

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ УНИТАРНОЕ ПРЕДПРИЯТИЕ
«ЦЕНТРАЛЬНЫЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ
КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ «ПРОМЕТЕЙ»

На правах рукописи

УДК 621.793.7
ГРНТИ 81.35.33

ГЕРАЩЕНКОВ Дмитрий Анатольевич

**РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА
НАНЕСЕНИЯ ПОКРЫТИЙ МЕТОДОМ «ХОЛОДНОГО»
ГАЗОДИНАМИЧЕСКОГО НАПЫЛЕНИЯ НА ОСНОВЕ
АРМИРОВАННЫХ ПОРОШКОВ СИСТЕМЫ $Al-Sn+Al_2O_3$**

Специальность:

05.16.09 – материаловедение (машиностроение)

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный консультант:
Доктор технических наук, доцент
Орыщенко Алексей Сергеевич

Санкт-Петербург
2015

Оглавление

ВВЕДЕНИЕ	6
Глава 1. АНАЛИЗ ИССЛЕДОВАНИЙ И РАЗРАБОТОК В ОБЛАСТИ СОЗДАНИЯ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ПОКРЫТИЙ С ВЫСОКИМИ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ	15
1.1. Преимущества метода «холодного» газодинамического напыления (ХГДН) ...	20
1.2. Выбор матричного материала на основе алюминиевых сплавов для напыления покрытий	25
1.3. Создание композиционной структуры в функциональном покрытии	29
1.3.1. Создание композиционной структуры при напылении механических смесей порошков	31
1.3.2. Создание композиционной структуры при напылении конгломерированных порошков	33
1.3.3. Создание композиционной структуры при напылении порошковых материалов, полученных методом механохимического синтеза	35
1.3.3.1. Получение и нанесение плакированных порошков	37
1.3.3.2. Получение и нанесение армированных порошков	39
1.4. Преимущества многослойных и функционально-градиентных покрытий	43
Выводы по Главе 1	46
Глава 2. МАТЕРИАЛЫ, ОБОРУДОВАНИЕ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ	48
2.1. Материалы для получения функциональных покрытий	48
2.1.1. Состав исходных порошков чистых металлов	48
2.1.2. Армирующая компонента – порошок электрокорунда	49
2.1.3. Вспомогательные материалы	50
2.2. Технологическое и аналитическое оборудование	50
2.2.1. Оборудование для получения матричных порошков методом высокоскоростного эжекторного распыления из сплава (металлургический метод)	51
2.2.2. Оборудование для получения композиционных порошков методом механосинтеза	52
2.2.2.1. Мельница периодического действия МПП 1-2	53
2.2.2.2. Дезинтегратор ДЕЗИ15	54
2.2.2.3. Чашечный истиратель ИВЧ-3	54
2.2.3. Установка для нанесения покрытий методом ХГДН «ДИМЕТ-403»	55
2.2.4. Оборудование для автоматизации процесса напыления	56
2.3. Методы исследования порошковых материалов и покрытий, полученных на их основе	57
2.3.1. Гранулометрический анализ	57
2.3.2. Рентгенофлуоресцентный анализ	58
2.3.3. Оптическая микроскопия	59

2.3.4.	Электронная микроскопия	59
2.3.5.	Рентгеноспектральный микроанализ	59
2.3.6.	Анализ фазового состава	60
2.3.7.	Методики измерения адгезии покрытия к подложке	61
2.3.8.	Измерение твердости покрытий	62
2.3.9.	Измерение коэффициента трения.....	63
Глава 3. РАЗРАБОТКА ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА И ТЕХНОЛОГИИ ПОЛУЧЕНИЯ МАТРИЧНОГО И КОМПОЗИЦИОННОГО ПОРОШКОВОГО МАТЕРИАЛА.....		66
3.1.	Получение и исследование порошков матричного материала системы Al–Sn–Zn	68
3.1.1.	Получение матричного материала системы Al–Sn–Zn методом смешивания исходных материалов	68
3.1.2.	Получение матричного материала системы Al–Sn–Zn методом механического легирования смеси исходных материалов	68
3.1.3.	Получение матричного материала методом эжекторного распыления из сплава системы Al–Sn–Zn	69
3.2.	Получение и исследование порошковых композиций на основе пластичного матричного материала системы Al-Sn-Zn и армирующей компоненты Al ₂ O ₃	75
3.2.1.	Исследование гранулометрического состава порошка армирующей компоненты	75
3.2.2.	Получение механической смеси порошков системы Al-Sn-Zn и Al ₂ O ₃	76
3.2.3.	Получение композиционных порошков с использованием технологии дезинтеграторной обработки и их исследование	76
3.2.4.	Получение композиционных порошков с использованием технологии обработки в планетарной мельнице и их исследование.....	77
3.2.5.	Получение композиционных порошков с использованием технологии обработки в чашечном истирателе и их исследование	78
Выводы по Главе 3		80
Глава 4. ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРНО-СКОРОСТНЫХ ПАРАМЕТРОВ ГЕТЕРОФАЗНОГО ПОТОКА ПРОЦЕССА НАПЫЛЕНИЯ ПОКРЫТИЙ МЕТОДОМ ХГДН		82
4.1.	Создание экспериментального стенда для исследования температурно-скоростных параметров	82
4.2.	Экспериментальное определение скорости и температуры потока.....	88
4.3.	Определение температуры частиц в гетерофазном потоке.....	90
4.3.1.	Температурные измерения при использовании порошка железа ПЖР-1	90
4.3.2.	Температурные измерения на порошке алюминия (ПА-ВЧ-1).....	92
4.4.	Определение скорости частиц в гетерофазном потоке	94
4.4.1.	Характеристики доплеровского измерителя скорости.....	94

4.4.2. Результаты измерения скорости твердой фазы в струях установки «Димет-403» при ее работе с порошком железа.....	96
4.4.3. Результаты измерения скорости твердой фазы в струях установки «Димет-403» при использовании порошка алюминия	97
Выводы по Главе 4	97
Глава 5. ВЗАИМОСВЯЗЬ СТРУКТУРЫ И СВОЙСТВ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ПОКРЫТИЙ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ПАРАМЕТРОВ НАНЕСЕНИЯ, ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА И ТЕХНОЛОГИИ ПОЛУЧЕНИЯ ПОРОШКОВОГО МАТЕРИАЛА	
5.1. Выбор технологических режимов напыления при напылении функциональных покрытий из матричных порошков	99
5.2. Создание покрытий с композиционной структурой.....	104
5.3. Исследование микротвердости функциональных покрытий.....	109
5.3.1. Исследование микротвердости функциональных покрытий из матричных порошков.....	109
5.3.2. Исследование микротвердости функциональных покрытий из механической смеси порошков С9 и армирующей компоненты	110
5.3.3. Исследование микротвердости функциональных покрытий из композиционных порошков	111
5.4. Исследование пористости покрытий.....	114
5.4.1. Исследование пористости функциональных покрытий из матричных порошков.....	114
5.4.2. Исследование пористости функциональных покрытий из механической смеси порошков С9 и армирующей компоненты	115
5.4.3. Исследование пористости функциональных покрытий из композиционных порошков.....	115
5.5. Исследование адгезионной прочности функциональных покрытий	117
5.5.1. Исследование адгезионной прочности функциональных покрытий из матричных порошков.....	117
5.5.2. Исследование адгезионной прочности функциональных покрытий из механической смеси порошков С9 и армирующей компоненты	118
5.5.3. Исследование адгезионной прочности функциональных покрытий из композиционных порошков	118
5.6. Получение и исследование функционально-градиентного покрытия.....	119
5.7. Результаты трибологических испытаний полученных функциональных покрытий	122
Выводы по Главе 5	128
Глава 6. АДАПТАЦИЯ ТЕХНОЛОГИИ ХГДН ПРИМЕНИТЕЛЬНО К СОЗДАНИЮ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ПОКРЫТИЙ НА КОНКРЕТНЫХ ИЗДЕЛИЯХ. ПРАКТИЧЕСКАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ РАБОТЫ.....	
6.1. Определение коэффициента использования порошка и угла наклона сопла ...	130
6.1.1. Исследование расхода напыляемого порошка.....	130

6.1.2.	Исследование влияния скорости сканирования на толщину покрытия.	131
6.1.3.	Исследование влияния угла наклона сопла к подложке на толщину наносимого покрытия	133
6.2.	Нанесение функциональных покрытий на шатунные подшипники двигателя внутреннего сгорания.....	134
6.3.	Нанесение защитных покрытий на секции рейзера (длина 3,0 м).....	136
6.4.	Восстановление вкладышей подшипников скольжения двигателя газовой электростанции	141
6.5.	Нанесение промежуточного слоя для повышения адгезионной прочности соединяемых листов биметалла титан – сталь сваркой взрывом	144
6.6.	Напыление многослойных покрытий на постоянные магниты.....	145
6.7.	Производство анодов для получения высокочистого никеля и кобальта	148
	Выводы по Главе 6	149
	ЗАКЛЮЧЕНИЕ	150
	СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	152
	ПРИЛОЖЕНИЕ А.....	168
	ПРИЛОЖЕНИЕ Б	169
	ПРИЛОЖЕНИЕ В	170
	ПРИЛОЖЕНИЕ Г	172

ВВЕДЕНИЕ

Ужесточение условий эксплуатации и усложнение конструкции рабочих элементов и узлов машиностроительной техники требуют создания эффективных средств защиты. Большинство изделий машиностроения изготовлено из сталей различного класса, при этом защита от агрессивных внешних воздействующих факторов обеспечивается за счет нанесения функциональных покрытий и модификации поверхности, что является экономически целесообразным. Учитывая современные темпы развития техники, конструкторы выдвигают новые требования к повышению удельных характеристик материалов, в частности к контактным поверхностям.

Одной из важнейших проблем в настоящее время является разработка функциональных покрытий для пар трения. Основными материалами для получения антифрикционных покрытий являются сплавы системы Al-Sn [1]. Наиболее широко такие системы используются при производстве подшипников скольжения, которые изготавливаются методом штамповки из биметаллических листов системы сталь – алюминий, полученных методом совместной прокатки. Применение технологии нанесения покрытий системы Al-Sn позволит значительно расширить область эксплуатации пар трения за счет гибкого регулирования свойств исходных материалов (управление их химическим составом) и более оперативного проведения ремонтно-восстановительных работ. В перспективе при проведении соответствующих НИОКР появится возможность изготавливать с высокой степенью точности подшипники более сложной формы.

При традиционных высокотемпературных методах получения таких покрытий имеет место возникновение остаточных термических напряжений в сопряженных поверхностях, деградация структуры напыляемого материала, изменение химического состава, а также значительные сложности при нанесении алюминиевых и легкоплавких материалов [2 – 4].

Наиболее перспективным методом, позволяющим значительно снизить воздействие температурного поля потока (частицы переносятся в твердом,

нерасплавленном состоянии), является метод «холодного» газодинамического напыления (ХГДН), основанный на эффекте формирования прочного металлического слоя при набегании двухфазного сверхзвукового потока на поверхность за счет образования адгезионных связей между деформированной частицей и подложкой [5, 6]. Метод ХГДН позволяет наносить покрытия из пластичных материалов на стальную поверхность, в т.ч. сплавов системы Al-Sn [7, 8].

Чтобы получить функциональные покрытия с высокой твердостью и высокими антифрикционными свойствами недостаточно сформировать гомогенную структуру покрытия – необходимо создать композиционную структуру, основу которой составляют так называемые «скелетные» структуры, где несущий каркас строится из матричного материала, а повышенная твердость (износостойкость) обеспечивается армирующими частицами [9 – 13].

При реализации метода ХГДН широко используют порошковые механические смеси на основе пластичных матричных и твердых армирующих частиц, которые готовятся предварительно и далее подаются непосредственно в транспортирующий газовый поток, образуя гетерогенную взвесь (смесь частиц, обладающих различными физико-химическими свойствами, фракционным составом и т.д.) [14, 15]. Необходимо учитывать, что каждый материал обладает своими уникальными физико-химическими свойствами, следовательно, оптимальные характеристики потока также индивидуальны. Поэтому структура таких покрытий неравномерна из-за образования агломератов, что, как правило, ведет к увеличению пористости, снижению однородности и когезионной прочности, а наличие твердой армирующей составляющей в зоне контакта покрытия и подложки снижает величину адгезии по сравнению с гомогенным покрытием, состоящим из пластичного материала.

Снизить пористость и повысить однородность состава покрытия, возможно при использовании для напыления композиционных порошков, представляющих собой единую механическую систему с пластичной матрицей и армирующей компонентой в виде твердых дисперсных частиц [16, 17]. В последнее время

существенно возрос интерес к композиционным порошковым материалам, сочетающих разнородные компоненты с четкой границей раздела между фазами, получаемыми в результате механохимического синтеза [18, 19].

Сочетая явные преимущества гомогенной и композиционной структуры функциональных покрытий, можно повысить их адгезионную прочность, сохранив при этом высокую микротвердость, и получить многослойное покрытие (МП) или функционально-градиентное покрытие (ФГП). Такие покрытия отличаются высокой адгезионной и когезионной прочностью за счет совместного использования для напыления порошка пластичного матричного материала и композиционного порошка, помещаемых в отдельные дозаторы [20, 21]. Получение требуемой структуры – при использовании системы дозаторов – обеспечивается специальной системой управления расходом порошков в широком диапазоне по заданному закону.

Цель работы:

Разработка новых композиционных порошков системы $Al-Sn+Al_2O_3$ и технологии их получения с помощью механосинтеза и создание на их основе функционально-градиентных покрытий с высокой адгезионной прочностью и микротвердостью для пар трения и проведения ремонтно-восстановительных работ машиностроительной техники.

Задачи:

1. Выбор химического состава матричного и армирующего порошков.
2. Изучение особенностей создания армированных композиционных порошковых материалов системы «металл – неметалл» и разработка базовой технологии получения порошков системы $Al-Sn+Al_2O_3$ с помощью механосинтеза.
3. Определение температурно-скоростных параметров гетерофазного потока при получении функциональных покрытий методом «холодного» газодинамического напыления и оптимизация режимов напыления применительно к порошковым композициям системы $Al-Sn+Al_2O_3$.

4. Установление закономерности влияния структуры на микротвердость и адгезионную прочность в зависимости от условий формирования композиционного покрытия.
5. Разработка технологии получения многослойных и функционально-градиентных покрытий с регулируемой микротвердостью.
6. Практическая реализация результатов экспериментального исследования применительно к созданию пар трения и проведения ремонтно-восстановительных работ деталей и узлов машиностроительной техники.

Научная новизна:

1. Оптимизирован химический состав матричного материала системы Al-Sn и обосновано введение в состав цинка в качестве пластификатора для получения покрытий методом «холодного» газодинамического напыления.
2. На основании изучения особенностей формирования поверхностно-армированных порошковых материалов впервые предложен способ получения композиционного порошка системы Al-Sn+Al₂O₃ с помощью механосинтеза.
3. Установлено, что температура частиц в гетерофазном потоке при напылении покрытий методом ХГДН из сплавов на основе алюминия не превышает 55°С, при этом оптимальная скорость гетерофазного потока составляет 600 м/с, а температура торможения газа находится в пределах 450°С, что обеспечивает получение практически беспористых покрытий.
4. На основании изучения функциональных зависимостей «структура – свойства» определено влияние армирующей компоненты Al₂O₃ на основные характеристики функционального покрытия – адгезионную прочность, микротвердость, пористость и показано, что использование для напыления композиционного порошка С9И70 (состава Al-9%Sn-3%Zn+70%Al₂O₃), позволяет повысить микротвердость в 4 раза, при этом снижается адгезионная прочность на 13% и возрастает пористость до 0,8% по сравнению с гомогенным покрытием С9 (состава Al-9%Sn-3%Zn.)

5. Впервые экспериментально показано, что использование специально разработанного модуля с программируемой системой дозаторов, обеспечивающего подачу порошковых материалов по заданному закону в поток транспортирующего газа, позволяет получать функционально-градиентные покрытия, на основе алюминия, сочетающие высокую адгезионную прочность (до 60 МПа) с высокой микротвердостью периферийных слоев (до 240HV).
6. Установлено, что использование композиционных порошков системы Al-Sn-Al₂O₃ при напылении покрытий позволяет повысить контактные давления в узле трения более, чем в пять раз по сравнению с покрытием системы Al-Sn, имеющим гомогенную структуру.

Практическая значимость работы:

Диссертация выполнялась в соответствии с планом основных научных работ ФГУП ЦНИИ КМ «Прометей», реализованных в рамках договорных обязательств с одним из подразделений корпорации Toyota (2002–2005), по Государственным контрактам № 35.663.11.0065 от 15.05.2002 г., шифр «Функциональность», № ОВ/07/458/НТБ/К от 26.07.2007 г., шифр «Гера», № 12411.1007499.09.155 от 18.09.2012 г., шифр «Эльбрус», № 13411.1007499.09.045 от 29.03.2013 г., шифр «Буран».

По результатам указанных контрактов разработана следующая нормативная документация: «Технологический регламент (инструкция) на опытную партию порошков, предварительно обработанных методом механоактивационного синтеза», 2009 г.; «Технология получения композиционных порошковых материалов для метода сверхзвукового ХГДН» (№ 35.378.03.13.ТР от 18.10.2013 г.); «Компьютеризированная технология получения композиционных армированных порошковых материалов» (№ 35.378.02.14.ТИ от 25.06.2014 г.); «Технологическая инструкция. Процесс получения функциональных покрытий методом сверхзвукового «холодного» газодинамического напыления «ХГДН»; Технологический регламент «Процесс нанесения многослойных антикоррозионных покрытий на постоянные магниты

методом сверхзвукового «холодного» газодинамического напыления», Технологическая инструкция, (РД5.АЕИШ.3447-2007); Технологический регламент «Технологический процесс получения функционально-градиентных покрытий с регулируемой твердостью по толщине покрытия» (РД5.УЕИА.3473-2008); «Нанесение покрытий», Технологическая инструкция, (РД5.УЕИА.3653-2014).

Методом ХГДН изготовлены и переданы заказчику (фирма Тойота) опытные партии вкладышей подшипников скольжения.

Разработанные материалы и технологии использованы на предприятиях: ОАО «Уралхиммаш», ООО «Элефант», ОАО «СУ №2», АО «ЦНИИ Курс» при: производстве биметаллических листов сталь-титан и сталь-алюминий для нанесения промежуточного слоя, обеспечивающего высокую адгезию; восстановлении вкладышей подшипников скольжения ДВС газовой электростанции мощностью 4000 кВт; восстановлении посадочных поверхностей подшипников качения крышки демпфера бульдозера Komatsu D65-EX15; ремонте головки блока цилиндров двигателя А01М-03 передвижной установки АСТ-4А; ремонте радиатора системы охлаждения двигателя Komatsu SAA6D1102E2 экскаватора РС-200.

Практические результаты выполненных НИОКР позволили при создании научного нанотехнологического центра ФГУП ЦНИИ КМ «Прометей» оперативно запустить в эксплуатацию современное технологическое оборудование и в соответствии с разработанной технической документацией освоить на нем производство композиционных порошковых материалов методами высокоскоростного механосинтеза и получение на их основе многослойных и функционально-градиентных покрытий методом ХГДН.

Методы исследования

В работе использовались современные методы исследования структуры и свойств порошков и покрытий:

– рентгенофлуоресцентная спектрометрия для определения химического состава (NITON XL3t 900);

– дифракционное рассеяние света от частиц (дифракционная картина) для определения гранулометрического состава (лазерный дифракционный анализатор Malvern Zetasizer Nano-ZS+Malvern Mastersizer 2000);

– оптическая и просвечивающая электронная микроскопия для проведения металлографических исследований (Leica DM-2500 оптический микроскоп и Tescan VEGA 3 растровый электронный микроскоп);

– рентгеноструктурный качественный и количественный фазовый анализ (Rigaku UltimaIV);

– рентгеноспектральный микроанализ элементного состава (РСМА) (энергодисперсионный микроанализатор Inca X-Max, встроенный в растровый электронный микроскоп Tescan Vega);

– анализ изображений шлифов для обнаружения и количественной оценки статистических особенностей структурных состояний (программа Image Expert Pro);

– определение размеров отпечатка, полученного вдавливанием алмазной пирамидки в соответствии с ГОСТ Р ИСО 6507-1-2007 «Металлы и сплавы. Измерения твердости по Виккерсу» для определения микротвердости (ПМТ-3, AFFRI);

– отрыв штифта от нанесенного на него исследуемого покрытия, для определения адгезионной прочности (Instron 1000);

– определение коэффициента трения и интенсивности изнашивания по схеме неподвижный испытуемый образец – вращающийся диск (контртело), в соответствии с рекомендациями Р 50-54-62-88 «Обеспечение износостойкости изделий. Метод ускоренной оценки износостойкости материалов трущихся поверхностей».

Интерпретация результатов исследований базируется на современных представлениях о структуре и свойствах гетерофазных материалов, механизмах трения и изнашивания.

Положения, выносимые на защиту:

1. Экспериментально обоснованная композиция порошкового материала, с использованием в качестве пластичного матричного материала сплава системы Al-Sn и армирующей компоненты Al_2O_3 с высокой микротвердостью и технология его получения.
2. Экспериментально установленные значения температурно-скоростных параметров гетерофазного потока при напылении покрытий на базе выбранных материалов с использованием установки «Димет-403».
3. Основные закономерности влияния структуры на микротвердость и адгезионную прочность функционально-градиентного покрытия, полученного с использованием созданной, программируемой системы дозаторов.
4. Обоснование повышения работоспособности, разработанных функциональных покрытий с композиционной структурой, по методу ускоренной оценки износостойкости в условиях граничного (сухого) трения.

