**Косарев Владимир Федорович. Физические основы холодного газодинамического напыления : Дис. ... д-ра физ.-мат. наук : 01.02.05 : Новосибирск, 2003 292 c. РГБ ОД, 71:04-1/44-2**

**РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК**

**СИБИРСКОЕ ОТДЕЛЕНИЕ**

**ИНСТИТУТ ТЕОРЕТИЧЕСКОЙ И ПРИКЛАДНОЙ МЕХАНИКИ**

**На правах рукописи УДК 533.6: 535.8: 621.793**

**>>**

**I • ■**

**Косарев Владимир Федорович**

**• V' ' , \ , ,**

**ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ХОЛОДНОГО ГАЗОДИНАМИЧЕСКОГО НАПЫЛЕНИЯ**

**1. 02. 05 - механика жидкостей, газа и плазмы**

**Диссертация**

**на соискание ученой степени**

**доктора физико-математических наук » '**

**!**

**\**

**I Научный консультант:**

**д.т.н. Алхимов А.П.**

**\**

**\**

**\**

**\ Новосибирск, 2003 г.**

**о 6 НОЯ 2003**

**ВВЕДЕНИЕ 7**

**ГЛАВА 1 ГАЗОДИНАМИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ НАПЫЛЕНИЯ 28**

**1.1 ТЕЧЕНИЕ В СВЕРХЗВУКОВОМ СОПЛЕ БОЛЬШОЙ ДЛИНЫ 29**

**1.1.1 Экспериментальное определение параметров газового потока на срезе**

**плоского сверхзвукового сопла 30**

**Описание экспериментальной установки 30**

**Анализ экспериментальных результатов 33**

**1.1.2 Расчет параметров газа внутри сопла 36**

**I Учет вытесняющего действия пограничного слоя 36**

**\ Расчет средних по сечению параметров потока 40**

**1.2 СТРУЙНОЕ ИСТЕЧЕНИЕ из СВЕРХЗВУКОВОГО СОПЛА ПРЯМОУГОЛЬНОГО ВЫХОДНОГО**

**СЕЧЕНИЯ 44**

**1.2.1 Экспериментальная установка и методики исследования 45**

**\* 1.2.2 Экспериментальные результаты 47**

**Профили числа Маха 48**

**Профили избыточной температуры 49**

**Продольное распределение осевых значений параметров 50**

**Толщина струи 53**

**Влияние нерасчетности 55**

**1.3 НАТЕКАНИЕ СВЕРХЗВУКОВОЙ СТРУИ НА ПРЕГРАДУ 57**

**1.3.1 Экспериментальная установка 58**

**1.3.2 Экспериментальные результаты 58**

**1 Распределение давления на поверхности преграды 58**

**; Градиент скорости в точке торможения 60**

**Сравнение распределения давления в струе и на поверхности преграды ....62 \ Влияние расстояния от среза сопла до преграды. Колебания струи 63**

**і**

**(4 Пристенная струя 66**

**Толщина сжатого слоя 69**

**1.4 ТЕПЛООБМЕН СТРУИ С ПРЕГРАДОЙ 73**

**1.4.1 Методика измерения коэффициента теплообмена 74**

**1.4.2 Коэффициент теплообмена 78**

**1.4.3 Температура поверхности преграды 82**

**ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 1 85**

**т**

**з**

**ГЛАВА 2 СКОРОСТЬ УДАРА ЧАСТИЦ О ПРЕГРАДУ ПРИ**

**ГАЗОДИНАМИЧЕСКОМ НАПЫЛЕНИИ 89**

**2.1 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИЗМЕРЕНИЕ СКОРОСТИ ЧАСТИЦ 89**

**2.1.1 Методы диагностики 89**

**Лазер-доплеровский измеритель скорости (ЛДИС) 89**

**Метод треков 90**

**2.1.2 Экспериментальные результаты 93**

**2.2 РАСЧЕТ СКОРОСТИ И ТЕМПЕРАТУРЫ ЧАСТИЦ В МОМЕНТ УДАРА 94**

**2.2.1 Компьютерное приложение 97**

**2.3 ОПТИМИЗАЦИЯ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК СОПЛА ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ**

