Министерство общего и профессионального образования Российской

федерации

Московский государственный индустриальный университет

На правах рукописи Экз. №

УДК 621.78.062.822:539.4.016.3

Солдатенков Сергей Иванович

Исследование, разработка технологии и оборудования для получения  
покрытий методом холодного газодинамического напыления

Специальность 05.02.01 - "Материаловедение (машиностроение)"

Диссертация

на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель - академик PATH доктор технических наук профессор Курочкин Ю. В. Научный консультант - кандидат технических наук

Демин Ю.Н

МОСКВА-2000

**Содержание**

[**Перечень сокращений и условных обозначений 3**](#bookmark0)

[**Введение 7**](#bookmark1)

Глава 1. Теоретическое исследование процессов •

взаимодействия напыляемого материала с подложкой.

1. [Анализ механизмов формирования покрытия. 22](#bookmark4)
2. Метод определения относительной прочности соединения

[покрытия й подложки на основе теории контактного взаимо­действия тел. 36](#bookmark39)

1. [Анализ влияния параметров напыления и свойств материа­ла частицы и подложки на относительную прочность 43](#bookmark66)

Глава 2. Расчет газодинамических параметров сверхзвукового течения газопорошковой смеси.

1. [Методы расчета двухфазных течений. 52](#bookmark72)
2. Результаты расчета параметров сверхзвукового сопла для

[ускорения газопорошковой смеси. 57](#bookmark71)

Глава 3. Экспериментальное оборудование и методики измерений.

1. [Экспериментальная установка и методики измерений. 64](#bookmark93)
2. Промышленная установка ХГН 68

Глава 4. Свойства покрытий, полученных газодинамическим напылением.

1. [Металлографические исследования. 74](#bookmark99)
2. [Исследование микротвердости покрытий. 87](#bookmark103)
3. Исследование адгезионной прочности соединения

[покрытия с подложкой . 93](#bookmark127)

Глава 5. Примеры применения ХГН в промышленности.

1. Исправление литейного брака в деталях из алюминиевых

[сплавов двигателей автомобилей. 98](#bookmark109)

1. Восстановление прессформ для изготовления сотовых

[панелей из композиционных материалов. 102](#bookmark112)

1. [Восстановление изношенных участков контактного про­вода железной дороги без его демонтажа 106](#bookmark113)
2. Перспективные направления исследований и применения

способа холодного газодинамического напыления. 114

[**Основные результаты и выводы. 116**](#bookmark123)

[**Список использованных источников. 120**](#bookmark124)

**Приложения.**

Приложение 1 125

Приложение 2 144

**Основные результаты и выводы.**

1. Разработан способ, технология и создано технологическое оборудование для холодного газодинамического напыления покрытий на режимах с низким давлением (~0,6 МПА) несущего газа.
2. Разработан метод расчета и получены аналитические выражения для вычисления относительной прочности сцепления покрытия и подложки на основании теории контактного взаимодействия тел. Составлена программа вычисления на алгоритмическом языке "Фортран 4" и проведены численные расчеты относительной прочности соединения для различных материалов частицы и подложки.
3. Исследовано влияние изменения механических свойств материала на величину относительной прочности сцепления покрытия и подложки. Показано, что наибольшее влияние на величину относительной прочности соединения оказывает изменение динамического предела текучести материалов частицы и подложки.
4. На основании анализа методов и результатов расчета двухфазных потоков в сверхзвуковых соплах показано, что в случае ХГН скорость частиц в первом приближении можно считать равной ~ 0,8 скорости газа на срезе сопла, вычисленной по формуле течений для "чистого" газа. Показано, что результаты испытаний покрытий на адгезионную прочность находятся в хорошем соответствии (~15%) с данными, полученными расчетом по предложенной методике вычисления относительной прочности соединения частицы и подложки.
5. Экспериментальные исследования показали, что для снижения энергетических затрат на ускорение частиц напыление можно проводить при полном давлении газа ниже расчетного для данных размеров сопла.
6. Разработана и создана экспериментальная установка, позволившая получить покрытия из пластичных металлов, применяя в качестве несущего газа горячий воздух.
7. Спроектированы и изготовлены прототипы промышленных установок, позволяющих проводить напыление в ручном и автоматическом режиме.
8. Результаты исследования микротвердости образцов покрытие-подложка показали, что процесс формирования покрытий аналогичен процессам соединения металлов в твердой фазе (в частности, сварке взрывом). Граница раздела имеет более высокую микротвердости, чем исходные материалы, т.е. оба металла упрочнены пластической деформацией, а слои, прилегающие к поверхности подложки, имеют недеформированную структуру.
9. Металлографические исследования покрытий из механических смесей частиц металлов показали, что формирование покрытий происходит в результате присоединения к подложке частиц более пластичной фракции. Адгезионная прочность данных покрытий определяется прочностью на растяжение более пластичной фракции.
10. В результате проведенных исследований разработаны и опробованы в промышленных условиях следующие технологии: исправление литейного брака в деталях из алюминиевых сплавов, восстановление изношенных участков контактного провода железной дороги без его демонтажа, восстановление пресс­форм для изготовления сотовых панелей из композиционных материалов.

11 .Дан анализ перспективных направлений исследований и применения метода ХГН