Степень достоверности и апробация результатов обеспечивается использованием для исследований аттестованного аналитического оборудования, воспроизводимостью полученных результатов, корреляцией результатов с результатами других исследователей. Достоверность определяется внедрением образцов готовых изделий с покрытиями в различных областях производства и использованием новых технологических процессов при изготовлении опытных партий конструкционно-функциональных элементов.

Результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на следующих конференциях и семинарах: Конференция молодых ученых и специалистов «Новые материалы и технологии», ФГУП «ЦНИИ КМ «Прометей», 2005 г, 2006 г, 2008 г, 2009 г, 2014 г, 2015 г; Харьковская нанотехнологическая Ассамблея, г. Харьков, 2006 г и 2007 г; Четвертая международная научно-практическая конференция «Исследование, разработка и применение высоких технологий в промышленности», СПбГУВК, 2007 г;

Ежегодная Научная сессия МИФИ «Ультрадисперсные (нано-) материалы», 2008 г, 2009 г; 10-я международная научно-практическая конференция «Технологии ремонта, восстановления и упрочнения деталей машин, механизмов, оборудования, инструмента и технологической оснастки», 2008 г; 28-я международная конференция «Композиционные материалы в промышленности», г. Ялта, 2008 г.; Конференции молодых специалистов «Перспективы развития металлургических технологий» ФГУП «ЦНИИ чермет им. И.П. Бардина» 25–26 февраля 2015 г.

Разработка «Универсальный технологический модуль для производства однородных и композиционных порошковых материалов и нанесения наноструктурированных покрытий», награждена дипломом первой степени и золотой медалью в номинации «Лучший инновационный проект в области передовых технологий машиностроения» на Международной выставке-конгрессе «ВЫСОКИЕ ТЕХНОЛОГИИ. ИННОВАЦИИ. ИНВЕСТИЦИИ» 22-25 сентября 2008 г, г. Санкт-Петербург.

Личный вклад автора заключается в постановке задач исследования, разработке параметров технологического процесса получения композиционных порошков и покрытий на их основе, организации и проведении комплексных экспериментальных, технологических и диагностических исследований, разработке универсального технологического модуля для получения композиционных порошков и функциональных покрытий, разработке требований к созданию новейшей системы дозаторов и их реализация на конкретном оборудовании научного нанотехнологического центра ФГУП «ЦНИИ КМ «Прометей», подготовке статей и докладов по теме диссертации.

Глава 1. АНАЛИЗ ИССЛЕДОВАНИЙ И РАЗРАБОТОК В ОБЛАСТИ СОЗДАНИЯ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ПОКРЫТИЙ С ВЫСОКИМИ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ

Конкурентоспособность промышленной продукции в эпоху высоких технологий определяется уровнем достигнутых характеристик используемых материалов. По сравнению с другими областями науки и техники новые и новейшие материалы играют совершенно специфическую роль, так как определяют направление развития научно-технического прогресса при возникновении потребности в материалах с новыми характеристиками [9, 22]. Наличие или отсутствие требуемых материалов и технологий их получения определяет зависимость или независимость государства от внешних источников и возможность создания и производства новых перспективных видов техники. Так, по установившейся в мировой практике оценке, более 80% приоритетных разработок объектов новой техники в XXI веке будет определяться созданием новых материалов и высоких технологий.

Обеспечить развивающиеся области науки и техники материалами с повышенной работоспособностью в экстремальных условиях возможно при использовании функциональных и функциональных градиентных покрытий на основе композиционных порошков.

Анализ состояния разработок функциональных покрытий и функциональных градиентных покрытий с высоким уровнем физических, физико-химических и эксплуатационных параметров в наиболее развитых странах позволил определить направления исследований, с помощью которых

возможно реализовать преимущества технологий получения нового класса материалов и сплавов методами механического синтеза [23 - 27], плазмохимического синтеза [28 - 30], лазерной активации и обработки [31 - 33] детонационного напыления [34, 35], «холодного» газодинамического напыления [6, 36, 37], газотермического напыления [2, 38, 39], ионно-плазменного и магнетронного осаждений [3, 40 - 42].

Разработка данных технологий позволяет получить перспективные материалы для: энергетики и машиностроения, в том числе для альтернативных высокотемпературных топливных элементов [43, 44]; экологически чистых энергетических установок нового поколения с повышенным КПД; экологии и медицины, в том числе для создания бактерицидостойкого медицинского инструмента [45]; систем опреснения и очистки воды [46 - 49]; перспективных магнитно-мягких градиентных аморфных материалов с высокой начальной магнитной проницаемостью на основе неравновесных сплавов системы Fe-Ni-Co для создания систем электромагнитной защиты [50, 51]; получения упрочняющих износостойких покрытий методами наплавки и лазерного упрочнения [4, 52 - 54]; создания антифрикционных покрытий для автомобильной техники.

Все методы получения перечисленных выше функциональных покрытий объединяет единая концепция, суть которой заключается в управляемом массопереносе частиц на поверхность подложки.

Наиболее распространенные газотермические и плазменные методы нанесения порошковых покрытий предполагают нагрев мелкодисперсных частиц до температуры плавления, ускорения их газовым потоком и переноса к поверхности [55 - 58]. В процессе переноса происходят сложные, как правило, трудно контролируемые процессы физико-химического взаимодействия, включающие образование или разложение оксидов, нитридов, карбидов, структурные изменения, как переносимых порошков, так и материала в зоне контакта. Особые сложности вызывает напыление легкоплавких материалов, в том числе сплавов на основе алюминия и композитов из разнородных

материалов вследствие различных кристаллографических особенностей, разности коэффициентов термического расширения, несоответствия температур плавления и т.д. [59]. Эти недостатки значительно снижают качество покрытия и сужают область их использования при решении различных технических задач. По этой причине в настоящее время во всем мире ведутся работы по оптимизации процессов плазменного газотермического напыления и разработке надежной диагностирующей аппаратуры.

Особый интерес вызывает у специалистов поиск альтернативных технологий, направленных на резкое сокращение времени пребывания частицы напыляемого материала в газодинамическом потоке и снижение температурного поля потока. Наиболее реальным путем при этом являются методы, связанные с существенным повышением скорости при одновременном снижении температур переносимого дисперсного материала [60].

Наиболее перспективным методом, позволяющим значительно снизить воздействие температурного поля потока (частицы переносятся в твердом, нерасплавленном состоянии), является метод ХГДН, основанный на эффекте образования прочного металлического слоя при набегании двухфазного сверхзвукового потока на поверхность подложки за счет образования адгезионных связей между деформированной частицей и подложкой [5, 6].

Основные достоинства метода ХГДН характеризуются отсутствием значительного термического воздействия частиц напыляемого материала на подложку, возможностью напыления большого спектра порошковых материалов, возможностью регулирования процесса напыления в широких пределах [61 - 67]. Кроме того, в литературе сообщается о реализации процессов самораспространяющегося высокотемпературного синтеза в процессе ХГДН [66].

Анализ литературных данных свидетельствует о том, что характер развития пластической деформации на мезомасштабном уровне в композициях, имеющих резко выраженную прямолинейную границу раздела «покрытие – основа», определяется, в основном, толщиной покрытия, величиной адгезионной

прочности и соотношением механических характеристик (и, прежде всего, пластичности) сопрягаемых материалов [68].

Известны отечественные предприятия, занимающиеся как изучением, так и применением технологии ХГДН, среди них: ФГУП ЦНИИ КМ «Прометей», ОЦПН, ИТПМ, МГАУ им. Горячкина, Рязанский ВАИ, ГКНПЦ им. Хруничева, Центр судоремонта «Звездочка», ВИАМ и целый ряд других. Из зарубежных предприятий наиболее широко метод ХГДН используют в США, выполняя заказы в соответствии со стандартом MIL-STD-3021 от 04.08.2008 «MATERIALS DEPOSITION, COLD SPRAY». Это такие американские компании как Ktech, ASB Industries, Army Research Lab, Inovati, а также и фирмы других стран: Windsor University (Канада), Helmut Schmidt University (Германия), CSIRO (Австралия), Ecole de Mines (Франция), Tampere University of Technology (Финляндия).

Учитывая преимущества и специфику метода ХГДН, основными направлениями исследований и разработок указанных предприятий является, во-первых, нанесение покрытий для повышения эксплуатационных характеристик изделий, а во-вторых, проведение ремонтно-восстановительных работ, как на специализированных площадках предприятия, так и в походных или полевых условиях.

Важнейшим направлением исследований в настоящее время является разработка материалов для пар трения и технологий их применения, в частности нанесение функциональных покрытий. Основными материалами для получения металлических антифрикционных покрытий являются сплавы системы Al-Sn. Наиболее широко такие системы используются при производстве подшипников скольжения, которые изготавливают методом штамповки из биметаллических листов системы сталь – алюминий, полученных методом совместной прокатки.

Применение технологии нанесения покрытий системы Al-Sn методом ХГДН эффективно с технологической точки зрения, что позволит значительно расширить эксплуатационные возможности использования для пар трения за счет гибкого регулирования их свойств (управление химическим составом),

оперативного проведения ремонтно-восстановительных работ, а также, в перспективе при проведении соответствующих НИОКР, изготавливать подшипники сложной формы с высокой степенью точности.

Однако для получения антифрикционных покрытий с высокой твердостью необходимо создавать композиционную структуру, которая должна содержать в себе пластичную металлическую матрицу и твердую армирующий компонент [69, 70].

К настоящему времени имеется ряд материаловедческих и технологических решений по получению функциональных покрытий методом ХГДН с использованием порошковых смесей на основе пластичных и твердых материалов, которые либо готовятся предварительно [14], либо формируются непосредственно в газовом потоке [15]. Однако структура таких покрытий, как правило, неравномерна из-за образования агломератов, что ведет к снижению адгезионной и когезионной прочности. Решить эту проблему возможно при использовании композиционных порошков [16].

В последнее время существенно возрос интерес к композиционным порошковым материалам, получаемым в результате сочетания разнородных компонентов с четкой границей раздела между фазами [18, 19]. Такие порошки представляют собой единую механическую систему с пластичной матрицей и армирующей компонентой в виде твердых дисперсных частиц [17, 18]. Использование таких композиционных порошков позволит создать многослойное покрытие (МП) или функционально-градиентное покрытие (ФГП) с высокой адгезионной и когезионной прочностью [20, 71].

Анализ ряда исследований и практика получения покрытий методом ХГДН показывают, что наиболее перспективной композицией для пар трения является дисперсный матричный материал из сплавов на основе алюминия, а в качестве армирующей компоненты перспективно использование твердых частицы оксидов, карбидов или нитридов [1, 10 - 12].

1.1. Преимущества метода «холодного» газодинамического напыления (ХГДН)

Работы по ХГДН проводятся начиная с 1980-х годов [5]. При исследовании запыленных сверхзвуковых потоков (потоков, содержащих взвешенную твердую фазу) было обнаружено, что при относительно небольших скоростях потока частиц (как правило в дозвуковом диапазоне) имеет место абразивная обработка пластичной подложки твердыми частицами напыляемого порошка. При увеличении скорости до 2М наблюдается образование адгезивного слоя в начале кластерного типа, а затем сплошного типа [36, 63, 71]. Это вызвано, по всей вероятности, более высокой активностью пограничных активированных участков. Таким образом, кластер является как бы зародышем образующегося покрытия. При дальнейшем увеличении скорости газового потока снова наблюдается абразивная обработка поверхности пластичного материала, вероятно, вследствие того, что скорость упругой деформации подложки при этих скоростях взаимодействия превышает скорость пластической деформации наносимых твердых частиц [73]. Изучение этого эффекта привело к созданию установок ХГДН (Рисунок 1.1), на которых исследовался механизм закрепления частиц на поверхности, при скоростях 400-1200 м/с при нормальном ударе о поверхность, а также оценивалась степень их деформации [72, 74].

Технология получения покрытий методом ХГДН основана на эффекте образования прочного металлического слоя при набегании двухфазного сверхзвукового потока на нормально расположенную поверхность [6]. При этом температура переносимых частиц значительно меньше температуры плавления. Этот метод лишен многих недостатков высокотемпературных плазменных методов [75] и имеет следующие достоинства:

- частицы переносятся в «холодном» [76, 77] состоянии со скоростями переноса до 2М и более;

- разогрев частиц происходит за счет преобразования кинетической энергии в тепловую в процессе взаимодействия с преградой, т.е. непосредственно при формировании покрытия;

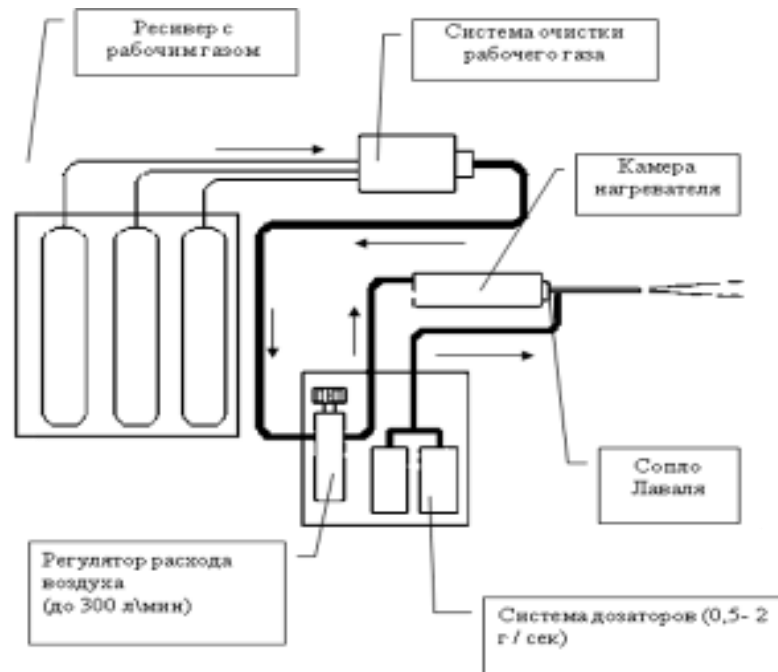


Рисунок 1.1. Принципиальная схема установки ХГДН

- возможностью получать покрытия, полностью адекватные по составу напыляемому порошку;
- возможностью получать композиционные покрытия с постоянным и регулируемым составом по толщине покрытия;
- отсутствие негативного термического воздействия на материал подложки;
- относительная безопасность, экономичность процесса и простота.

Благодаря своим преимуществам этот метод находит все большее применение в различных технологических процессах.

Основными параметрами процесса напыления являются: скорость и температура гетерофазного потока, концентрация порошка в потоке (расход порошкового материала). Имеется мало данных по связи температурно-скоростных параметров процесса и физико-механических характеристик получаемого напыленного слоя, применимых к серийно выпускаемым

установкам. В основном, это данные относящиеся к лабораторным, экспериментальным установкам, а также результаты теоретических расчетов [5, 6], поэтому исследования по получению этих функциональных зависимостей являются весьма актуальными, особенно с точки зрения управляемости процесса и получения воспроизводимых результатов. Однако для получения стабильно воспроизводимых результатов необходима надежная современная диагностическая аппаратура, специфичность которой определяется особыми температурно-скоростными параметрами процесса. Если измерение скорости и температуры торможения сверхзвукового газового потока не вызывает значительных трудностей, то измерение скорости и статической температуры двухфазного потока является делом достаточно сложным и кропотливым. Это связано с тем, что пролетающие частицы имеют значительный разброс по размерам и, как следствие, по температуре. Излучательная способность, зависящая от природы материала частиц и качества поверхности, имеет также большой разброс по величине. Распределение температуры, как по сечению, так и по оси потока, является величиной переменной и требует дополнительной корреляции. И, наконец, сам двухфазный поток является практически оптически прозрачным. Дополнительные трудности накладывает то обстоятельство, что интегральная статическая температура двухфазного потока при холодном газодинамическом напылении находится в инфракрасной зоне и, как следствие, возникают значительные сторонние помехи, соизмеримые с величиной измеряемого сигнала.

Указанные обстоятельства определяют одно из направления исследований, связанные с получением зависимости основных свойств покрытий (микротвердость, адгезионная прочность, пористость) от основных параметров процесса напыления методом ХГДН.

Многочисленные исследования [78] проводились в среде гелия либо газовой смеси (воздух – гелий). При увеличении концентрации гелия в воздушной среде от 0% до 100% скорость двухфазного потока увеличивалась от 250 м/с до 1200 м/с. Но использование гелия в качестве газа-носителя исключает

возможность практического использования метода ХГДН в силу высокой стоимости газа. По этой причине исследован более перспективный способ разгона частиц с использованием предварительного подогрева газового потока. При этом увеличивалась критическая скорость в газовой струе, скорость его истечения и скорость переносимых частиц (Рисунок 1.2) [79].

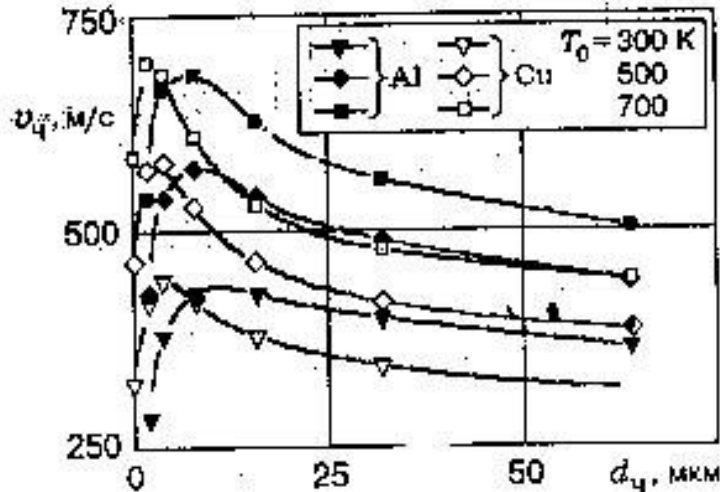


Рисунок 1.2. Зависимость критической скорости потока от температуры

Исследовался также коэффициент использования порошка в зависимости от скорости потока [5]. При этом очевидно, что при скоростях потока ниже критического идет процесс эрозионного воздействия порошка на поверхность подложки. С увеличением же скорости газового потока на поверхности начинает формироваться покрытие, и коэффициент использования порошка растет от 0 до 0,8.

На основании результатов работы [74], можно сделать вывод, что для каждого материала существует критическая скорость взаимодействия его с подложкой, при которой начинается осаждение покрытия. Увеличивая скорость газового потока, можно получать покрытия практически из любого металла, если упругие и пластические характеристики наносимого материала и подложки соизмеримы. При использовании гелия при скоростях потока выше 1200 м/с и используя предварительный подогрев газа, удавалось получать покрытия из тугоплавких металлов (Nb, Mo, W). В работе [72] показано, что для получения покрытия не обязательно иметь температуру частиц близкую к температуре

плавления, как при традиционных газопламенных и плазменных методах осаждения покрытия. В ряде случаев целесообразно увеличивать скорость частиц, снижая температуру потока и изменяя концентрацию частиц в потоке.

При малых концентрациях частиц в газовом потоке необходимо повышение их критической скорости для закрепления на подложке и увеличение времени на подготовку поверхности (Рисунок 1.3) [72, 80].

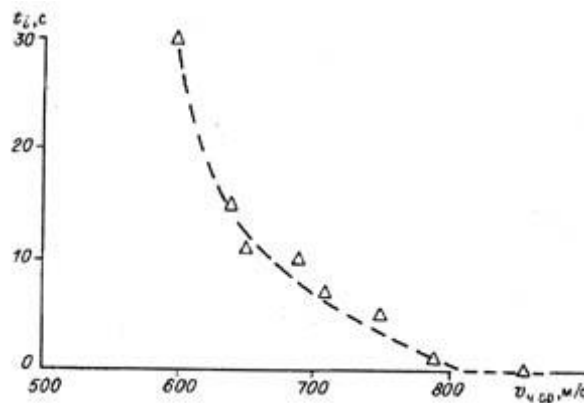


Рисунок 1.3. Зависимость времени активации от средней скорости соударения частиц

Следует отметить, что время, затраченное на активацию поверхности, существенно зависит от условий ее предварительной подготовки.

В работе [5] доказано, что необходимая дисперсность порошка для получения качественного покрытия является достаточно важной характеристикой порошкового материала используемого для напыления. Узкий диапазон фракционного состава повышает коэффициент использования порошка и делает процесс более производительным.

Процесс формирования покрытия из однородных материалов рассмотрен довольно подробно, однако, по имеющимся данным, не представляется возможным выбрать критерии для управления технологическими параметрами процесса получения покрытия с требуемой адгезией, при использовании различных сплавов или разнородных материалов [1, 81].

Есть основания предполагать, что такими параметрами является изменение скорости газового потока и напыляемых частиц при одновременном контроле и фиксации температуры газового потока и напыляемых частиц. Известные технологические установки, в том числе и имеющаяся в нашем распоряжении, не

снабжены требуемой диагностической аппаратурой. Кроме проблемных вопросов по управляемости технологическим процессом ХГДН, необходимо решить актуальные материаловедческие задачи по снижению или устранению термических и коэффициентных напряжений в системе «подложка – покрытие», возникающих из-за разности коэффициентов термического расширения (КТР) материалов подложки и покрытия. Вероятно, для получения композитов из таких материалов необходимо напыление либо функционально-градиентных покрытий, состоящих из композиции разнородных материалов, либо напыление многослойных покрытий, обеспечивающих совместимость материала подложки с материалом наносимого покрытия. Оптимизация этих параметров и определение их связи с адгезионной прочностью является одной из задач настоящей работы.

Это становится возможным при создании и проведении исследований на экспериментальной установке со специально разработанным измерительным оборудованием для: измерения скорости газового и гетерофазного потока; измерения температуры газового и гетерофазного потока.

