatings Sprayed with Plasma and HVOF // Powder Metallurgy International. – 1991. – № 3. – P. 176–179.
- Балдаев Л.Х., Шестеркин Н.Г., Лапанов В.А., Шатов А.П. Особенности процессов высокоскоростного газопламенного напыления // Сварочное производство. – 2003. – № 5. – С. 43–46.

Таким образом, оценка состояния поверхности основы после отрыва покрытия показала, что предварительная струйно-абразивная обработка, за счет реализации нескольких каналов активации и увеличения поверхности контакта, приводит к формированию прочной связи на границе композиции «покрытие-основа». Минимальная шероховатость поверхности основы, обработанной ультразвуком, а также формирование волнистого субмикрорельефа и модифицированной структуры поверхностного слоя обеспечивает равномерное воздействие импульсного и напорного давления жидких капель напыляемого материала на основу и способствует реализации механического канала активации на всей поверхности основы [8–10]. Образовавшаяся на границе раздела адгезионная связь между покрытием и выглаженной ультразвуковым инструментом основой соответствует технологическим требованиям.

#### Заключение

На основе проведенного исследования морфологии поверхности основы до и после нанесения покрытия и его отрыва, определено:

- Все исследованные способы подготовки поверхности основы перед напылением: струйно-абразивная обработка, шлифование и ультразвуковая финишная обработка формируют на границе раздела между покрытием и основой качественную адгезионную связь. При этом максимальная площадь очагов схватывания между покрытием и основой формируется на поверхности после струйно-абразивной обработки, а минимальная после шлифования поверхности основы.
- Ультразвуковая финишная обработка создает на поверхности основы волнистый субмикрорельеф и модифицированную структуру, обеспечивающую формирование надежной адгезионной связи между покрытием и основой. Ультразвуковая финишная обработка предлагается как способ подготовки поверхности перед высокоскоростным газопламенным нанесением покрытий.

*Авторы благодарят за помощь в выполнении работы сотрудников Центра по измерению физических и эксплуатационных свойств новых материалов и покрытий Научно-исследовательского института ядерной физики и сотрудников Юргинского машиностроительного завода.*

*Работа выполнена в рамках гранта РФФИ 06-08-01220а.*

- Фролов В.А., Поклад В.А., Рябенко Б.В., Викторенков Д.В. Технологические особенности методов сверхзвукового газотермического напыления // Сварочное производство. – 2006. – № 2. – С. 45–53.
- Борисов Ю.С., Харламов Ю.А., Сидоренко С.Л., Ардатовская Е.Н. Газотермические покрытия из порошковых материалов. Справочник. – Киев: Наукова думка, 1987. – 544 с.

5. Клименов В.А., Каминский П.П., Толстов В.П., Ковалевская Ж.Г., Уваркин П.В. Разработка технологии и оборудования для ультразвуковой обработки бандажей колес локомотивов // Технологии ремонта, восстановления, упрочнения и обновления машин, механизмов, оборудование и металлоконструкции: Матер. 5-ой Междунар. практ. конф.-выставки. – СПб.: Изд-во СПбГПУ, 2003. – С. 199–203.
6. Клименов В.А., Ковалевская Ж.Г., Агафонова Н.С., Толмачев А.И., Зайцев К.В., Иванов Ю.Ф. Ультразвуковое модифицирование – метод подготовки поверхности перед газотермическим напылением // Технологии ремонта, восстановления и упрочнения деталей машин, механизмов, оборудования, инструмента и технологической оснастки: Матер. 8-й Междунар. практ. конф. – СПб., 2006. – Ч. 1. – С. 150–158.
7. Солоненко О.П., Смирнов А.В., Клименов В.А. и др. Роль границ раздела при формировании сплэтов и структуры покрытий // Физическая мезомеханика. – 1999. – Т. 2. – № 1–2. – С. 123–140.
8. Ревун С.А., Балакирев В.Ф. Особенности образования адгезионной связи при газотермическом напылении покрытий // Физика и химия обработки материалов. – 2002. – № 2. – С. 55–62.
9. Синолицин Э.К. Получение прочного сцепления с подложкой при низкоскоростном газопламенном напылении жидких металлических частиц // Физика и химия обработки материалов. – 2002. – № 2. – С. 49–54.
10. Шмаков А.М., Ермаков С.С. Ударное взаимодействие частицы с основой при газотермическом напылении // Физика и химия обработки материалов. – 1986. – № 3. – С. 66–71.
11. Клименов В.А., Нехорошков О.Н., Уваркин П.В., Ковалевская Ж.Г., Иванов Ю.Ф. Структура, фазовый состав и свойства стали 60, подвергнутой ультразвуковой финишной обработке // Физическая мезомеханика. – 2006. – Т. 9. – Спец. выпуск. – С. 173–176.

*Поступила 11.12.2006 г.*