**МАКСИМАЛЬНОЙ СКОРОСТИ УДАРА 104**

**2.3.1 Картина движения газа и частиц 104**

**2.3.2 Модель расчета параметров газа и частиц 106**

**2.3.3 Результаты по оптимизации параметров сопла по скорости частиц в момент**

**удара 108**

**2.3.4 Определение температуры частиц в момент удара 112**

**ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ // 114**

**ГЛАВА 3 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА**

**ХОЛОДНОГО ГАЗОДИНАМИЧЕСКОГО НАПЫЛЕНИЯ 115**

**3.1 ЗАВИСИМОСТЬ ПРОЦЕССА НАПЫЛЕНИЯ ОТ СКОРОСТИ ЧАСТИЦ И ТЕМПЕРАТУРЫ**

**ПОДОГРЕВА РАБОЧЕГО ГАЗА 115**

**3.1.1 Описание установки 116**

**3.1.2 Экспериментальные результаты 120**

**3.2 НАПЫЛЕНИЕ ПРИ БОЛЬШИХ КОНЦЕНТРАЦИЯХ ЧАСТИЦ 124**

**3.2.1 Критическая концентрация 125**

**3.2.2 Влияние угла напыления 128**

**3.3 ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ДВУХФАЗНОГО ПОТОКА С НАГРЕТОЙ ПОВЕРХНОСТЬЮ И**

**ФОРМИРОВАНИЕ НА НЕЙ ПОКРЫТИЙ 130**

**3.3.1 Экспериментальная установка 131**

**3.3.2 Температура поверхности образца 133**

**3.3.3 Экспериментальные результаты 136**

**3.4 НАПЫЛЕНИЕ С ВОЗБУЖДЕНИЕМ РЕАКЦИЙ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОГО СИНТЕЗА 140**

**3.4.1 Условия проведения СВС реакций при газодинамическом напылении 140**

**3.4.2 Экспериментальная установка и результаты 142**

**3.4.3 Осесимметричные сопла с центральным телом 144**

**3.4.3 Анализ покрытий 149**

**3.5 НАНЕСЕНИЕ МЕТАЛЛ-ПОЛИМЕРНЫХ ПОКРЫТИЙ МЕТОДОМ ХГН 149**

**3.5.1 Установка и материалы 150**

**3.5.2 Результаты исследования 151**

**3.5.3 Физико-технические свойства металл-полимерных тонких слоев и**

**скомпактированных порошковых материалов 153**

**Результаты исследования методом дифракции синхротронного излучения**

**154**

**Адгезионно-когезионная прочность 156**

**Электросопротивление композитных материалов 157**

**Триботехнические свойства тефлонсодержащих покрытий 158**

**3.5.4 Моделирование трения металл-полимерного композита 160**

**Основные принципы моделирования 160**

**Результаты моделирования и обсуждение 164**

**ф ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ III 167**

**ГЛАВА 4 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ**

**ОДИНОЧНЫХ ЧАСТИЦ С ПОВЕРХНОСТЬЮ 170**

**4.1 АДГЕЗИОННОЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ОДИНОЧНЫХ ЧАСТИЦ С ПОДЛОЖКОЙ. 171**

**4.1.1 Влияние скорости частиц, температуры рабочего газа и подготовки**

**поверхности 171**

**4.1.2 Активация поверхности частицами. Время задержки 174**

**4.1.3 Критические параметры 177**

**4.2 ДЕФОРМАЦИЯ МИКРОЧАСТИЦ ПРИ ВЫСОКОСКОРОСТНОМ УДАРЕ. 179**

**4.2.1 Экспериментальная установка и методы измерений 180**

**4.2.2 Методика измерений 182**

**4.2.3 Статистическая обработка 183**

**4.2.4 Результаты микроскопических исследований 185**

**4.2.5 Зависимость деформации от скорости удара 189**

**ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ IV 190**

**ГЛАВА 5 МОДЕЛИРОВАНИЕ АДГЕЗИОННОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ С ПОВЕРХНОСТЬЮ ОДИНОЧНОЙ ЧАСТИЦЫ ПРИ ЕЕ ВЫСОКОСКОРОСТНОМ ПЛАСТИЧЕСКОМ ДЕФОРМИРОВАНИИ 192**