Таким образом, метод ХГДН является перспективным способом создания покрытий из легкоплавких сплавов и сплавов на основе алюминия. Установление связи температурно-скоростных параметров установки ХГДН с адгезионной прочностью и твердостью покрытий возможно при создании специализированной установки, позволяющей измерять скорость и температуру гетерофазного потока.

1.2. Выбор матричного материала на основе алюминиевых сплавов для напыления покрытий

Многочисленные исследования начиная с 1950–1960-х годов [1], наглядно показали перспективность использования алюминиевых сплавов, прежде всего для подшипников и пар трения тяжелого машиностроения и транспорта. Были изучены и разработаны двойные и многокомпонентные сплавы на основе алюминия с различными вариациями по легирующим компонентам.

Достоинствами таких сплавов, например, при получении покрытий являются высокие пластические свойства, низкое межфазное натяжение, возможность легкого введения упрочняющих компонентов, высокие значения коррозионной стойкости и износостойкости [82]. Выбор алюминиевых сплавов для подшипников изначально осуществляли в соответствии с известным правилом Шарпи, по которому в мягкой матрице должны быть вкрапления твердых кристаллов. Поэтому первые применявшиеся сплавы содержали медь, железо, кремний и другие добавки, образующие интерметаллиды типов CuAl_2 , FeAl_3 , NiAl_3 , AlSb , кристаллы Si и др. Получение таких упрочняющих структур возможно при использовании технологии дисперсионного упрочнения [83, 84].

Широкий спектр исследований в области алюминиевых сплавов в 1980-х годах проведен группой исследователей во главе с И. Н. Фридляндером [81]. На основании изучения двойных, тройных и четверных систем, особенностей поведения алюминиевых сплавов в жидком состоянии, при закалке из жидкого состояния в процессе получения порошков, при формировании защитных покрытий, а также установлении закономерностей изменения свойств при зонном, фазовом и коагуляционном старении авторами разработан и предложен для практической реализации целый ряд сплавов на базе систем Al–Mg, Al–Fe, Al–Zn, Al–Sn, Al–Cu и их комбинаций. Например, теоретически и экспериментально показана перспектива использования сплавов системы Al–Zn–Cu–Mg (B95, B93, B96Ц1 и др.), практически исключаящих склонность к коррозии под напряжением и повысивших показатели сопротивления разрушению в покрытиях и объемных изделиях.

На основании изучения максимальной растворимости легирующих компонентов в твердых растворах двойных алюминиевых сплавов рекомендованы в качестве базовых системы с максимальной растворимостью Al–Zn, Al–Mg и из легкоплавких систем Al–Ga.

В качестве антифрикционных материалов для подшипников скольжения, наибольшее распространение получили сплавы, содержащие олово. Высокая усталостная прочность в сочетании с хорошими антифрикционными свойствами

предопределила быстрое распространение таких сплавов с середины XX века. Вначале алюминиевые сплавы применяли для изготовления монометаллических подшипников, а затем их стали широко использовать в качестве антифрикционного слоя в биметалле. Первые сплавы для монометаллических подшипников содержали до 7% Sn (RRAC-7 и RRAC-9 в Англии, 750 и XA750 в Америке и др.). Сплавы различались в основном легирующими упрочняющими компонентами. К середине 1960-х годов в США примерно на 30% всех моделей двигателей применяли подшипники из алюминиевых сплавов.

В СССР разработкой алюминиевых сплавов, содержащих олово, начали широко заниматься в конце 1940-х годов, одним из первых разработанных сплавов был А35 (в состав которого входили 3% Sn и добавки кремния, меди и никеля). Производство монометаллических подшипников указанного состава было освоено на Харьковском тепловозостроительном заводе [85]. В дальнейшем – начиная с 1956 г. – работы по изучению алюминиевых сплавов для монометаллических подшипников дизелей тепловозов были проведены в ЦНИИ МПС [86].

Исследованием свойств и разработкой технологии изготовления биметалла с алюминиевыми сплавами, содержащими от 20% до 30% олова, с конца 1950 г. начали заниматься ИМАШ и НАТИ вместе с рядом заводов. Применительно к тяжелым транспортным дизелям и другим агрегатам разработки по определению оптимальных свойств алюминиево-оловянных сплавов и технологии получения биметалла с этими сплавами осуществлялись в ЦНИИ МПС [86]. В настоящее время по итогам работ Гипроцветметобработки, ЦНИИ МПС, ИМАШ, НАМИ и ряда других металлургических заводов предложена и внедрена технология изготовления биметаллических подшипников с алюминиево-оловянными сплавами двух типов: А09-1 и А020-1 (ГОСТ 14113-69).

По мере накопления экспериментальных данных составы – применительно к конкретным условиям эксплуатации – оптимизировали [87, 88]. К настоящему времени наиболее реализуемыми для пар трения являются сплавы Al–Pb, Al–Zn, Al–Sn или их комбинации. При этом достигаются высокие показатели по

механическим свойствам (твердость, прочность, пластичность и выносливость), задиростойкости при испытании без смазки и стойкости к кавитации при работе в смазке.

Для напыления покрытий методом ХГДН необходимо использовать пластичные порошковые материалы с заданным химическим и фракционным составом. Существует множество технологий получения таких порошков, а именно, плазмохимический и газофазный синтез, химическое осаждение, механическое измельчение, распыление из жидкой фазы [89]. Наибольший интерес представляют порошки, полученные распылением из жидкой фазы, а именно методом высокоскоростного эжекторного распыления сплава заданного химического состава сжатым газом. Получаемый быстроохлажденный материал характеризуется улучшенной однородной, тонкой структурой, обладает благоприятным комплексом механических, физико-химических, коррозионных и других служебных характеристик [90]. Использование таких порошков позволит получать покрытия, обладающие высокими эксплуатационными характеристиками, в том числе износостойкостью.

Широко используемые в настоящее время антифрикционные сплавы на основе алюминия имеют низкую микротвердость, в связи с этим их применение становится практически не возможным особенно применительно к тяжело нагруженным узлам машиностроительной техники. Создание композиционной структуры методом дисперсного упрочнения сложный процесс, с точки зрения получения и управления структурой. Воздействующие в процессе эксплуатации термические нагрузки способны вызывать разупрочнение, вследствие растворения твердых фаз. Кроме того, в процессе изготовления биметалла и последующей штамповки вкладышей, упрочняющие компоненты могут образовываться или растворяться.

Теоретические предпосылки и практика показывают, что создать покрытия с высоким уровнем микротвердости можно за счет введения армирующей составляющей в состав основного сплава, т.е. создать композиционную структуру [91, 92]. Композиционной структурой материалов называют

гетерогенную объемную систему, состоящую из различающихся по свойствам, взаимно нерастворимых компонентов, строение которой позволяет использовать уникальные свойства каждого из них [93].

При получении объемных изделий можно вводить упрочняющую компоненту в виде дисперсных частиц или волокон в расплав основного металла [94], однако, для получения функциональных покрытий с такой структурой необходимо использовать порошки для дальнейшего напыления.

Реализовать это можно, если использовать для напыления:

- механическую смесь необходимых компонентов;
- отдельно вводимые, непосредственно в поток газа компоненты;
- специально подготовленные композиционные порошковые материалы, которые представляют собой единую механическую систему – пластичную матрицу, армированную твердой составляющей [15, 30].

Таким образом, в результате проведенного анализа показано, что создание покрытий из сплавов системы Al–Sn представляет большой научный и практический интерес, т. к. позволяет наносить покрытия на изделия сложной геометрической формы. Кроме того, показано, что для управления твердостью покрытия не всегда представляется возможным использовать сплавы с эффектом дисперсионного упрочнения – значительно эффективнее управлять содержанием упрочняющей компоненты через порошок [18, 31].

1.3. Создание композиционной структуры в функциональном покрытии

Как уже указывалось, в настоящее время традиционные функциональные покрытия практически подошли к пределу эффективной реализации свойств исходных материалов в связи со значительно возросшими требованиями к изделиям прецизионного машиностроения.

Реальным путем изменения комплекса свойств этого класса материалов является их модифицирование, т.е. армирование соответствующим компонентом (Рисунок 1.4), не снижающее их технологичность и одновременно существенно

повышающее комплекс эксплуатационных свойств. Основной механизм упрочняющего действия с повышением сопротивляемости матрицы деформациям под действием нагрузок [9].

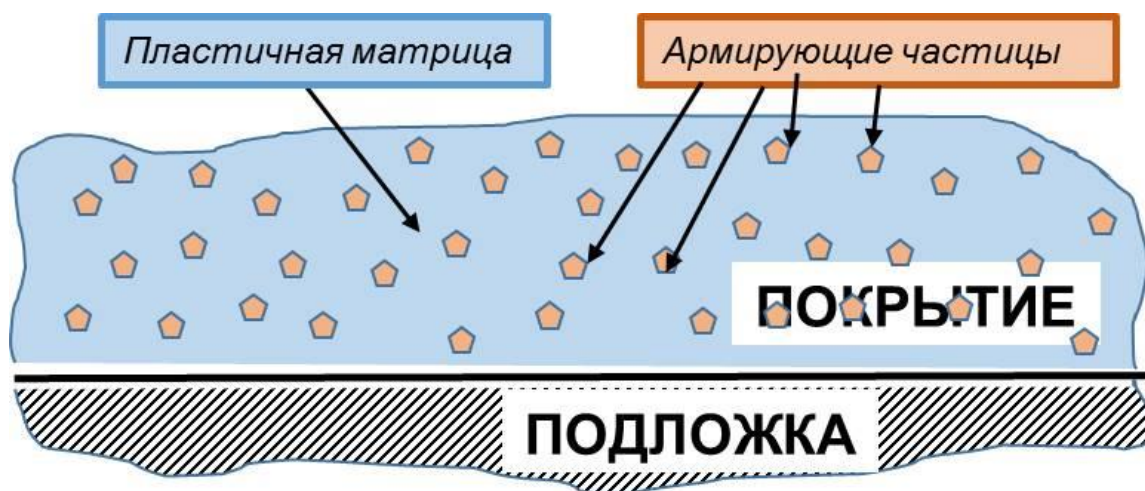


Рисунок 1.4. Композиционная структура покрытия

В частности, современная техника нуждается в более совершенных материалах для трибопар. Растут удельные нагрузки и скорости относительного перемещения трущихся деталей, ужесточаются температурные условия эксплуатации и агрессивность сред. Весьма остро стоит вопрос о снижении энергозатрат на трение, повышении долговечности и надежности трибосопряжений [95 - 97]. В связи с этим важное значение приобретают работы по созданию принципиально новых антифрикционных материалов с гетерофазной структурой, в том числе металлокомпозитных материалов (МКМ), в которых искусственно объединены высокопластичные матрицы, например, из сплавов алюминия, и тугоплавкие высокопрочные, высокомодульные наполнители. При таком сочетании фаз достигаются значительное повышение несущей способности подшипниковых материалов и расширение температурных диапазонов работы [19], высокая износостойкость и задиростойкость в условиях сухого трения скольжения [10, 98, 99], стойкость против абразивного изнашивания [100]. При этом преимуществами алюминиевых сплавов в качестве матриц МКМ являются высокие показатели теплопроводности [101].

Введение в алюминиевые сплавы армирующих частиц микронных размеров с резко отличной от матрицы твердостью не только повышает

износостойкость сплавов, но вследствие возросшей гетерогенности может расширить область существования во фрикционном контакте так называемых вторичных структур, обеспечивающих нормальное протекание процесса трения в широком диапазоне параметров нагружения [11, 102].

Качество функциональных покрытий с композиционной структурой или ФГП с заданным уровнем свойств во многом зависит от состава и структуры композиционного порошкового материала, получаемого либо в виде механической смеси или конгломератов, либо в виде поверхностно армированных или плакированных композиционных порошков. Тот и другой способ имеют свои достоинства и недостатки.

1.3.1. Создание композиционной структуры при напылении механических смесей порошков

Применение механических смесей порошков является самым распространенным способом получения композиционной структуры покрытия (Рисунок 1.5) [20, 103].

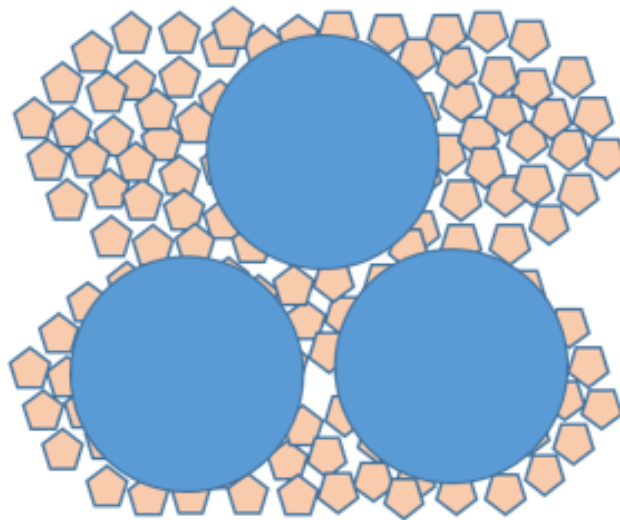


Рисунок 1.5. Схематическая структура механической смеси порошков

Известны способы нанесения механических смесей пластичных металлов фракцией от 5 мкм до 100 мкм и твердой неметаллической компоненты фракцией от 5 до 100 мкм с содержанием от 20% до 95%.

Введение неметаллических частиц может применяться для повышения качества покрытий, т.к. неметаллические частицы играют роль абразива – непрерывно очищают поверхность для напыляемого слоя и обеспечивают уплотнение слоев, за счет чего возрастает адгезия, когезия и плотность покрытий [103, 104].

Так, введение в порошковую смесь неметаллических частиц в количестве до 80% с целью упрочнения позволяет повысить микротвердость алюминиевых покрытий примерно в два раза [105, 106]. Для этого используют неметаллические частицы с фракцией равной фракции пластичного металлического порошка или значительно более мелкую в том числе и наноразмерную, т.к. чем мельче фракция частиц, тем выше интегральная площадь контакта при одинаковом весовом соотношении.

Негативным эффектом является то, что при уменьшении размера фракции повышается вероятность образования агломератов. Содержание в покрытии агломератов приводит к тому, что возрастает количество и размер пор, которые являются концентраторами напряжений и приводят к снижению адгезионной и когезионной прочности покрытий (Рисунок 1.6) [107]

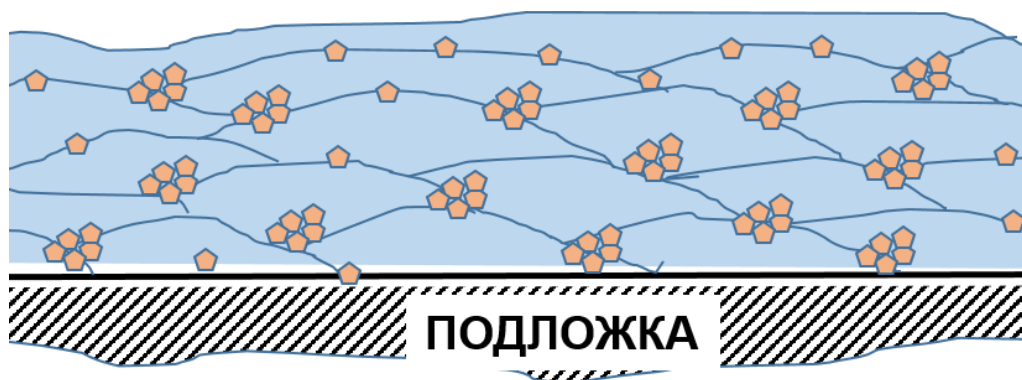


Рисунок 1.6. Схематическая структура функционального покрытия из механической смеси порошков

Кроме того, эффективное использование порошков со столь различной природой материала и размерами частиц требует усложнения конструкции системы подачи порошка в поток газа [15, 73].

Достоинство описанного метода заключается в простоте подготовки исходной композиции порошкового материала. Недостатком использования

механических смесей, существенно усложняющим процесс напыления, является то, что при нанесении разнородных материалов, либо порошков различных фракций необходимо вводить порошок в поток газа в различных сечениях струи, так как для каждого материала имеется своя оптимальная скорость и температура, а также концентрация частиц в потоке [15].

Если использовать для напыления предварительно полученные механические системы с четкой границей фаз в составе одной частицы порошка (композиционные порошки), становится возможным формирование покрытий с равномерным составом. Использовать такие частицы для напыления становится значительно проще. Из известных типов композиционных порошков можно выделить три основных: конгломерированные порошки; плакированные порошки; армированные порошки. Указанные типы порошков будут рассмотрены в следующих подразделах.

1.3.2. Создание композиционной структуры при напылении конгломерированных порошков

Технологию получения конгломерированных порошков используют в основном для получения порошков на основе тугоплавких материалов. Известны способы получения таких порошков [108, 109]. Конгломерированные порошки получают путем смешивания исходных компонентов с использованием связующего, последующим брикетированием и спеканием в вакууме. Полученные «спёки» подвергаются дроблению, а затем рассеиваются на ситах, на которых и отбирается требуемая фракция (Рисунок 1.7).

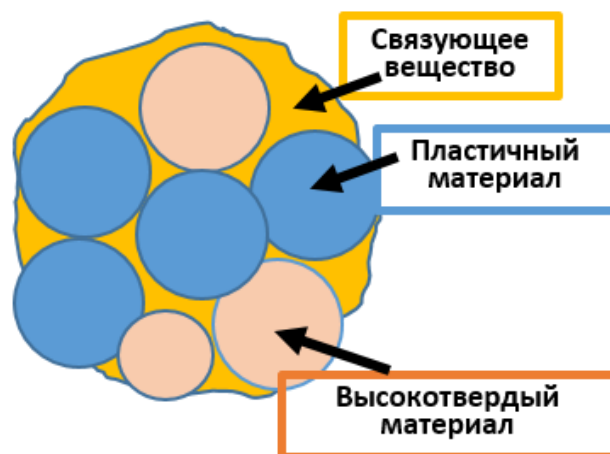


Рисунок 1.7. Схематическая структура конгломерированного порошка

Достоинством данной технологии является то, что еще на стадии получения композиционного порошкового материала, варьируя режимами спекания, можно управлять структурно-фазовым составом получаемых из него покрытий (Рисунок 1.8).

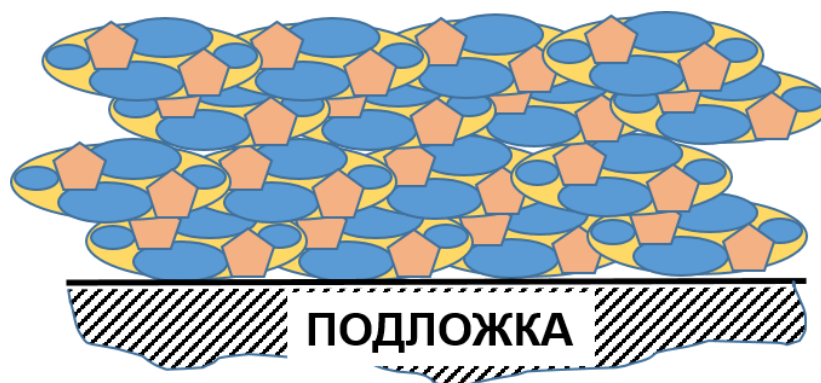


Рисунок 1.8. Схематическая структура функционального покрытия из конгломерированного порошка

Недостаток такого покрытия в том, что в нем наблюдаются следы связующего вещества, хотя при использовании высокотемпературных методов напыления значительная часть связующего испаряется. Вероятно, данное обстоятельство будет являться основным ограничением для использования таких порошков для напыления покрытий методом ХГДН.

1.3.3. Создание композиционной структуры при напылении порошковых материалов, полученных методом механохимического синтеза

По-видимому, наиболее перспективным известным методом, обеспечивающим получение на поверхности порошка твердой компоненты, является метод механохимического синтеза.

Определение «механохимия» введено В. Оствальдом в «Учебнике общей химии» [110], в котором он, в частности, рассматривал различные виды стимулирования химических процессов. Механохимия изучает процессы, в которых механическое движение управляет химической реакцией, производя сближение молекул, а также обеспечивая энергию активации. Термин «механосинтез» был введен для того, чтобы описать механохимические процессы, происходящие при построении сложной молекулярной системы. С одной стороны, механосинтез – механическая обработка твердых смесей, в результате которой происходят измельчение и пластическая деформация веществ, ускоряется массоперенос и осуществляется перемешивание компонентов смеси на атомарном уровне, активируется химическое взаимодействие твердых реагентов. С другой, механосинтез – это химический синтез, выполняемый механическими системами и позволяющий позиционировать реагирующие вещества с высокой степенью точности [111].

Бурное развитие механохимии в последнее десятилетие стало возможным благодаря успехам фундаментальных исследований, совершенствованию ряда технологических процессов, в том числе синтеза новых материалов. Не меньшее значение имели пересечения механохимии со смежными областями знаний, такими как физика и химия твердого тела, теория прочности, физико-химическая механика, катализ, химическая технология, материаловедение, геология, биохимия, химия лекарственных веществ и др. Применение методов механохимии в технике (в производстве строительных материалов и керамики, в том числе сверхпроводящей, в порошковой металлургии, пищевой и

фармацевтической промышленности и т.п.) также привлекли к механохимии внимание исследователей и технологов [112].

Широкие возможности механохимии как химии нетепловых низкотемпературных реакций иллюстрирует тот факт, что в твердой фазе без растворения или плавления реагентов были синтезированы тугоплавкие вещества и интерметаллиды, неорганические и органические соединения, молекулярные комплексы, модифицированы полимеры и фармацевтические препараты, созданы композиционные материалы. Механохимический синтез осуществляется при сравнительно низкой температуре, когда формирование совершенной кристаллической структуры затруднено. Это открывает путь к синтезу веществ и материалов в нанокристаллическом и аморфном состояниях [112].

Механическое воздействие на вещество обычно представляет некоторую комбинацию давления и сдвига [113]. Поэтому исследователи во всем мире пытаются выяснить роль каждого из этих компонентов в изменении физико-химических свойств твердых веществ, претерпевающих воздействие. Эта область науки получила свое развитие начиная с работ Г. Таммана [114], Бриджмена [115], выполненных еще в начале XX века, но не потеряла своего значения и в настоящее время и занимает одну из ключевых позиций в современной химии твердого тела.

Круг исследований, посвященный влиянию давления на физико-химические свойства твердых веществ, непрерывно расширяется. Причем в последнее время четко прослеживается тенденция к усилению интенсивности подобного рода исследований. Связано это, скорее всего, с большими возможностями, которые открывает это направление в понимании механизма межмолекулярных взаимодействий, как в биологических объектах, так и в неорганических системах, используемых для создания функциональных покрытий широкого спектра применения [113].

Проведение механической активации в мельницах является наиболее распространенной операцией в механохимии. Главными причинами этого, по-

видимому, следует считать, во-первых, относительную простоту проведения эксперимента и, во-вторых, тот интерес, который проявляют к механохимии технологи, поскольку мельница является одним из самых распространенных аппаратов, в которых осуществляется механическое воздействие на вещество. Вместе с тем, и механика, и физика процессов, происходящих в таких аппаратах, до сих пор остаются предметом многочисленных исследований [116, 117]. Большая часть этих исследований посвящена оптимизации процесса измельчения – процесса, в котором самым существенным моментом является получение максимальной поверхности твердого вещества при минимальных затратах энергии, важным представляется и процесс получения композиционных порошковых материалов системы «металл – неметалл» с четкой границей раздела фаз.

Рассмотрим основные два способа получения композиционных порошков, плакирование и армирование.

1.3.3.1. Получение и нанесение плакированных порошков

Плакированные порошки представляют собой гетерогенную систему, состоящую из ядра и внешней оболочки, которые можно разделить на два вида:

- Ядро – пластичная матрица, оболочка – высокотвердый слой (Рисунок 1.9);
- Ядро – твердое вещество, оболочка – пластичный материал (Рисунок 1.10).



Рисунок 1.9. Схематическая структура плакированного порошка с пластичным ядром



Рисунок 1.10. Схематическая структура лакированного порошка с высокотвердым ядром

Толщина лакирующего слоя зависит от исходных материалов порошков, от технологии и режимов получения таких композиционных порошков. Структура покрытий из порошков (Рисунок 1) будет представлять собой равномерно распределенные в объеме матричного материала (ядра частицы) фрагменты высокотвердой оболочки (Рисунок 1.11).

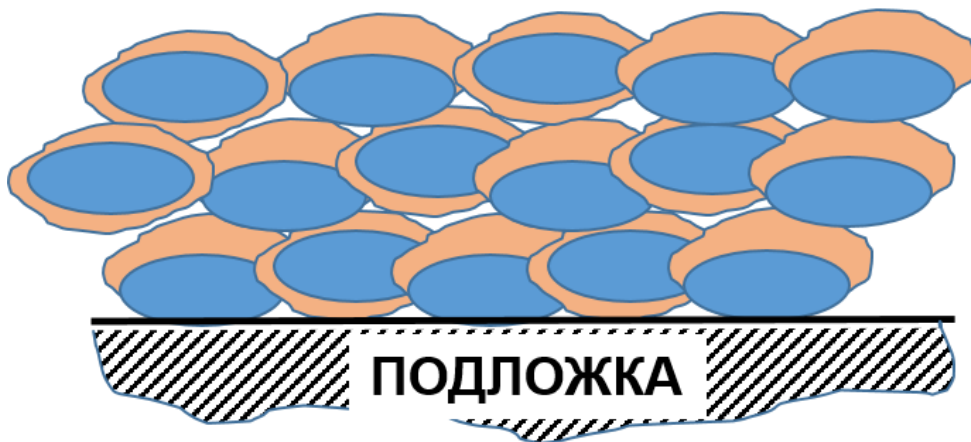


Рисунок 1.11. Схематическая структура функционального покрытия из лакированного порошка с пластичным ядром

Однако использование таких порошков ограничено вследствие того, что образовавшийся на поверхности пластичного ядра высокотвердый слой может внести негативный вклад при образовании адгезионных и когезионных связей.

Порошки с высокотвердым ядром могут обеспечить получение покрытий с равномерно распределенной армирующей компонентой (Рисунок 1.12).

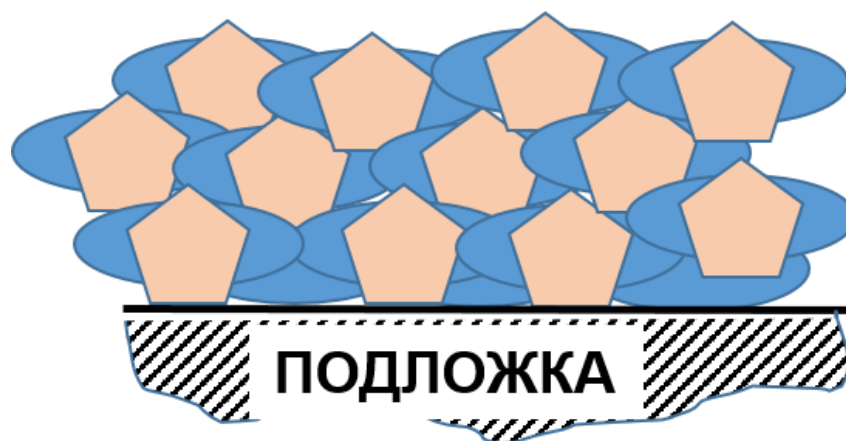


Рисунок 1.12. Схематическая структура функционального покрытия из плакированного порошка с высокотвердым ядром

Использование порошков с высокотвердым ядром ограничено вследствие того, что необходим достаточно толстый плакирующий пластичный слой для образования адгезионных и когезионных связей.

Известен способ получения композиционного порошка [118], состоящего из ядра карбонитрида титана или нитрида титана и оболочки, состоящей из слоя никеля, при следующем соотношении слоев ядра и оболочки, мас. %: TiC_xNy , где $0,28 \leq x \leq 0,70$; $0,27 \leq y \leq 0,63$. Способ включает подачу прекурсора, содержащего никелид титана и карбид титана, в камеру испарителя-реактора, обработку в потоке азотной плазмы при скорости потока плазмы 60–100 м/с и при скорости подачи прекурсора 100–140 г/час, последующее охлаждение в потоке азота и улавливание продукта испарения на поверхности фильтра. Прекурсор содержит указанные компоненты при следующем соотношении $TiNi:TiC=25-50:50-75$. Получается композиционный порошок, обеспечивающий получение твердых сплавов более высокой твердости. Этот способ в принципе может быть адаптирован для сплавов алюминия.

Недостатком можно считать большую энергоемкость операций при получении плакированного слоя.

1.3.3.2. Получение и нанесение армированных порошков

Армированный порошок представляет собой пластичную матрицу, на поверхности которой равномерно распределена армирующая компонента, обычно значительно более мелкой фракции (Рисунок 1.13).



Рисунок 1.13. Схематическая структура армированного порошка

Применение армированных порошков для покрытий позволяет получать структуру с равномерно распределенной армирующей компонентой в объеме покрытия (Рисунок 1.14). Кроме того, при получении армированных порошков можно менять в широком диапазоне степень их армирования [119].

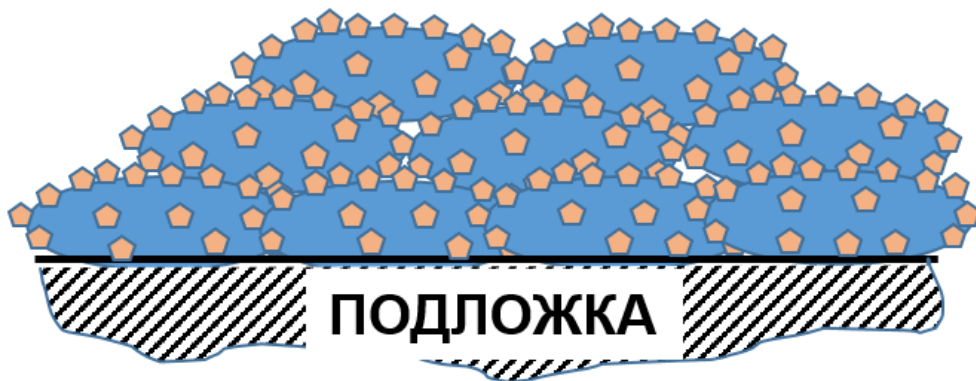


Рисунок 1.14. Схематическая структура функционального покрытия из армированного порошка

Армированные порошковые материалы могут использоваться непосредственно для напыления покрытий, либо при производстве конструкционных материалов методами формования и дальнейшего спекания [120, 121]. В работе [119] показан способ получения композиционных порошковых материалов с металлической матрицей, армированной тугоплавкими наполнителями методом сверхскоростного механосинтеза. Может использоваться для получения защитных износостойких покрытий с заданными свойствами для различных деталей машин и оборудования. Порошок металлической матрицы получают путем измельчения порошкового материала

дисперсностью не более 100 мкм в высокоскоростном дезинтеграторе с помощью двух роторов с измельчающими элементами, изготовленными из плакирующего материала. Плакированный порошок смешивают с порошком керамического упрочнителя и обрабатывают в высокоскоростном дезинтеграторе с помощью двух роторов при скоростях относительного движения ударных элементов 120–220 м/с и частоте ударов 7000–10000 уд./с. Измельчающие элементы роторов изготовлены из материала твердостью ниже твердости обрабатываемого порошка или смеси. Полученные дисперсно-упрочненные частицы системы металл – керамика имеют степень армирования не менее 60% и обеспечивают высокие эксплуатационные свойства покрытия из них.

Известен способ получения композиционного материала для получения покрытий наплавкой. Присадочный материал: присадочные прутки сплошного сечения получали из композиционного материала с матрицей из алюминиевого сплава АК12М2МгН (ГОСТ 1583-93). В качестве армирующих частиц использовали частицы карбида кремния SiC, средний размер которых составлял 14 и 28 мкм. Объемная доля частиц в присадочном композиционном материале 5%, что должно обеспечивать качественное формирование наплавленных валиков [121]. Композиционный материал получали жидкофазным методом путем механического замешивания частиц карбида кремния в расплав матрицы. Порошковые присадочные прутки получали прокаткой до нужного размера заготовок, представляющих собой цилиндрические оболочки диаметром 24,5 мм с толщиной стенки δ , равной 4,5 мм из сплава АД1, заполненные композиционной смесью, состоящей из 95% порошка сплава АМг3 со средним размером частиц 25 мкм и 5 % порошка SiC со средним размером частиц 14 мкм. Исходный образец прокатывали в ручье на квадрат размером 2,5x2,5 мм за 10 переходов с промежуточными отжигами при 350°C в течение 30 мин. Граница раздела между оболочкой и порошковым сердечником и сам сердечник не содержат пор, а распределение частиц SiC в сердечнике равномерное.

В работе [122] предложен способ получения композиционных материалов на основе алюминия. Может использоваться в производстве конструкционных

материалов для точных приборов систем управления и навигации космических аппаратов. Порошок композиционного материала получают путем механического легирования порошка матричного сплава Al–Si–Be дисперсными углеродом, кремнием, никелем в смеси азота с 2–8% кислорода. После механического легирования в порошок композиционного материала добавляют 2,5–25 мас.% порошка алюминия, осуществляют дегазацию и компактирование. Полученный материал обладает высокой технологической пластичностью.

В работе [123] предложен способ получения композиционного материала на основе алюминия, который может использоваться в качестве конструкционного материала для точных приборов систем управления и навигации космических аппаратов. Композиционный материал содержит, мас. %: кремний 35,0–46,0; никель 2,0–5,0; бериллий 0,0001–0,049; оксид алюминия 0,1–3,0; углерод 0,5–2,0; алюминий – остальное. Материал получен путем приготовления расплава, содержащего алюминий, кремний, никель, бериллий, и его распыления с получением порошка сплава. Затем осуществляют механическое легирование порошка дисперсными углеродом и кремнием с доведением содержания кремния в материале до 35–46 мас.% в азотно-кислородной смеси с содержанием кислорода 2–8 об.%. Полученный материал имеет однородную дисперсную структуру, что обеспечивает высокую стабильность прецизионных характеристик упругости и эксплуатационную надежность высокоточных приборов систем управления и навигации при работе предлагаемого материала в контакте со сталью в течение длительного срока эксплуатации.

К достоинствам можно отнести то, что покрытия имеют высокую адгезионную и когезионную прочность, низкую пористость, а наличие мелкодисперсной армирующей компоненты, равномерно распределенной в покрытии, значительно увеличивает прочностные характеристики [9].

Таким образом, для определения оптимального варианта получения функциональных покрытий с высоким уровнем эксплуатационных

характеристик методом ХГДН целесообразно экспериментально проверить различные модификации рассмотренных исходных порошковых композиций.

Ниже (Таблица 1.1) представлены данные о мировом уровне основных характеристик функциональных покрытий, полученных из пластичного матричного материала на основе системы алюминия и композиционного порошка на основе алюминия и Al_2O_3 , взятые из литературных источников [7, 8, 76, 105, 106, 124 - 130].

Таблица 1.1. Мировой уровень основных характеристик функциональных покрытий на основе алюминия

Характеристика	Матричный материал (на основе алюминия и его сплавов)	Композиционные покрытия
	Мировой уровень	Мировой уровень
Адгезионная прочность, МПа	30–50	25–35
Пористость, %	Не более 1,5	Более 5
Микротвердость, HV	45–50	До 190

Представленные характеристики будут являться ориентиром при разработке и исследовании функциональных покрытий.

1.4. Преимущества многослойных и функционально-градиентных покрытий

Из анализа данных следует, что при увеличении твердости покрытия существенно уменьшается адгезионная прочность. Это связано, по всей видимости, с тем, что при увеличении твердости уменьшается доля пластичного матричного материала по площади границы раздела покрытие – подложка. Таким образом, если объединить в одном покрытии высокую адгезионную прочность матричного покрытия (Рисунок 1.15) и высокую твердость композиционного покрытия (Рисунок 1.16), это позволило бы повысить характеристики покрытия.

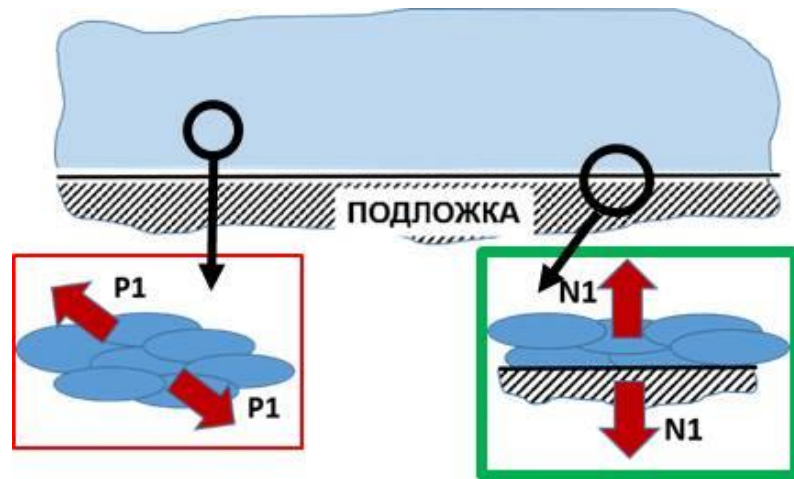


Рисунок 1.15. Схематическая структура функционального покрытия из матричного порошка

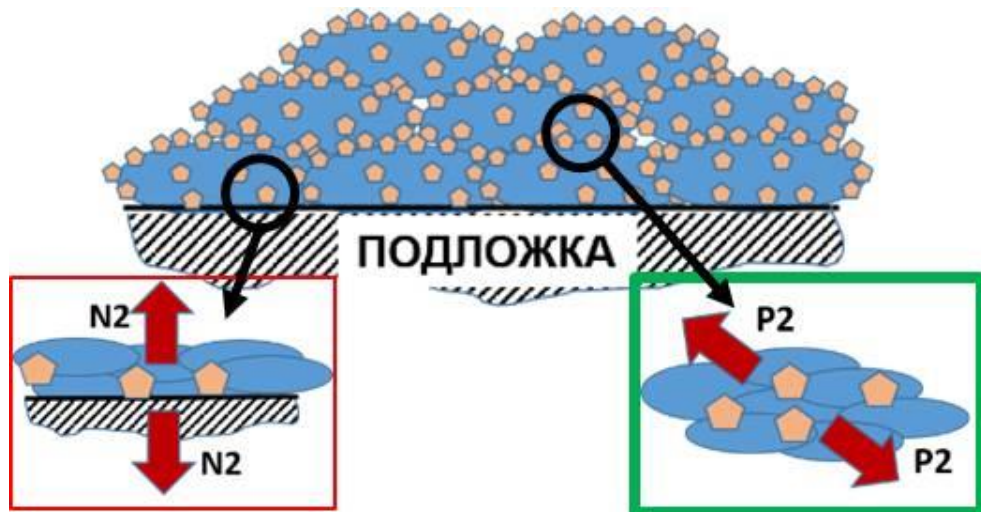


Рисунок 1.16. Схематическая структура функционального покрытия из композиционного порошка

P и N – условные усилия, возникающие в покрытии и способствующие нарушению его целостности (разрушению). Очевидно, что $N1 > N2$ (было отмечено выше), $P1 < P2$, так как армирующие частицы в составе покрытия создают препятствия распространению трещин.

Создать такую структуру в объеме одного покрытия возможно, если использовать следующие технологические способы нанесения: нанесение многослойного покрытия (Рисунок 1.17), нанесение функционально-градиентного покрытия (Рисунок 1.18) [21, 131, 132].

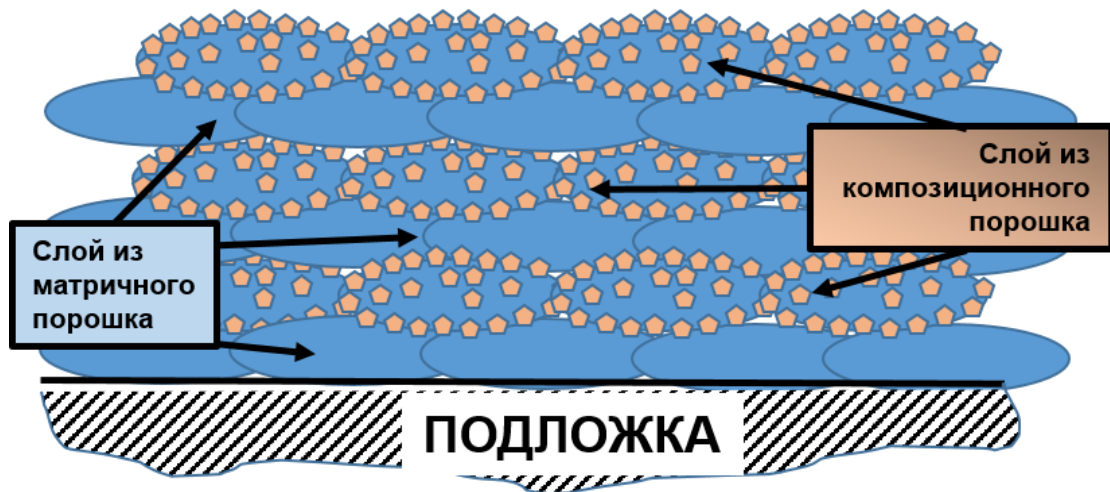


Рисунок 1.17. Схематическая структура многослойного покрытия

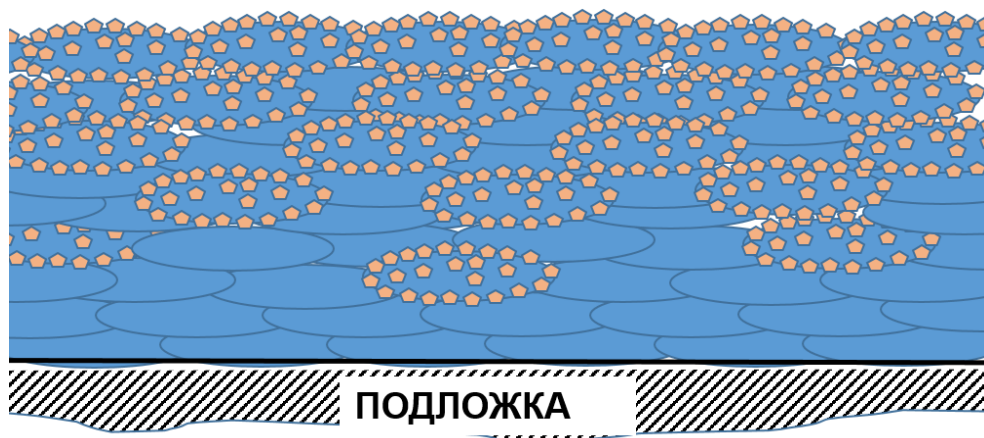


Рисунок 1.18. Схематическая структура функционального-градиентного покрытия

Схемы получения таких покрытий весьма схожи, и для их получения можно использовать одно и то же технологическое оборудование, содержащее не менее двух дозаторов, однако для получения ФГП необходим дополнительный модуль управления дозаторами порошка.