**5.1 ОЦЕНКИ ВРЕМЕНИ КОНТАКТА И СТЕПЕНИ ДЕФОРМАЦИИ ЧАСТИЦЫ ПРИ ВЫСОКОСКОРОСТНОМ УДАРЕ.**

**5.2.1 Аналитическое моделирование 194**

**5.2.2 Результаты 198**

**5.2.3 Численный расчет 201**

**5.3 ОБРАЗОВАНИЕ ИНТЕРМЕТАЛЛИДОВ в ЗОНЕ КОНТАКТА ПРИ НАПЫЛЕНИИ АЛЮМИНИЯ НА**

**НИКЕЛЬ 203**

**5.4 ОСОБЕННОСТИ ДЕФОРМИРОВАНИЯ МИКРОЧАСТИЦ ПРИ УДАРЕ О ТВЕРДУЮ ПРЕГРАДУ205**

**5.4.1 Исходные предпосылки 205**

**5.4.2 Численное моделирование деформации частицы при высокоскоростном**

**ударе 206**

**5.4.3 Моделирование расплавленного слоя 209**

**Толщина расплавленного слоя больше толщины вязкого слоя 210**

**Толщина расплавленного слоя равна толщине вязкого слоя 213**

**Температура расплавленного слоя 213**

**5.5 ОСОБЕННОСТИ АДГЕЗИОННОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ С ПОДЛОЖКОЙ НЕРАСПЛАВЛЕННОЙ**

**ЧАСТИЦЫ 214**

**5.5.1 Определяющее уравнение для числа образовавшихся связей 215**

**5.5.2 Время контакта 216**

**5.5.3 Диаграмма термического состояния частиц при ударе 217**

**Прогреваемый объем 217**

**»**

**Критические скорости 217**

**Диаграмма термосостояний 218**

**Объем материала при температуре плавления 220**

**5.5.4 Температура контакта 221**

**5.5.5 Энергия активации 222**

**5.5.6 Энергия адгезии 224**

**5.5.7 Упругая энергия 224**

**5.5.8 Сравнение энергий 226**

**5.5.9 Вероятность закрепления 227**

**5.5.10 Задача оптимизации 229**

**5.5.11 Полидисперсность 231**

**5.6 ВЛИЯНИЕ АКТИВАЦИИ ПОВЕРХНОСТИ НА ПРОЦЕСС ГАЗОДИНАМИЧЕСКОГО НАПЫЛЕНИЯ 232**

**5.6.1 Энергия активации 234**

**5.6.2 Численный эксперимент 235**

**5.6.3 Результаты моделирования 236**

**Зависимость запыленной площади от скорости частиц 239**

**Зависимость запыленной площади от температуры частиц 242**

**Выводы ПО ГЛАВЕ V 243**

**ГЛАВА 6 СВОЙСТВА ПОКРЫТИЙ И ВОПЛОЩЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ**

**ИССЛЕДОВАНИЙ В КОНКРЕТНЫХ ТЕХНОЛОГИЯХ 245**

**6.1 ОСНОВНЫЕ СВОЙСТВА ГАЗОДИНАМИЧЕСКИХ ПОКРЫТИЙ. 245**

**6.1.1 Микроструктура покрытий 245**

**6.1.2 Прочность сцепления 248**

**6.1.3 Микротвердость покрытия 253**

**6.1.4 Плотность, пористость, газопроницаемость 256**

**6.1.5 Коррозионные свойства газодинамических покрытий 258**

**6.2 НАНЕСЕНИЕ АНТИКОРРОЗИОННЫХ ПОКРЫТИЙ НА ВНУТРЕННЮЮ ПОВЕРХНОСТЬ**

**ДЛИННОМЕРНЫХ ТРУБ 262**

**6.2.1 Описание установки и принцип работы 263**

**6.2.2 Свойства получаемых покрытий 266**

**6.3 НАНЕСЕНИЕ ЭЛЕКТРОПРОВОДНЫХ КОРРОЗИОННОСТОЙКИХ ПОКРЫТИЙ НА**

**ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ ИЗДЕЛИЯ 267**

**6.3.1 Описание технологии 268**

**6.3.2 Методика испытания наконечников 269**

**6.3.3 Результаты испытаний 271**

**6.4 УСТАНОВКА ГАЗОДИНАМИЧЕСКОГО НАПЫЛЕНИЯ ПЕРЕНОСНОГО ТИПА 272**

**Выводы ПО ГЛАВЕ Vi 278**

**ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ 279**

**ЛИТЕРАТУРА 282**

**Основные результаты и выводы**

1. В результате проведения комплекса исследований созданы научные

основы метода холодного газодинамического напыления:

* установлено, что на параметры течения внутри сопла большой длины *(L* = 20 - 50 *К)* с прямоугольным сечением сверхзвуковой части, заметное влияние оказывает пограничный слой;
* зарегистрировано, что при определенных расстояниях от среза сопла до преграды наблюдается неустойчивость струи, выражающаяся в возникновении ее поперечных колебаний;
* определена толщина сжатого слоя при натекании струи на преграду;
* измерены распределения по поверхности преграды коэффициента теплообмена, рассчитана температура преграды и показано, что для теплопроводных материалов заметно снижение температуры поверх­ности в пятне напыления по сравнению с температурой торможения;
* измерены скорости частиц на срезе сопла, проведено сопоставление

расчетных и экспериментальных данных и предложена аппроксимационная зависимость скорости частиц от определяющих параметров задачи; предложено компьютерное приложение,

позволяющее проводить расчет скорости и температуры частиц при газодинамическом напылении;

* поставлена и решена задача оптимизации параметров сопла (длина и толщина сверхзвуковой части сопла) по скорости удара частиц о преграду;
* получена зависимость степени деформации сферических

алюминиевых частиц при высокоскоростном ударе от их кинетической энергии, позволяющая верифицировать результаты моделирования;

* моделированием тепловыделения в зоне контакта показано, что влияние толщины зоны тепловыделения на температуру в контакте, особенно для частиц *dp <* 10 мкм, мало и можно принимать, что тепло выделяется в слое нулевой толщины; для металлических частиц

*М*

размером *dp* < 50 мкм недопустимо условие адиабатичности, обычно применяемое при моделировании ударного деформирования макротел; при скорости, зависящей от размера частицы, в ней может появиться тонкий слой расплавленного металла и поддерживаться за счет тепловыделения в вязком пограничном слое;

* моделированием адгезионного взаимодействия частицы с преградой показано, что существует оптимальный для газодинамического напыления размер частиц (по вероятности закрепления на поверхности преграды);
* предложена модель, учитывающая зависимость процесса напыления от коллективного взаимодействия частиц с преградой.

1. Найдены режимы напыления из механической смеси мелкодисперсных порошков, позволяющие проводить синтез интерметаллидов на напыляемой поверхности непосредственно в процессе напыления.
2. Получены метал-полимерные (Си + тефлон) покрытия, имеющие электропроводность близкую к электропроводности меди и коэффициент трения, сравнимый с коэффициентом трения тефлона. Проведено моделирование износа при трении исследованных композитов, результаты которого согласуется с экспериментальными данными.
3. Разработаны оборудование и технологии нанесения электропроводных коррозионностойких покрытий на электротехнические изделия и антикоррозионных покрытий на внутреннюю поверхность длинномерных труб; переносная (ручная) установка для нанесения порошковых покрытий методом ХГН, обеспечивающая нанесение покрытий на открытых площадках, для проведения ремонтных и восстановительных работ и т.д.

Обобщенные результаты данной работы позволяют рассматривать их как новое научное направление в механике жидкости, газа и плазмы: формирование покрытий из микрочастиц методом холодного газодинамического напыления.

В заключение автор считает своим долгом выразить искреннюю благодарность чл. корр. РАН В.М. Фомину за всестороннюю поддержку данного направления, д. ф. - м. н., профессору А.Н. Папырину, к.ф.-м.н. |Н.И. Нестеровичу|, д.т.н. А.П.Алхимову, и к.ф.-м.н. С.В. Клинкову, в тесном и плодотворном сотрудничестве с которыми была создана экспериментальная база, выбраны направления и методики исследований, получен ряд важных научных результатов.

«Г

Н.И, Нестеровичу

Автор благодарен всем сотрудникам лаборатории “Физики многофазных сред” за помощь в проведении экспериментов, полезные обсуждения и замечания.