Структура представленных покрытий содержит на границе раздела покрытие – подложка слой из пластичного матричного материала, что, несомненно, повышает адгезионную прочность, однако наблюдается принципиальное различие, состоящее в том, что в многослойном покрытии существуют границы раздела между слоями.

Наиболее широко многослойные покрытия используются в качестве теплозащитных покрытий [133], а также покрытий для режущего инструмента [134]. В многослойном покрытии возможны проявления негативных эффектов. В

многослойном покрытии между набором слоев существует граница с резким перепадом химического состава (и, следовательно, физико-механических свойств), которая является концентратором напряжений. Основной причиной разрушения многослойных теплозащитных покрытий являются термомеханические напряжения на границе слоев, что было отмечено в работе [135]. Термомеханические напряжения также усугубляются действием остаточных напряжений, возникающих в покрытиях, полученных высокотемпературными методами.

Важным достоинством функционально-градиентных покрытий является то, что состав покрытия по толщине изменяется плавно, без граничных переходов. Это делает их наиболее привлекательными по сравнению с многослойными покрытиями.

Из этого следует, что необходимо экспериментально определить оптимальный состав пластичного матричного материала на основе алюминия, модифицирующей твердой компоненты, способ их конгломерации с учетом специфики и преимуществ метода ХГДН, в т.ч. при создании перспективных функционально-градиентных покрытий.

Освоение указанного комплекса инновационных технологий позволит решать конкретные актуальные задачи машиностроения за счет использования новых материалов и мобильности управления процессом.

Выводы по Главе 1

Таким образом, применение технологии нанесения покрытий системы Al-Sn позволит значительно расширить область эксплуатации пар трения за счет гибкого регулирования свойств исходных материалов и более оперативного проведения ремонтно-восстановительных работ.

Наиболее перспективным методом, позволяющим значительно снизить воздействие температурного поля потока является метод «холодного» газодинамического напыления (ХГДН), позволяющий наносить покрытия из пластичных материалов на стальную поверхность, в т.ч. сплавов системы Al-Sn.

Снизить пористость и повысить однородность покрытия с композиционной структурой, возможно при использовании для напыления композиционных порошков, представляющих собой единую механическую систему с пластичной матрицей и армирующей компонентой в виде твердых дисперсных частиц.

Создать покрытие с высокими значениями микротвердости и адгезионной прочности возможно при сочетании явных преимуществ гомогенной и композиционной структуры функциональных покрытий, а именно получить многослойное покрытие или функционально-градиентное покрытие.

Поэтому задача разработки технологии получения многослойного и функционально-градиентного покрытия с использованием матричного порошка и композиционного порошка представляет большой научный интерес.

Глава 2. МАТЕРИАЛЫ, ОБОРУДОВАНИЕ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

2.1. Материалы для получения функциональных покрытий

Для создания функциональных покрытий использовались следующие материалы:

- Исходные порошки чистых металлов:
 - алюминиевый порошок марки ПА-ВЧ-I (ТУ-1791-99-020-98);
 - цинковый порошок ПЦ1 ГОСТ 12601-76;
 - порошок олова ПО1 (ТУ 48-6-123-91);
 - порошок оксида алюминия (ТУ 1711-001-00658716-99).
- Вспомогательные материалы:
 - Лист $\frac{\text{Б-ПН-3,0 ГОСТ 19903-74}}{\text{СтЗпс ГОСТ 16523-70}}$.

2.1.1. Состав исходных порошков чистых металлов

Для получения порошков системы Al–Sn–Zn были опробованы механические смеси исходных порошков чистых металлов (Таблица 2.1 – Таблица 2.3).

Таблица 2.1. Состав алюминиевого порошка марки ПА-ВЧ-I (ТУ-1791-99-020-98)

Марка порошка	Насыпная плотность, г/см ³ , не менее	Химический состав. %				Влага, не более
		Al, не менее	Примеси, не более			
			Fe	Si	Cu	
ПА-1	0,96	99	0,35	0,4	0,02	0,2

Таблица 2.2. Состав цинкового порошка ПЦ1 ГОСТ 12601-76

Марки	Химический состав, %							
	Zn, не менее	Примеси, не более						
		Fe	Pb	Cd	Cu	Sn	As	Sb
ПЦ1	96	0,0005	0,001	0,0015	0,0004	0,001	0,0005	0,001

Таблица 2.3. Состав порошок олова ПО1 (ТУ 48-6-123-91)

Марка	Химический состав, %									
	Sn, не менее	Примеси, не более								Остаток
		Pb	Fe	Cu	S	Bi	As	Sb	O	
ПО1	99,1	0,15	0,02	0,03	0,016	0,05	0,015	0,05	0,5	0,02

Фракционный состав порошков составлял 20–60 мкм, что является одним из основных условий использования его на установке «Димет-403».

2.1.2. Армирующая компонента – порошок электрокорунда

Главными критериями выбора материала армирующей компоненты были – высокая микротвердость, требуемая фракция в состоянии поставки, способность к образованию когерентной связи с материалом матрицы, невысокая стоимость. На основании выше сказанного в качестве материала армирующей компоненты выбран порошок электрокорунда ТУ 1711-001-00658716-99, с максимальным размером единичного зерна не более 15 мкм. Массовая доля зерен размерами 0-7 мкм в порошке составляет не менее 90%. В качестве примесей присутствуют Fe_2O_3 - 0,1%, SiO_2 - 0,6%, Na_2O - 0,7% мас.

Порошок электрокорунда использовался в качестве армирующей компоненты при получении композиционных порошков и функциональных покрытий.

2.1.3. Вспомогательные материалы

Материал подложки выбирали исходя из того, что большинство изделий машиностроения выполнено из стали. Выбор толщины был обусловлен достаточной жесткостью, что исключало возможное отслоение покрытия в результате случайного изгиба подложки.

Важным моментом, с точки зрения достижения высокой адгезионной прочности, является оптимальный выбор материала подложки и способа подготовки поверхности. При подготовке подложки к напылению необходимо произвести пескоструйную обработку поверхности для получения ювенильной поверхности. В случае загрязнения поверхности органическими соединениями необходимо применить обезжиривающие и специальные средства очистки поверхности.

Для изготовления исследуемых образцов функциональных покрытий использовали стальной лист из Ст3 толщиной 3 мм.

2.2. Технологическое и аналитическое оборудование

Для получения порошкового материала и нанесения функциональных композиционных покрытий использовалось следующее технологическое оборудование:

- «Димет-403» – установка для нанесения покрытий методом ХГДН;
- Kawasaki-FS003 – робот-манипулятор для автоматизации процесса нанесения покрытий;
- МРС (г) 3800 – установка для получения порошков из расплава;
- ДЕЗИ-15 – дезинтегратор для получения механолегированных порошков;
- МПП 1-2 – планетарная мельница для получения механолегированных порошков;
- ИВЧ-3 – чашечный истиратель для получения механолегированных порошков;

- Memmert V500 – сушильный шкаф для проведения термической обработки порошков.

Для исследования порошковых материалов и функциональных композиционных покрытий использовалось аналитическое и испытательное оборудование:

- Malvern Zetasizer Nano-ZS + Malvern Mastersizer 2000 – анализатор для определения гранулометрического состава порошков;
- LeicaDM-2500 – оптический микроскоп для проведения металлографических исследований;
- Tescan VEGA 3 – растровый электронный микроскоп для проведения металлографических исследований;
- Tescan VEGA II – для проведения исследования рентгеноспектрального микроанализа (РСМА) элементного состава порошков и функциональных покрытий;
- Rigaku UltimaIV – дифрактометр для определения рентгеноструктурного качественного и количественного фазового анализа порошков и покрытий;
- ПМТ-3М – микротвердомер;
- AFFRI – микротвердомер;
- Instron 1000 – для определения адгезионной прочности покрытий;
- ИИ50-18 – установка для определения коэффициента трения и интенсивности изнашивания.

2.2.1. Оборудование для получения матричных порошков методом высокоскоростного эжекторного распыления из сплава (металлургический метод)

Одной из перспективных технологий получения мелкодисперсных материалов является металлургический метод высокоскоростного распыления и закалки из жидкого состояния потоком газа и охлаждения его в газообразной среде со скоростью до $10^3 \div 10^4 \text{ K}^{-1}$ при свободном полете диспергированных частиц.

Распыление ведется в азоте высокой чистоты. Ввод газа в рабочую камеру осуществляется тангенциально. Распыление сплавов системы Al–Sn–Zn вели при температуре расплава 800°C, температура распыляемого азота 400°C. Порошок, осевший в циклоне, рассеивали на требуемые фракции.

Это высокопроизводительный метод получения быстрозакаленных порошков диаметром от 1,0 мкм до 1000 мкм. Установка, включающая плавку, распыление и кристаллизацию в едином, замкнутом объеме, создает наилучшие условия для изготовления порошков высокой чистоты и качества, с сохранением стехиометрического состава шихтового расплава вследствие большой скорости охлаждения.

Другим достоинством описанного процесса является достижение микрокристаллического состояния диспергированных сплавов.

При этом идет гетерогенное зарождение центров кристаллизации с возможным образованием метастабильных фаз в условиях появляющегося при скоростной закалке существенного переохлаждения. Элемент мелкозернистой структуры в этом случае составляет от 0,01 мкм до 10 мкм в зависимости от скорости охлаждения.

Это очень важно для сплавов, используемых в условиях длительного трения, когда структура, наряду с химическим составом играет решающую роль.

2.2.2. Оборудование для получения композиционных порошков методом механосинтеза

Ценные возможности обеспечивает метод механического легирования, в процессе которого смесь порошков сплава и упрочняющей фазы подвергается высокоэнергетической механообработке. Механолегирование порошков ускоряет твердофазные процессы: накопление структурных изменений в объеме и активных состояний на поверхности кристалла, деформаций решетки, рост количества дефектов и дислокаций, разрыв или ослабление связей внутренних слоев вещества с атомами поверхности. В результате многократного измельчения и повторного укрупнения частиц за счет «холодной сварки» в

структуру сплава внедряются частицы добавок, «осколки» поверхностной оксидной пленки, продукты взаимодействия компонентов шихты, атмосферы мельницы и технологических добавок. Сам факт разрушения частиц способствует протеканию сплавообразования, так как на свежесформированной поверхности все атомы в результате разрыва связей кратковременно активированы.

В результате увеличения свободной энергии обрабатываемого материала возникают термодинамические нестабильные состояния. Все это, в свою очередь, облегчает и ускоряет процессы образования КМ, формируется улучшенная однородная структура материала.

2.2.2.1. Мельница периодического действия МПП 1-2

Мельница периодического действия МПП 1-2 (Рисунок 2.1) используется для получения композиционных порошков в результате совместной обработки порошков, которые помещаются в барабаны вместе с шарами высокой твердости. Обработка осуществляется в результате воздействия центробежных сил, которые возникают при вращении барабанов вокруг центральной оси и вокруг собственных осей. Первый параметр определяет ускорение центробежного поля, которое в десятки и даже сотни раз может превышать ускорение гравитационного поля, второй – характер движения внутрибарабанной загрузки, формирующий способ воздействия мелющих тел на материал.



Рисунок 2.1. Мельница планетарная МПП 1-2

2.2.2.2. Дезинтегратор ДЕЗИ15

Дезинтегратор марки DESI-15 позволяет проводить ударно-дезинтеграторную обработку порошковых материалов, которая обеспечивает получение порошков для напыления методом ХГДН (Рисунок 2.2).



Рисунок 2.2. Дезинтегратор ДЕЗИ 15

Суть метода ударно-дезинтеграторной обработки заключается в динамическом воздействии на материал, находящийся между зубчатыми роторами, вращающимися навстречу друг другу со скоростью до 20 000 об/мин. При этом возникают два противоположно направленных потока частиц, в результате соударения которых происходит их измельчение и активация. Изменение режимов обработки (скорости вращения роторов, числа соударения между частицами, длительности процесса измельчения) позволяет получать порошки требуемого гранулометрического состава.

2.2.2.3. Чашечный истритель ИВЧ-3

Истритель вибрационный чашечный ИВЧ-3 (Рисунок 2.3) используется для получения композиционных армированных порошков. Обработка осуществляется по тому же принципу что и в МПП-1-2, отличие заключается в том, что основное воздействие при обработке является истирание обрабатываемых порошков в закрытом барабане.



Рисунок 2.3. Чашечный истиратель ИВЧ-3

2.2.3. Установка для нанесения покрытий методом ХГДН «ДИМЕТ-403»

Установка «Димет-403» используется для нанесения покрытий из порошковых материалов методом ХГДН (Рисунок 2.4 и Рисунок 2.5). Подробно принцип нанесения покрытий описан в Главе 1.



Рисунок 2.4. Внешний вид установки ДИМЕТ-403 (вид спереди)

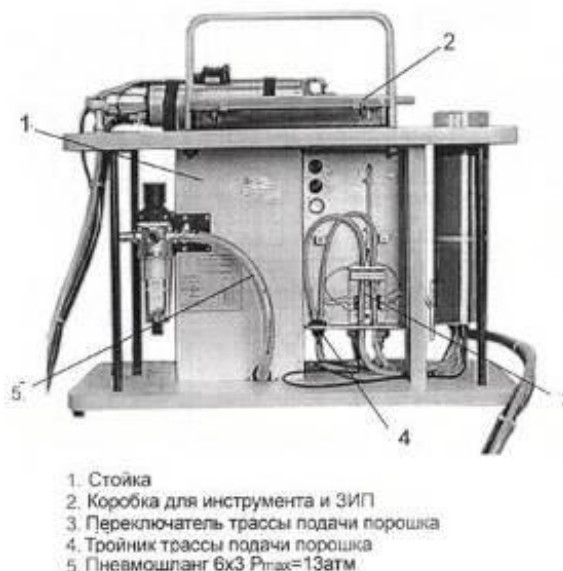


Рисунок 2.5. Внешний вид установки ДИМЕТ-403 (вид сзади)

В качестве транспортирующего газа используется атмосферный воздух прошедший через систему фильтров и осушитель.

Параметры установки «Димет-403»:

- Давление в камере – 6 ати;
- Расход воздуха – до 250 л/мин;
- Потребляемая мощность – до 3,5 кВт;
- Фракция используемых порошков – от 20 мкм до 60 мкм;
- Расход порошкового материала – до 2,5 г/с.

2.2.4. Оборудование для автоматизации процесса напыления

Поскольку в определенных случаях требуется нанесение покрытий на детали различной формы и размеров, а также для точного контроля толщины напыляемого слоя, необходимо автоматизировать процесс напыления, что в данном случае достигается использованием робота-манипулятора Kawasaki-FS003 (Рисунок 2.6).



Рисунок 2.6. Автоматизированный процесс напыления покрытия с использованием робота манипулятора Kawasaki-FS003

Максимальный размер напыляемой детали ограничивается размерами робота, в данном случае при использовании робота-манипулятора Kawasaki-FS003, величина составляет порядка 600 мм. Роботизированный процесс напыления достигается при задании устройству соответствующей программы передвижения, которая учитывает такие параметры, как скорость движения, шаг смещения по осям, а также расстояние от среза сопла. Задание соответствующей программы (на языке программирования Delphi) осуществляется при помощи пульта управления.

Автоматизация процесса напыления, при предварительной отработке режимов нанесения покрытий, позволяет создавать защитные слои с контролируемым градиентом свойств при заданной заранее толщине.

2.3. Методы исследования порошковых материалов и покрытий, полученных на их основе

2.3.1. Гранулометрический анализ

Цифровой лазерный анализатор размера частиц нового поколения, позволяющий с уникальным разрешением определять размер частиц в диапазоне от 0,1 мкм до 1000 мкм с использованием цифровых технологий для достижения высокого разрешения, точности и воспроизводимости данных (Рисунок 2.7).



Рисунок 2.7. Анализатор Malvern Zetasizer Nano-ZS + Malvern Mastersizer 2000

2.3.2. Рентгенофлуоресцентный анализ

В данной работе рентгеноспектральный анализ проводился при помощи рентгенофлуоресцентного спектрометра Niton XL3t 900 (Рисунок 2.8).



Рисунок 2.8. Рентгенофлуоресцентный спектрометр NitonXL3

Этот спектрометр позволяет проводить быстрый точный многоэлементный анализ: одновременное определение 24-х элементов (Sb, Sn, Pd, Ag, Ru, Mo, Nb, Zr, Se, Bi, Pb, Ta, Hf, Re, W, Zn, Cu, Ni, Co, Fe, Mn, Cr, V, Ti) при использовании в качестве источника возбуждения трубки с Au-анодом, а также возможно определение легких элементов (Mg, Al, Si, S, P) при использовании для анализа трубки с Ag-анодом. Производительность – точный анализ химического состава металла: от 3 с до 15 с.

2.3.3. Оптическая микроскопия

Для изучения микроструктуры исследуемых объектов наиболее оперативным и доступным методом является оптическая микроскопия.

В работе исследование микроструктуры образцов проводилось на оптическом микроскопе LeicaDM-2500 с возможностью вывода изображения на экран компьютера. Микроскоп обладает возможностью работы в светлом/темном поле, в поляризованном свете, интерференционном контрасте.

2.3.4. Электронная микроскопия

Исследования поверхности образцов проводилось с использованием сканирующего электронного микроскопа Tescan VEGA 3, оснащенного рентгеновским энергодисперсионным спектрометром X-Max, отличительными особенностями, которого являются высокие электронно-оптические свойства, немерцающее цифровое изображение отличного качества, мощное программное обеспечение для управления микроскопом и оцифровкой изображений разрешением до 8192x8192 пикселей. Уникальная конструкция электронно-оптической колонны с четырьмя линзами позволяет использовать оптическую систему в различных режимах.

Оценить характер и степень армирования или плакирования полученных композиционных наноструктурированных порошковых материалов можно полностью наблюдать их поверхность. Это позволяет осуществлять сканирующая электронная микроскопия.

2.3.5. Рентгеноспектральный микроанализ

Исследование элементного состава порошков и функциональных покрытий проводили при помощи энергодисперсионного микроанализатора Inca X-Max, встроенного в растровый электронный микроскоп Tescan Vega, в соответствии с методикой МВИ №06-206-09 (ФР.1.27.2009.06308) «Методика рентгеноспектрального микроанализа элементного состава структурных составляющих материалов» (Рисунок 2.9).



Рисунок 2.9. Растровый электронный микроскоп Tescan Vega с встроенным энергодисперсионным микроанализатором Inca X-Max

2.3.6. Анализ фазового состава

Для проведения рентгеноструктурного качественного и количественного фазового анализа порошков и функциональных покрытий использовался многофункциональный рентгеновский дифрактометр Rigaku UltimaIV, зарегистрированный в Государственном реестре средств измерений под № 44964-10. Дифрактометр снабжен комплексом управляющих программ и обрабатывающим комплексом PDXL (X-ray Powder Diffraction Software) с базой порошковых дифракционных стандартов PDF-2 от 2008 года.

Нормативная документация, использованная при испытаниях:

«Методика анализа фазового состава конструкционных наноматериалов методом рентгеновской дифрактометрии», свидетельство об аттестации №01.00225/206-03-2011 от 20.05.2011г, регистрационный код ФР.1.31.2011.10209

Лицензионная база порошковых дифракционных стандартов PDF-2 (Powder Diffraction File) от ICCD (International Centre for Diffraction Data) от 2008 года.

Лицензия №78.01.10.002.Л.000123.06.08 от 16.06.2008 года на осуществление деятельности в области использования источников ионизирующего излучения (генерирующих), выданная Федеральной службой по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека управлением Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав

потребителей и благополучия человека по городу Санкт-Петербургу (бессрочная).

Свидетельство об утверждении типа средств измерений JP.C.31.004.A № 40502 от 10.09.2010г. ГР 44964-10. Свидетельство о поверке № 242/2191-2014.

2.3.7. Методики измерения адгезии покрытия к подложке

Связь покрытия с основой (подложкой) является важнейшей характеристикой покрытия. Прочность сцепления покрытия с подложкой, прочность межслойных границ, а также собственная, когезионная прочность отдельных слоев относятся к показателям, которые определяют основные служебные характеристики изделий с покрытиями. Различие форм покрываемых деталей, условий их эксплуатации, методов получения покрытий, диапазонов их толщин и уровней прочности определяют многообразие методик определения прочностных характеристик. По виду прилагаемой нагрузки используют изгиб, сдвиг, отрыв и методы со сложным напряженным состоянием.

В работе исследования адгезионной прочности покрытий проводились штифтовым методом с использованием установки для испытаний на разрыв Instron 1000 (Рисунок 2.10). Этот метод позволяет проводить измерения в широком интервале усилий.



Рисунок 2.10. Установка для проведения испытаний на разрыв Instron 1000

При изготовлении испытуемой пары необходима тщательная подгонка штифта с оправкой, чтобы не возникало радиальных перемещений штифта, искажающих результаты измерений (Рисунок 2.11).

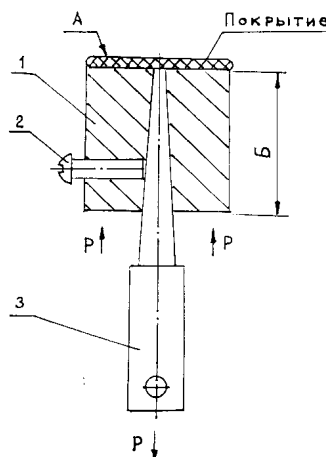


Рисунок 2.11. Эскиз образца для определения адгезионной прочности

Очень важно при напылении покрытия создать достаточно толстый слой, исключающий повреждение самого покрытия.

2.3.8. Измерение твердости покрытий

Микротвердость полученных покрытий измерялась на микротвердомерах «ПМТ-3М» (Рисунок 2.12) и «AFFRI» (Рисунок 2.13).



Рисунок 2.12. Микротвердомер ПМТ-3М



Рисунок 2.13. Микротвердомер AFFRI

Микротвердость измеряется вдавливанием алмазной пирамидки и анализом отпечатка. Выбор участка для испытания микротвердости и определение размеров отпечатка производят под микроскопом, затем по специальным таблицам пересчитывают на так называемое число твердости —

отношение нагрузки к площади поверхности отпечатка пирамидки, (Рисунок 2.14).



Рисунок 2.14. След отпечатка пирамидки

Выше перечисленные приборы для определения микротвердости обеспечивают возможность выбора участка микроструктуры, где будет произведено вдавливание; благодаря малым размерам отпечатка можно измерять микротвердость отдельных фаз или даже отдельных зерен.

Измерение микротвердости производят в соответствии с требованиями ГОСТ Р ИСО 6507-1-2007 «Металлы и сплавы. Измерения твердости по Виккерсу».

2.3.9. Измерение коэффициента трения

При проведении испытаний использовались серийная машина трения модели И 5018 производства завода «Точприбор» (Таблица 2.4).

Таблица 2.4. Основные характеристики серийной машины трения ИИ 50-18

Рабочий диапазон регистрации и записи момента трения	0,05-20 Нм
Число оборотов контртела (ролика)	15-1500 мин ⁻¹
Максимальная нормальная нагрузка на узел трения	5000 Н
Диапазон измерения и записи температур образца	0-800°C
Габаритные размеры машины	400x700x1300 мм
пульта	650x850x1700 мм
Масса машины	500 кг
пульта	300 кг

Экспериментальные исследования коэффициента трения и интенсивности изнашивания проводили в соответствии с Р 50-54-62-88 «Обеспечение

износостойкости изделий. Метод ускоренной оценки износостойкости материалов трущихся поверхностей». Принятая для этих испытаний компоновка узла трения включает закрепленный на подъемной каретке в специальном держателе образец в виде пластины прямоугольного сечения (ширина от 8 мм до 12 мм, толщина от 5 мм до 10 мм) и контртело в виде вращающегося с частотой ω металлического ролика диаметром $D=40\div 50$ мм. Схема компоновки такого узла трения представлена ниже (Рисунок 2.15).

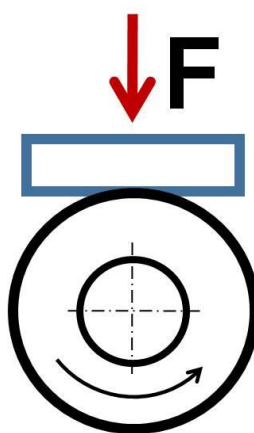


Рисунок 2.15. Схема испытания

Материал ролика, способ обработки и шероховатость его рабочей поверхности, частота вращения ролика, определяющая скорость скольжения в трибоконтакте, выбираются с учетом максимального приближения с аналогичным параметром валов, работающих в реальных узлах трения. Компоновка узла трения предусматривает возможность разборки трибоконтакта для промежуточного измерения износа образца при подъеме каретки и последующего восстановления трибоконтакта при опускании каретки.

Продолжительность отдельного испытания на каждом нагрузочном режиме для получения необходимых экспериментальных данных может не превышать 5-10 мин, а для отдельных специальных испытаний с увеличенной продолжительностью – 30 мин.

В процессе каждого испытания контролируются:

F_N – нагрузка узла трения;

ω – частота вращения ролика;

t – продолжительность работы на заданном нагрузочном режиме.

Во время испытаний на машине трения ИИ-5018 с точностью до 1% непрерывно регистрируются и записываются на персональный компьютер момент трения и нагрузка F_N . По усредненным за время испытаний t при данной нагрузке F_N значениям момента трения M_{cp} определяются:

Средний коэффициент трения:

$$f_c = \frac{M_{cp}}{0.5DF_N} \quad (1)$$

f_c – средний за испытание коэффициент трения

Глава 3. РАЗРАБОТКА ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА И ТЕХНОЛОГИИ ПОЛУЧЕНИЯ МАТРИЧНОГО И КОМПОЗИЦИОННОГО ПОРОШКОВОГО МАТЕРИАЛА

Глава посвящена выбору порошковых материалов, используемых в качестве матричной и армирующей компоненты, их исследованию и оптимизации химического состава матричного материала. Исследованы различные технологии получения матричных порошков для напыления, а именно, механическое смешение исходных порошков чистых металлов, их механическое легирование и высокоскоростное распыление сплава (металлургический метод). Описаны порошковые композиции, используемые для получения композиционных порошков, а также технологии их получения.

Для экспериментального исследования в качестве материала для получения композиционного ФГП была выбрана перспективная композиция – пластичная алюминиевая матрица и армирующая компонента с высокой твердостью Al_2O_3 , см. Главу 1. Это согласуется с правилом Шарпи, согласно которому в пластичном материале должны присутствовать твердые включения, обеспечивающие повышение прочностных характеристик.

В качестве матричного материала, для создания мягких и пластичных структурных составляющих композиционного покрытия на основе алюминия, выбрана система Al-Sn, широко используемая, как указывалось в Главе 1, и обладающая высокими антифрикционными свойствами [1].

В качестве матричного порошка системы Al-Sn был опробован для напыления порошок сплава Al-12%Sn. Установлено, что получить покрытие толщиной более 10 мкм методом ХГДН из этой композиции не представляется

возможным. Это, вероятно, связано с тем, что олово в сплаве с алюминием не образует твердых растворов и присутствует в виде самостоятельной фазы. Это обеспечивает высокие антифрикционные свойства сплавов алюминий - олово, но при этом является основным препятствием при напылении покрытий из этих сплавов.

Для устранения этого были введены пластификаторы, в виде механических смесей порошка Al-12%Sn и порошков эффективных пластификаторов, таких как порошки Al, Zn, Sn, Cu, Ni с различной концентрацией от 2,0% до 20,0%. Проверка на технологичность показала, что наилучшие результаты с точки зрения устойчивости технологического процесса и вариации толщины покрытия были достигнуты при добавлении цинка.

Результаты рентгенофазового качественного и количественного анализа показали, что при использовании цинка, в композиции (Al-12%Sn:Zn) в соотношении (10:1) и (12:1), содержание олова в покрытии составляет 6% и 9%, что соответствует снижению содержания олова на 25% и 50% соответственно (при использовании других, выше перечисленных компонентов снижение содержания олова составляло не менее 70%), что по содержанию олова соответствует известным отечественным антифрикционным сплавам АО6 и АО9. На основании этого для дальнейших исследований была определена система Al-Sn, легированная цинком. Кроме того известны и широко применяются антифрикционные сплавы на основе системы алюминий - цинк, например KS83a (5% цинка), KS630 (2% цинка), La11 (2,5% цинка), ЦАМ9-1.5 (85% цинка).

В качестве способов получения матричных порошков было исследовано три метода:

- механическое смешивание исходных порошков алюминия ПА-ВЧ (ТУ 1791-99-020-98), цинка ПЦ1 (ГОСТ 12601-76) и олова ПО1 (ТУ 48-6-123-91) состава Al-9%Sn-3%Zn;
- механическое легирование этих же порошков состава Al-9%Sn-3%Zn.

- метод высокоскоростного распыления составов: Al–3%Sn–9%Zn; Al–6%Sn–6%Zn; Al–9%Sn–3%Zn (металлургический методом) [136].

Перед напылением порошки проходили входной контроль по химическому и фракционному составу.

Фракционный состав все исходных порошков чистых металлов укладывался в диапазон от 20 мкм до 60 мкм с нормальным распределением, что соответствует требованиям к порошкам при напылении на установке «Димет-403».

3.1. Получение и исследование порошков матричного материала системы Al–Sn–Zn

3.1.1. Получение матричного материала системы Al–Sn–Zn методом смешивания исходных материалов

Этот метод является наиболее простым и менее энергозатратным. Для получения механической смеси использовались порошки чистых металлов алюминия, цинка и олова (Таблица 3.1). Смешивание происходило в смесителе типа «пьяная бочка» в течение 30 мин.

3.1.2. Получение матричного материала системы Al–Sn–Zn методом механического легирования смеси исходных материалов

Метод механического легирования, основанный на обработке предварительно перемешанных порошков смеси в чашечном истирателе, позволяет получить механически единую систему в объеме одной частицы порошка.

При этом происходит прилипание частиц порошков олова и цинка к порошку алюминия. Эффект конгломерации дисперсных частиц в истирателе наблюдается после 10 мин обработки. Химический состав полученных матричных порошков соответствует исходным составляющим (Таблица 3.1).

Таблица 3.1 Состав матричных порошков для напыления, полученных из механической смеси и после механического легирования

Сокращенное название	Состав	Способ получения
МСП9	(ПА-ВЧ)-9%(ПО1)-3%(ПЦ1)	Механическая смесь
МЛ9	(ПА-ВЧ)-9%(ПО1)-3%(ПЦ1)	Механическое легирование

Рентгенофазовый анализ полученных таким образом частиц порошка показал, что эти частицы представляют собой матричный алюминий – основная линия в рентгеновском спектре, на поверхности которых присутствуют олово и цинк. Количество обнаруженных олова и цинка эквивалентно их содержанию в диапазоне: олова – (6,4÷19,6)% вес, цинка – (3,1÷11,1)% вес. Такой разброс в содержании олова и цинка, по-видимому, связан с тем, что в процессе обработки не происходит образования равномерных механических систем в объеме отдельно взятых частицы порошка. Очевидно, что на поверхности частиц происходит налипание и перемешивание олова и цинка с алюминием с образованием переходного слоя. Рентгеноструктурный фазовый анализ свидетельствует о том, что химического взаимодействия между элементами при этом не происходит и новых химических соединений не образуется.

Основным достоинством данного метода является относительная простота и оперативность получения порошков заданного состава. Существенным недостатком является неравномерность химического состава порошка по сечению частицы, что может отрицательно сказаться на получении гомогенного химического состава покрытия.

3.1.3. Получение матричного материала методом эжекторного распыления из сплава системы Al–Sn–Zn

В связи с тем, что простым смешиванием и механолегированием получение равномерного состава порошка с образованием конгломератов добиться не представляется возможным, то была выбрана технология получения матричных порошков методом высокоскоростного эжекторного распыления из

сплава заданного химического состава потоком газа и охлаждения его в газообразной среде со скоростью до $10^3 \div 10^4 \text{ K}^{-1}$ при свободном полете диспергированных частиц.

Метод быстрой закалки дает следующие преимущества при получении износостойких материалов:

- сохранение прецизионного состава исходного шихтового материала в получаемом дисперсном порошке;
- получение гомогенной, микрокристаллической структуры порошка;
- возможность достижения метастабильной структуры порошка с последующей реализацией в процессе напыления нанокристаллических выделений, способствующих повышению адгезионной и когезионной прочности покрытия.

Хорошим дополнением к реализации этих преимуществ является использование для нанесения покрытий метода ХГДН, при котором дисперсные частицы не испытывают существенного термического воздействия [77] в процессе напыления и деградации исходной структуры порошка не происходит.

Опыт работы ЦНИИ КМ «Прометей» показывает, что быстрозакаленные алюминиевые сплавы с микрокристаллической структурой, превосходят по износостойкости известные кристаллические аналоги. Это хорошо согласуется с теоретическими предпосылками, согласно которым размер зерен (элементов) оказывает существенное влияние на физико-механические свойства, в т.ч. на микротвердость.

Следовательно, и теоретические и экспериментальные предпосылки указывают на целесообразность использования для узлов трения быстрозакаленных микрокристаллических сплавов, используемых в настоящей работе.

Для исследования матричных порошков на основе алюминия методом высокоскоростного эжекторного распыления на Волгоградском алюминиевом заводе по разработанным нами требованиям были изготовлены следующие

составы порошковые материалы: Al-9%Sn-3%Zn (C9), Al-6%Sn-6%Zn (C6), Al-3%Sn-9%Zn (C3) (Таблица 3.2) [136].

Таблица 3.2. Результаты химического анализа порошков, полученных методом распыления из расплава

	Al, % вес	Sn, % вес	Zn, % вес	Примеси
C9	86,0	9,5	4,0	остальное
C6	86,0	7,9	5,8	остальное
C3	87,0	3,5	9,2	остальное

Результаты гранулометрического анализа (Рисунок 3.1 - Рисунок 3.3) показали: содержание требуемой фракции от 20 мкм до 60 мкм составляет не менее 50%.

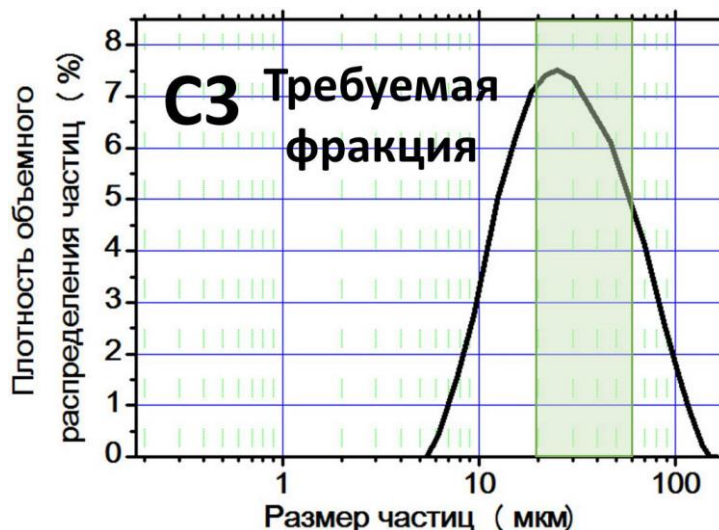


Рисунок 3.1. Фракционный состав матричного порошка с содержанием олова 3%

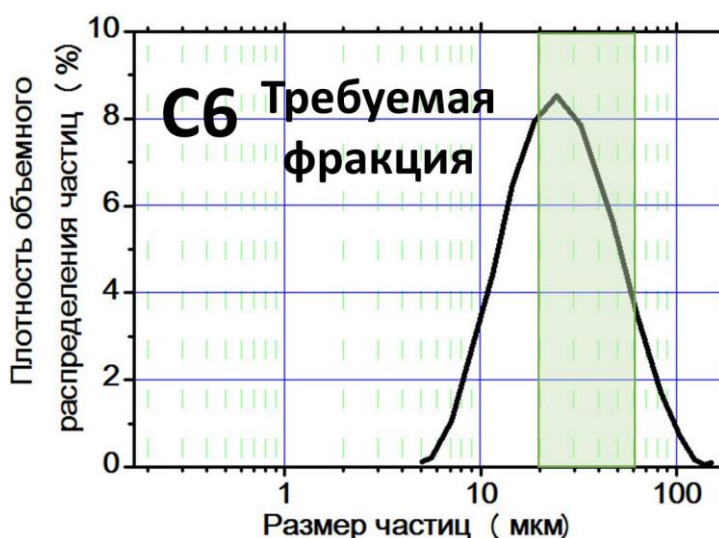


Рисунок 3.2. Фракционный состав матричного порошка с содержанием олова 6%

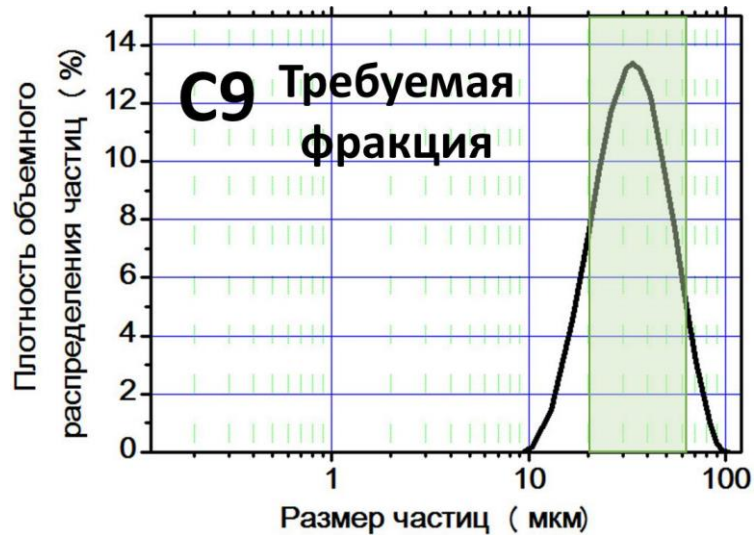


Рисунок 3.3. Фракционный состав матричного порошка с содержанием олова 9%

Из представленных зависимостей видно, что в состоянии поставки порошки с большим содержанием олова имеют меньший разброс по фракционному составу. Это обстоятельство указывает на то, такие порошки для напыления методом ХГДН представляются наиболее подходящими.

Качественный рентгенофазовый анализ порошков (Рисунок 3.4) показал наличие в них твердого раствора Al и Zn, а также самостоятельные фазы β -Sn, в качестве примера представлены результаты для порошка C9 (Рисунок 3.5).

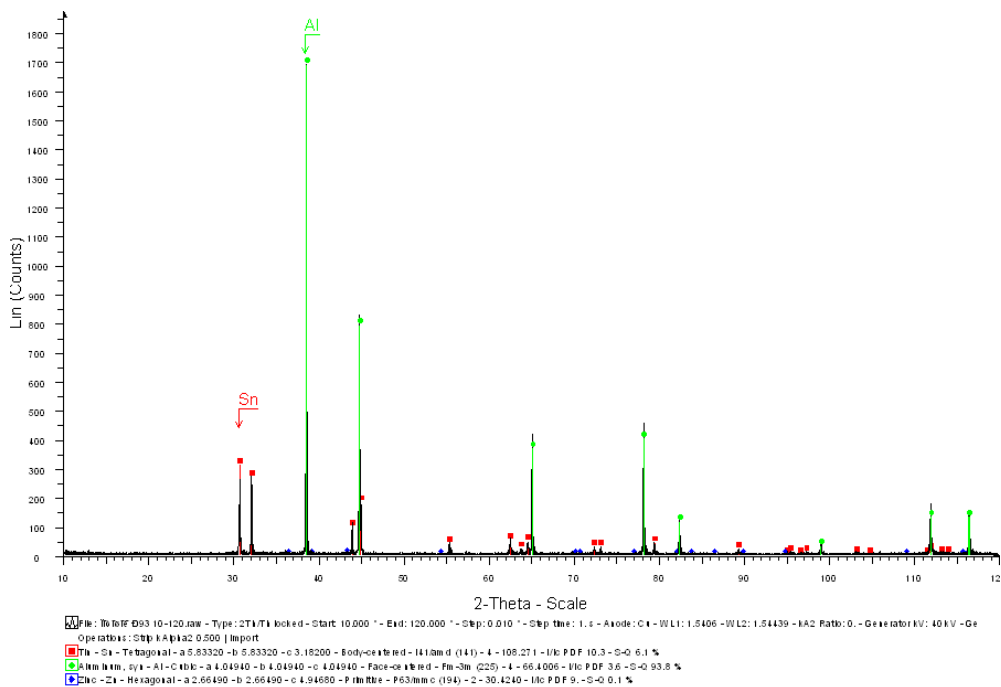


Рисунок 3.4. Результаты качественного рентгенофазового анализа порошка C9

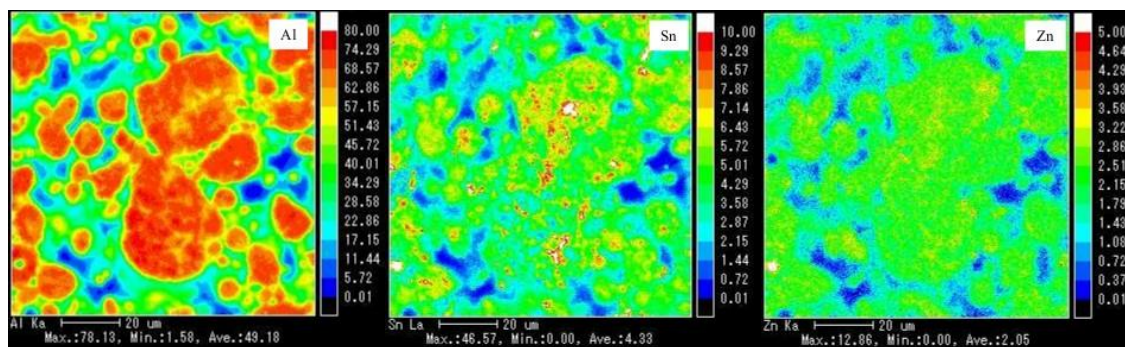


Рисунок 3.5. Результаты рентгеноспектрального микроанализа порошка С9

Частица порошка С9 имеет округлую форму, структура представляет зерна твердого раствора Al и Zn диаметром около 5 мкм с четкой границей β -Sn (Рисунок 3.6).

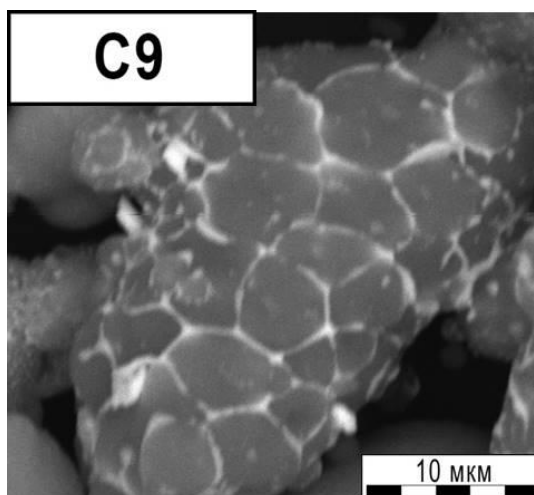


Рисунок 3.6. Порошок С9, внешний вид

Использование таких порошков дает основание для получения покрытий с гомогенной по толщине покрытия структурой.

Была исследована микротвердость матричных порошков С6 и С9. Для этого были сделаны шлифы сечения порошка (Рисунок 3.7). Исследования проводили при нагрузке 0,1 г.

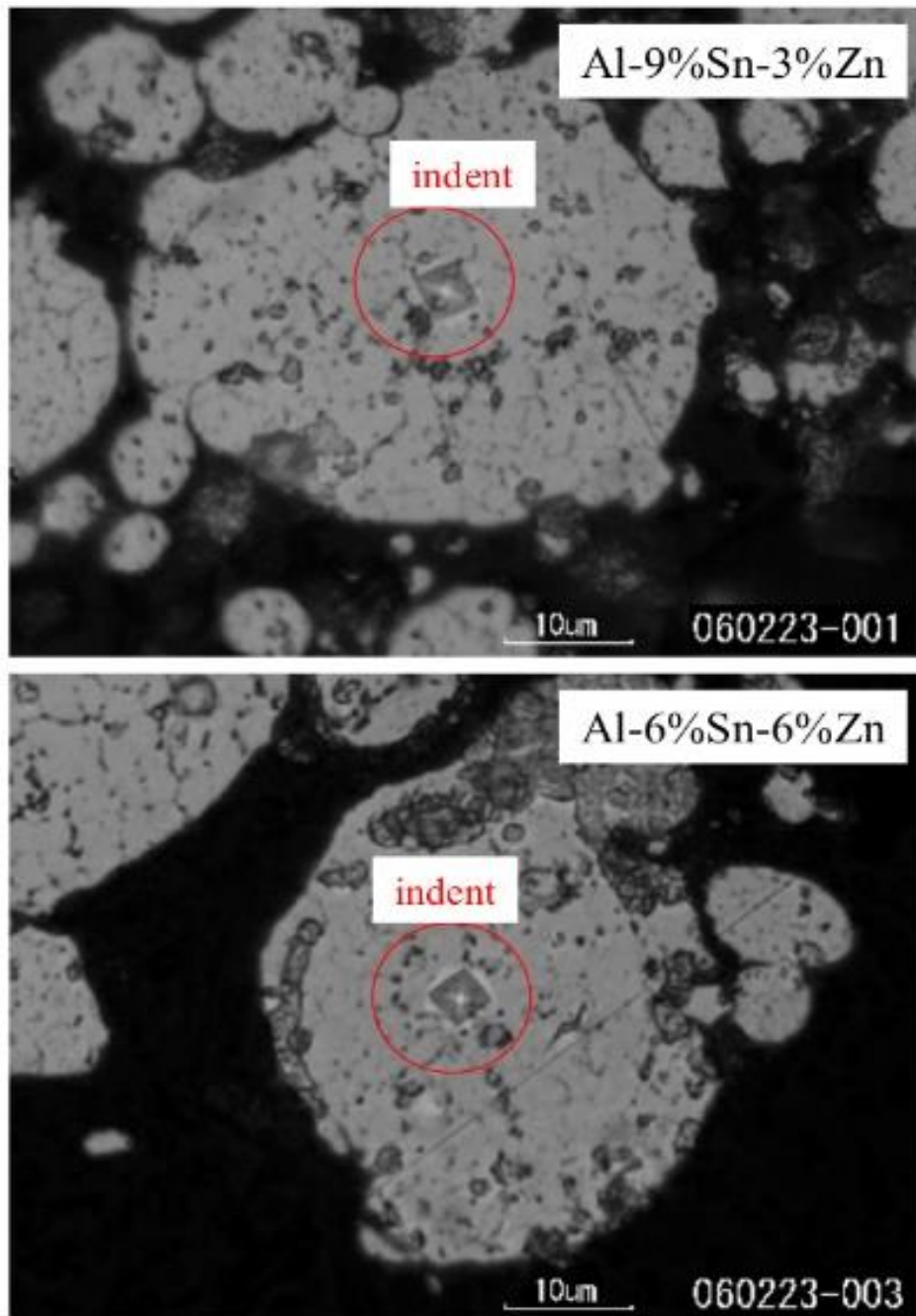


Рисунок 3.7. Исследуемая область определения микротвердости порошков С6 и С9

Результаты исследования матричных порошков показали, что микротвердость порошка С3 составила 73 HV, С6 – 69 HV, С9 – 62 HV. Установлено, что при увеличении содержания олова снижается микротвердость пластичного матричного порошка на 8–10%. Результаты исследования микротвердости дают основание предположить, что в результате напыления указанных порошков микротвердость покрытий не превысит полученные значения.

3.2. Получение и исследование порошковых композиций на основе пластичного матричного материала системы Al-Sn-Zn и армирующей компоненты Al_2O_3

При получении армированного порошка были использованы три технологии: ударно-дезинтеграторная обработка УДА, обработка в планетарной мельнице и обработка чашечном истирателе. В качестве матричного порошкового материала для получения композиционных порошков выбран порошок С9, состава Al-9%Sn-3%Zn. Порошок данного состава обладает меньшей микротвердостью, что позволяет предположить его более высокую эффективность при получении композиционных армированных порошков для дальнейшего напыления методом ХГДН. Таким образом, это позволит установить общий характер процессов армирования порошков.

3.2.1. Исследование гранулометрического состава порошка армирующей компоненты

Перед использованием порошка корунда в качестве армирующей компоненты был исследован его гранулометрический состав (Рисунок 3.8).

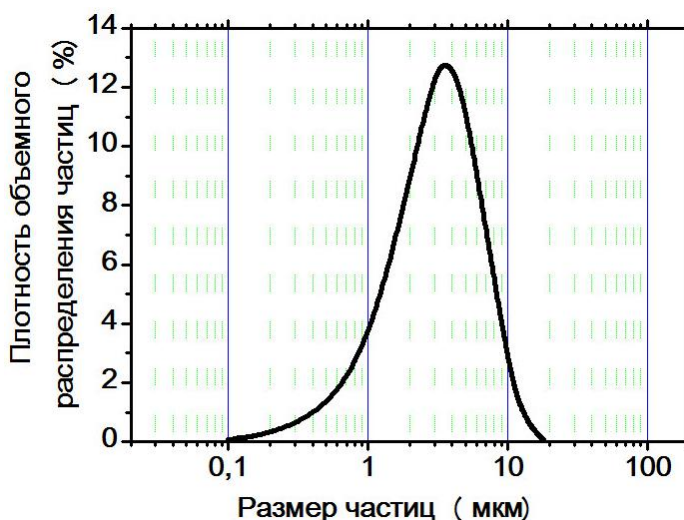


Рисунок 3.8. Фракционный состав армирующей компоненты Al_2O_3

Результаты показывают, что в порошке присутствует основная фракция дисперсностью около 3–4 мкм, что примерно в 10 раз меньше матричного порошка.

3.2.2. Получение механической смеси порошков системы Al-Sn-Zn и Al₂O₃

Для получения покрытия армированного частицами Al₂O₃ были подготовлены механические смеси порошков Al-9%Sn-3%Zn и Al₂O₃ (Таблица 3.3).

Таблица 3.3 Порошки механической смеси матричного материала и армирующей компоненты

Сокращенное название	Состав	Способ получения
MC5	Al-9%Sn-3%Zn+5%Al ₂ O ₃	Механическая смесь матричного порошка сплава и армирующей компоненты Al ₂ O ₃
MC10	Al-9%Sn-3%Zn+10%Al ₂ O ₃	
MC20	Al-9%Sn-3%Zn+20%Al ₂ O ₃	
MC30	Al-9%Sn-3%Zn+30%Al ₂ O ₃	
MC40	Al-9%Sn-3%Zn+40%Al ₂ O ₃	
MC70	Al-9%Sn-3%Zn+70%Al ₂ O ₃	

Смешивание происходило в смесителе типа «пьяная бочка» в течение 30 мин [137 - 139].

3.2.3. Получение композиционных порошков с использованием технологии дезинтеграторной обработки и их исследование

С помощью УДА обработки на установки ДЕЗИ-15 было произведено армирование порошка С9 частицами корунда (Al₂O₃). Армирование порошков проводилось для двух порошков: MC30 (состава Al-9Sn-3Zn+30%Al₂O₃), MC70 (Al-9Sn-3Zn+70%Al₂O₃), при различных скоростях вращения роторов от 6000 об/мин до 15000 об/мин и количества проходов (циклов обработки) от 1, 2, 3 соответственно.

Исследование фракционного состава полученных композиционных порошков, показало наличие двух фракций, предположительно корунда и композиционного порошка. Очевидно, что не произошло полного армирования частиц матричного материала, чему свидетельствует график (Рисунок 3.9).

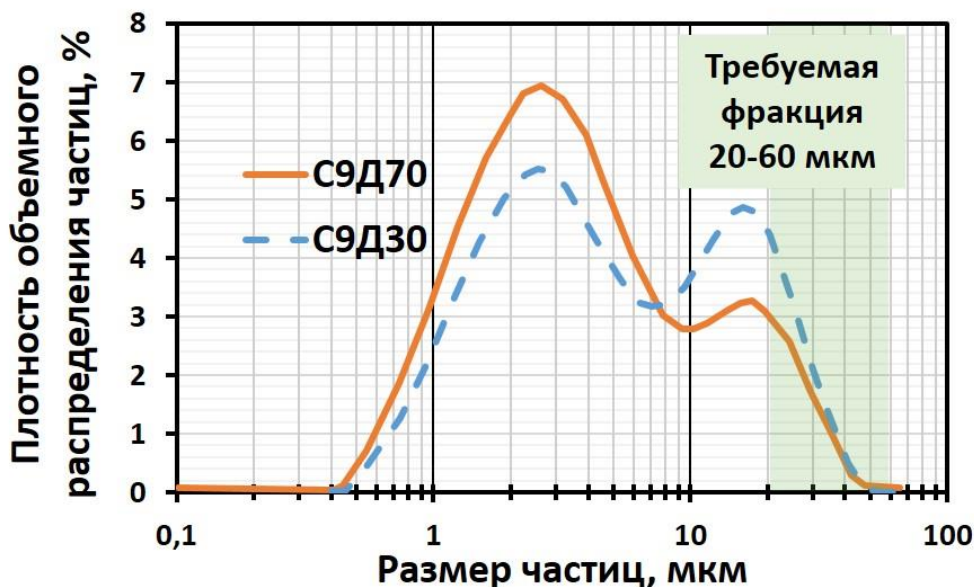


Рисунок 3.9. Распределение granulометрического состава порошков С9Д30 и С9Д70 после УДА обработки

В результате УДА обработки произошло измельчение армирующей компоненты (пик сдвинулся до 2–3 мкм). Фракция композиционного порошка после обработки стала меньше фракции матричного порошка практически в два раза с пиком около 15 мкм.

Установлено, что применение технологии УДА не обеспечивает полного армирования порошков. Вероятно, причиной этому служит малое время пребывания частиц порошка в зоне обработки.

3.2.4. Получение композиционных порошков с использованием технологии обработки в планетарной мельнице и их исследование

Армирование порошка С9 частицами корунда (Al_2O_3) в планетарной мельнице проводили в течение 30 минут с частотой 35,2 Гц. Армирование порошков проводилось для двух составов порошков: МС30 ($Al-9\%Sn-3\%Zn+30\%Al_2O_3$), МС70 ($Al-9\%Sn-3\%Zn+70\%Al_2O_3$) [139 - 141].

Исследование фракционного состава полученных композиционных порошков, показало наличие двух фракций, предположительно корунда и алюминия, т.е. не произошло полного армирования (Рисунок 3.10).

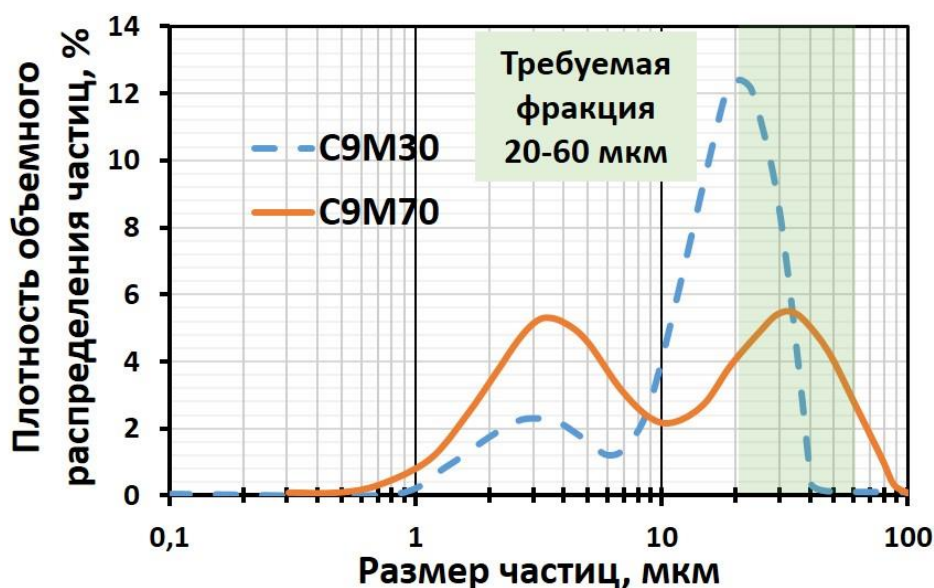


Рисунок 3.10. Распределение гранулометрического состава порошка С9М30 и С9М70 после МПП обработки

В отличие от УДА обработки, в планетарной мельнице время обработки значительно выше, но отсутствуют высокоэнергетические ударные нагрузки. В связи с этим измельчения армирующей компоненты практически не произошло, однако, высота пиков указывает на то, что значительная доля порошка армирующей компоненты образовала единую систему с порошком матрицы. С увеличением содержания корунда наблюдается сдвиг пика фракционного состава в область большей фракции и увеличение разброса фракционного состава.

3.2.5. Получение композиционных порошков с использованием технологии обработки в чашечном истирателе и их исследование

Обработка порошка С9 частицами корунда Al_2O_3 проводилась для двух составов порошков МС30 ($Al-9\%Sn-3\%Zn+30\%Al_2O_3$), МС70 ($Al-9\%Sn-3\%Zn+70\%Al_2O_3$) при времени обработки не более 1 часа [139, 142]. Сравнительный анализ полученных порошков показал, что после 30 мин обработки свойства композиционных порошков не изменяются.

Исследования гранулометрического состава порошков, обработанных в чашечном истирателе, показали наличие трех фракций, корунда, композиционного порошка и «спёков», третья основная фракция на графиках, пик более 100 мкм (Рисунок 3.11).

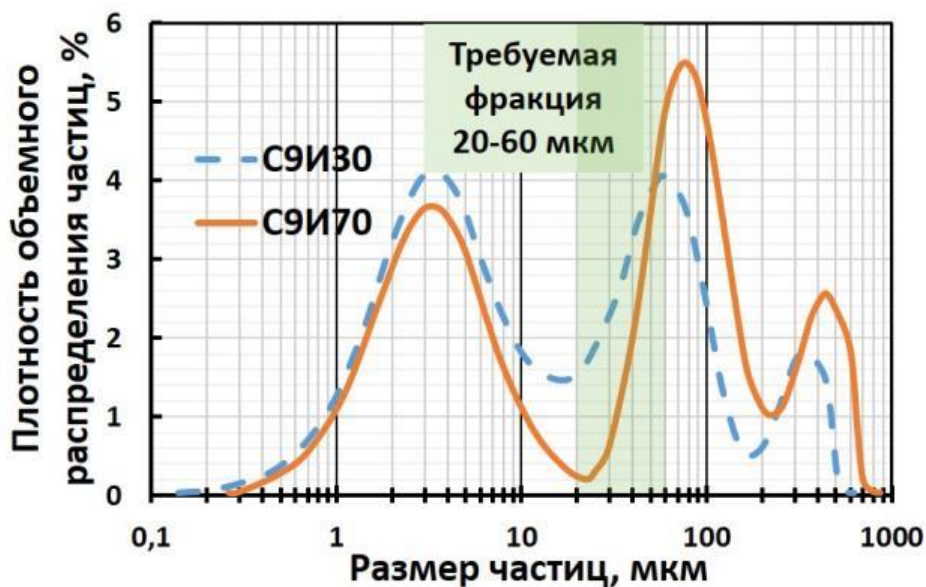


Рисунок 3.11. Распределение гранулометрического состава порошка С9И30 и С9И70 после обработки в ИВЧ-3

Таким образом, в процессе обработки в чашечном истирателе полного механического легирования не наблюдается.

При обработке в чашечном истирателе, как и в планетарной мельнице, не произошло измельчения корунда. Пик, соответствующий композиционному порошку, сдвинулся в направлении увеличения размера фракции, от 60 мкм при 30% корунда до 70-80 мкм при 70%.

Для наглядного представления композиционного порошка С9И30 и С9И70 были получены снимки на микроскопе (Рисунок 3.12).

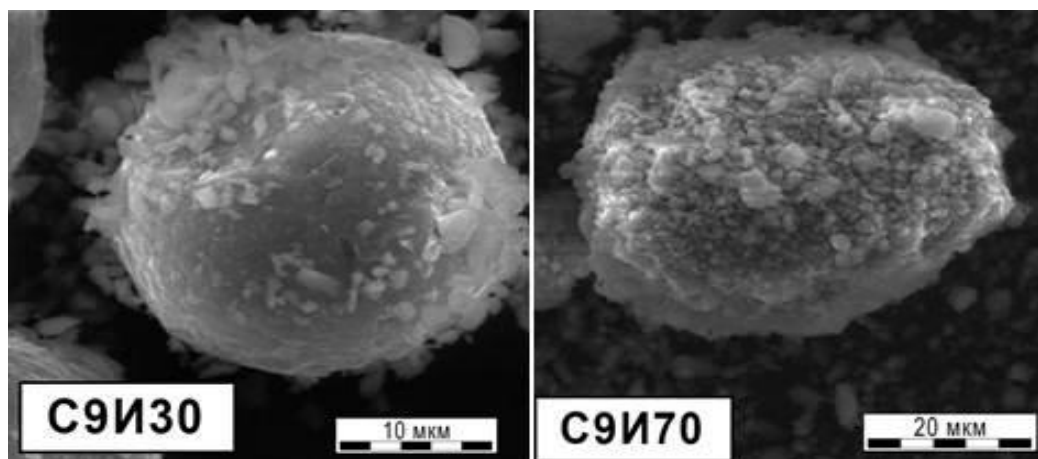


Рисунок 3.12. Внешний вид частицы порошка С9И70

Композиционный порошок представляет собой сферическую частицу фракции порядка 50 мкм, поверхность которой армирована частицами корунда фракции от 0,5 мкм до 4,0 мкм, а также свободные частицы корунда.

Таким образом, исследование композиционных порошков показало, что из всех опробованных методов наиболее эффективным методом является метод обработки в чашечном истирателе.

Химический состав и технология получения разработанных композиционных порошков представлены ниже (Таблица 3.4).

Таблица 3.4 Химический состав, полученных композиционных порошков

Сокращенное название	Состав	Способ получения
С9Д30	Al-9%Sn-3%Zn+30%Al ₂ O ₃	Обработка в дезинтеграторе
С9Д70	Al-9%Sn-3%Zn+70%Al ₂ O ₃	
С9М30*	Al-9%Sn-3%Zn+30%Al ₂ O ₃	Обработка в планетарной мельнице
С9М70*	Al-9%Sn-3%Zn+70%Al ₂ O ₃	
С9И30	Al-9%Sn-3%Zn+30%Al ₂ O ₃	Обработка в чашечном истирателе
С9И70	Al-9%Sn-3%Zn+70%Al ₂ O ₃	

* Получен патент № 2434713С2 «Способ получения композитного порошка системы Al-Zn-Sn-Al₂O₃».

Выводы по Главе 3

Таким образом, в результате комплексных исследований полученных и описанных в Главе 3 порошковых материалов было установлено, что для

использования в качестве пластичного матричного материала порошка системы Al-Sn при напылении методом ХГДН необходимо производить его легирование цинком, а в качестве метода получения такого порошка целесообразно использовать высокоскоростное эжекторное распыление из сплава заданного химического состава. Структура частиц такого порошка представляет собой зерна, состоящие из твердого раствора Al-Zn, а по границам зерен распределено β -Sn. Увеличение содержания олова в составе порошка приводит к снижению микротвердости частиц. На примере порошка Al-9%Sn-3%Zn С9 были исследованы закономерности образования композиционных порошков.

Наименьшая степень армирования наблюдается в композиционных порошках, полученных в дезинтеграторе, что связано с наименьшим временем обработки, кроме того в этих порошках наблюдается измельчение как армирующей компоненты, так и матричной. Наибольшая степень армирования наблюдается в порошках, полученных после обработки в чашечном истирателе. Таким образом, исследование полученных композиционных порошков показало, что использование чашечного истирателя для создания армированных порошков является наиболее эффективным.

Дальнейшие эксперименты направлены на оптимизацию режимов напыления этих порошковых материалов, начиная с исследования температурно-скоростных параметров процесса ХГДН.

Полученные результаты были использованы при разработке технологических инструкций и руководящих документов [140, 143, 144].

Глава 4. ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРНО-СКОРОСТНЫХ ПАРАМЕТРОВ ГЕТЕРОФАЗНОГО ПОТОКА ПРОЦЕССА НАПЫЛЕНИЯ ПОКРЫТИЙ МЕТОДОМ ХГДН

Определение температурно-скоростных параметров гетерофазного потока при получении покрытий методом ХГДН является важнейшей задачей. Известно множество работ, посвященных этому вопросу, однако практически все работы отражают теоретические стороны и попытки создать более или менее действующую модель [61, 65, 66]. Кроме того, не содержат информации о параметрах потока применительно к известным во всем мире и широко используемым установкам для нанесения покрытий типа «Димет».

Для установления общих представлений о температуре порошковых материалов в высокоскоростном гетерофазном потоке были проведены соответствующие измерения для порошков различной плотности, а именно, алюминиевого порошка и порошка железа, что и будет рассмотрено в данной главе.

4.1. Создание экспериментального стенда для исследования температурно-скоростных параметров

Работы по созданию экспериментального стенда проводились совместно с группой специалистов Санкт-Петербургского университета, возглавляемой профессором И. Ч. Машеком.

Общая схема стенда по исследованию параметров потоков в установке ХГДН представлена ниже (Рисунок 4.1). Накопительные баллоны 1–3, с общим объемом 120 л накачиваются воздухом от компрессора 4 до давления 22 ата.

Воздух, поступающий в баллоны от компрессора проходит через блок очистки 5 (маслоуловитель – медная стружка, волоконный фильтр, осушитель – силикагель, и снова волоконный фильтр). Регулировка давления в камере 8 производится вручную вентилем 7. Воздух при требуемом давлении подается в регулятор расхода 10 блока питания и управления аппарата ХГДН (при работе на стенде открыт постоянно) и затем в напылительную головку 12. Время поддержания расхода газа 3 г/с при давлении в форкамере 6 ати. – 200 с.

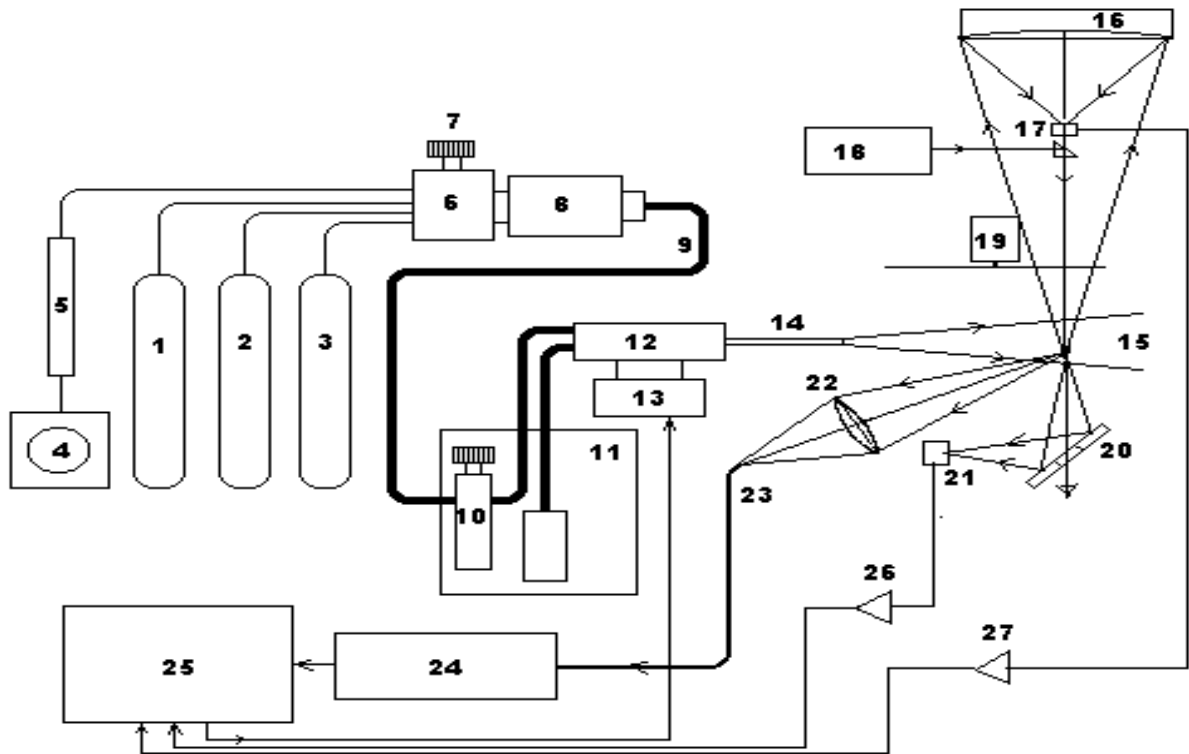


Рисунок 4.1. Общая схема измерительного стенда

Напылительная головка 12 расположена на координатном столе 13, положение которого управляется системой регистрации 25. Диапазон перемещений стола – 40 мм по вертикали, 40 мм по горизонтали. Струя, выходящая из сопла 14 в требуемом сечении, анализируется лазерным доплеровским измерителем скорости (ЛДИС) (18, 19, 22, 23, 24), инфракрасным радиометром (16, 17, 19, 27) и измерителем концентрации (20, 21, 26).

Общий вид измерительного поля разработанного стенда представлен ниже (Рисунок 4.2).

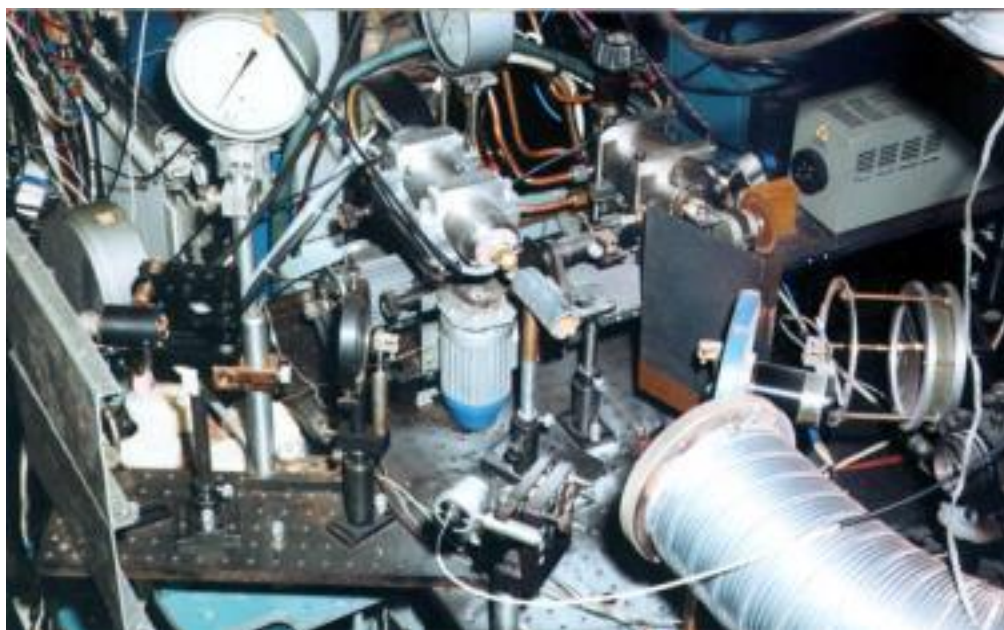


Рисунок 4.2. Общий вид измерительного поля экспериментальной установки

ЛДИС состоит из лазера 18, модулятора 19, системы сбора рассеянного излучения 22, волоконного световода 23 и блока интерферометра 24. Одночастотный, стабилизированный по частоте и интенсивности лазер типа ЛГН302 с выходной мощностью 0,8 мВт освещает исследуемую точку потока, рассеянное излучение из которой собирается системой сбора 22 под некоторым углом рассеяния. Анализ рассеянного света производится сканирующим интерферометром 24, имеющим свободный спектральный интервал 725 МГц, и ширину аппаратной функции (АФ) 18 МГц. При наихудшем сочетании заданных в данной работе концентраций и дисперсном составе твердой фазы потока и при времени измерения 1 с, предварительное расчетное соотношение сигнал/шум на выходе анализатора спектра приблизительно равно 15-20 дБ. При таком соотношении сигнал/шум, применяемые в разработанном измерителе скорости методы корреляционной обработки сигналов позволяют измерять средние сдвиги рассеянного контура излучения на уровне 0,05–0,06 от ширины АФ.

Инфракрасный радиометр, измеряющий температуру частиц в потоке, состоит из сферического зеркала 16, формирующего поле зрения приемника 17 в исследуемом потоке 15. Приемник – пироэлектрический, типа МГ30, с полосой 2-20 мкм, работающий на частоте модуляции 250 Гц, обеспечиваемой модулятором 19. Сигнал от приемника 17 через усилитель 27 поступает на схему

синхронного детектирования в системе регистрации 25. Для исключения зависимости показаний радиометра от величин концентрации частиц в области наблюдения, их излучательной способности и параметров дисперсности, выходной сигнал инфракрасного приемника 17 нормируется на величину концентрации частиц в потоке, определяемую измерителем концентрации, работающем в режиме регистрации мало углового рассеяния.

Измеритель концентрации состоит из гелий-неонового лазера 18, (используемого также для измерений скорости, о чем см. ниже) излучение которого проходит через исследуемую область потока, совпадающую с областью, наблюдаемой ИК радиометром. Рассеянное вперед излучение собирается кольцевым зеркалом 20 и попадает на приемник 21, выходной сигнал которого после усиления усилителем 26 поступает на схему синхронного детектирования в системе регистрации 25. Отношение сигналов ИК радиометра и датчика концентрации, формируемое в блоке 25 для дисперсного материала определенного вида не зависит от его концентрации в области наблюдения (при некоторых условиях, вполне выполняющихся для исследуемых потоков), и определяется только температурой частиц.

Для успешного проведения температурных измерений частиц в гетерофазных потоках, необходима калибровка ИК радиометра. Такая калибровка производится с помощью организации в зоне наблюдения радиометра образцовой дисперсной взвеси, с известной концентрацией, излучательной способностью и дисперсным составом. Калибрующим объектом, в данном случае является ЭДМ (Рисунок 4.3 и Рисунок 4.4). Модуль состоит из двух электродов 26 и 27, расстояние между которыми и диаметр которых известны. При подаче высокого напряжения от источника 28, дисперсный материал, помещенный между электродами модуля приходит в автоколебательное движение, образуя дисперсную систему (взвесь) из частиц, скорости которых направлены преимущественно перпендикулярно направлению наблюдения внешней оптической системы. При определенных условиях дисперсная среда занимает весь объем ЭДМ, и по известной массе использованного материала,

определенной предварительно функции распределения по размерам, концентрация образовавшейся дисперсной взвеси может быть рассчитана.

Нагрев дисперсной взвеси осуществляется нагревателями 29 и 30, питание которых осуществляется от источника 31, причем нагреватель электрода 26 имеет потенциальную развязку 32. Измерение температуры дисперсных частиц производится контактным методом (термопара 33). Сигнал датчика температуры после усиления в блоке 34 поступает в систему регистрации. Выравнивание температурных режимов верхнего и нижнего электродов ЭДМ производится при отсутствии высокого напряжения между электродами ЭДМ. При этом одинаковыми термопарами производится контроль как температуры верхнего, так и нижнего электродов. Коэффициент передачи мощности по каналу потенциальной развязки выбирается при этом таким, чтобы при любой мощности подаваемой на нагреватели калибровочного модуля температуры электродов были одинаковыми. Средняя точность обеспечения равенства температур электродов в проведенных экспериментах была около 2 К.

Расчетные значения чувствительности разработанного радиометра к изменению температуры частиц в потоке от 5 К до 10 К при средней температуре частиц 323 К.

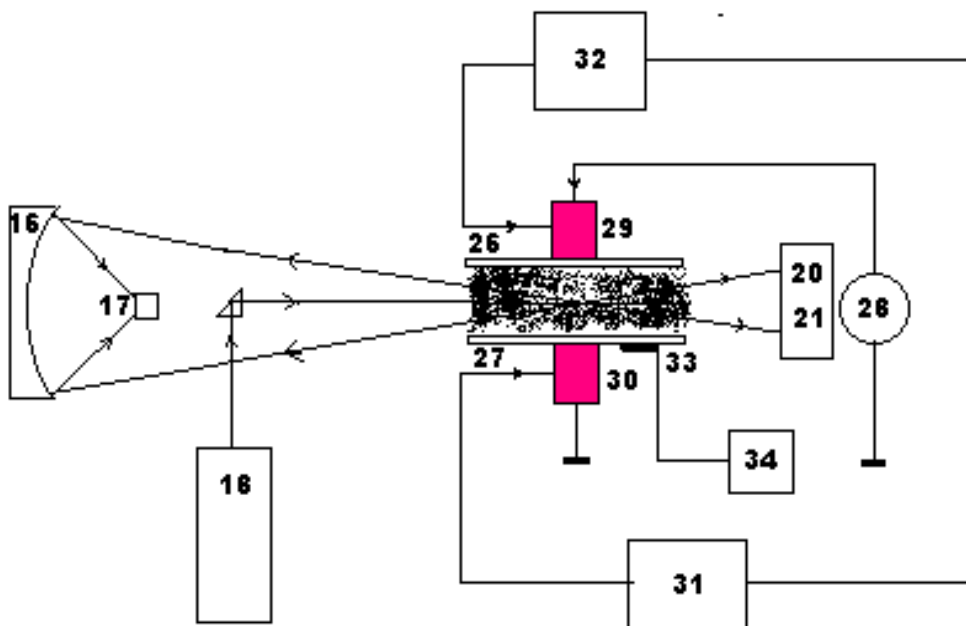


Рисунок 4.3. Схема проведения калибровки радиометра с помощью ЭДМ

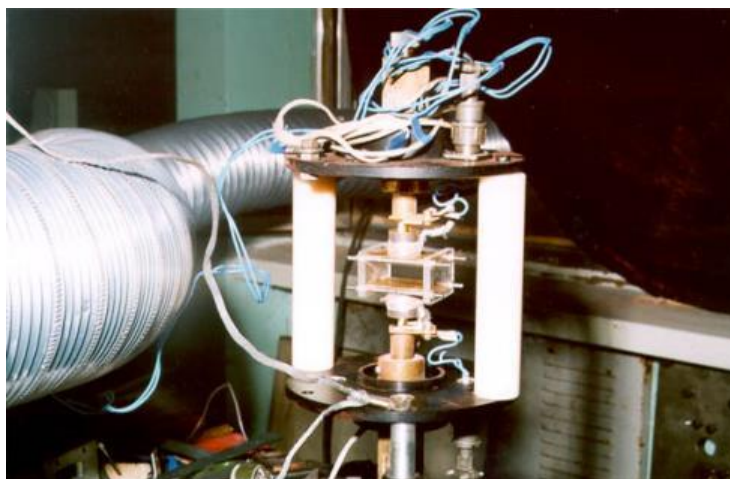


Рисунок 4.4. Общий вид калибровочного электродинамического модуля

Пневматический способ определения скорости потока основан на применении уравнения Бернулли. Обычно в поток вводится насадок, состоящий из двух трубок. Открытое сечение одной из трубок размещается в носовой части насадка (навстречу потоку), а отверстия второй трубки расположены на боковой поверхности насадка (вдоль потока); при дозвуковой скорости замедление струи газа от встречи с насадком происходит без каких-либо потерь, так как трение и вихреобразование возникают уже на боковой поверхности насадка, т. е. после того, как струя минует область своего полного торможения, размещающуюся перед самым носиком насадка. По этой причине в первой трубке создается давление, почти в точности равное полному давлению набегающего потока; во второй трубке, если ее входные отверстия достаточно удалены от носика, устанавливается давление, близкое к статическому давлению потока. Для дозвукового потока:

$$\frac{P}{P_0} = \left(1 - \frac{k-1}{k+1} \cdot \lambda^2 \right)^{\frac{k}{k-1}} \quad (2)$$

где P – статическое давление;

P_0 – полное давление в потоке;

k – отношение теплоемкостей (показатель адиабаты);

λ – коэффициент скорости.

Коэффициент скорости – отношение скорости потока к критической скорости звука

$$\lambda = \frac{v}{a_{кр}} \quad (3)$$

Режим течения, когда скорость потока равна скорости звука, называется критическим. Скорость звука для критического режима определяется как

$$a_{кр} = \sqrt{\frac{2k}{k+1} g \cdot R \cdot T_0} \quad (4)$$

где T_0 – температура торможения;

g – ускорение свободного падения;

R – газовая постоянная.

При торможении сверхзвукового потока перед насадком возникает ударная волна, пересекая которую газовые струи претерпевают значительные гидравлические потери. Поэтому давление в трубке полного напора пневматического насадка при сверхзвуковом течении существенно отличается от полного давления набегающего потока. Для того чтобы пользоваться пневматическим насадком при сверхзвуковом течении, необходимо учесть волновое сопротивление. В этом случае используют формулу:

$$\frac{P}{P_{01}} = \left(\frac{1}{\lambda^2} - \frac{k-1}{k+1} \right) \left(1 - \frac{k-1}{k+1} \cdot \frac{1}{\lambda^2} \right)^{\frac{1}{k-1}} \quad (5)$$

где P_{01} – давление, измеренное приемником полного напора.

После проведения измерений полей статического давления и давления полного напора с помощью приведенных выражений можно отыскать параметры λ , соответствующие точкам потока, в которых были проведены измерения. Знание массива параметра λ и измеренные поля значений температуры торможения в потоке позволяют рассчитать также величину статической температуры.

4.2. Экспериментальное определение скорости и температуры потока

Измерение температуры торможения рабочего газа производили термоэлектрическими зондами с камерой торможения, обеспечивающей

коэффициент восстановления скорости газа, зависящий от критериев Маха (M), Рейнольдса (Re) и Кнудсена (Kn). Зонды перемещались вдоль оси потока, температура торможения газового потока и скорость газового потока снижаются с увеличением расстояния от среза сопла (Рисунок 4.5 и Рисунок 4.6) [77].

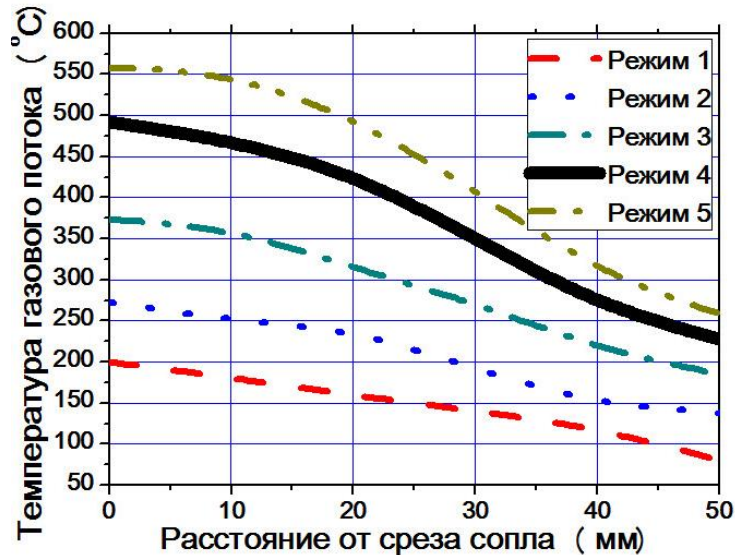


Рисунок 4.5. Зависимость температуры торможения газового потока от расстояния до среза сопла при различных режимах (1-5) работы установки «Димет-403»

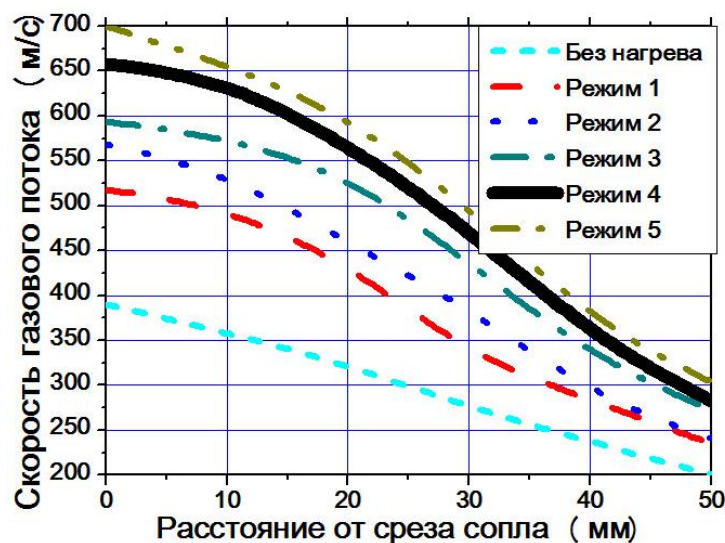


Рисунок 4.6. Зависимость скорости газового потока от расстояния до среза сопла при различных режимах (1-5) работы установки «Димет-403»

Для получения покрытий представляется возможным регулировать значения температуры газового потока от 80°C до 560°C и скорости газового потока от 180 м/с до 700 м/с (Рисунок 4.5, Рисунок 4.6). При этом с увеличением расстояния от среза сопла наблюдается снижение, как температуры, так и скорости потока.

4.3. Определение температуры частиц в гетерофазном потоке

Поля наблюдения радиометра исследовались с помощью перемещения в его области измерения точечного источника тепла (микролампа с размером нити 1x1 мм). Зона наблюдения радиометра представляет эллипсоид вращения с осями 2,5 и 4,0 мм.

Область наблюдения измерителя концентрации потока определялась перемещением в поле его зрения плоского рассеивателя, перпендикулярного оси лазерного луча. Диаметр области наблюдения определялся диаметром луча, и равнялся 2,5 мм.

4.3.1. Температурные измерения при использовании порошка железа ПЖР-1

Рисунок 4.7 показывает результаты построения калибровочной кривой радиометра, проведенные по вышеописанной методике для порошка ПЖР-1. Калибровочная кривая хорошо описывается полиномом второй степени в диапазоне температур от 20°C до 180°C. По оси ординат приведены нормированные показания радиометра, относительно концентрации частиц в потоке.

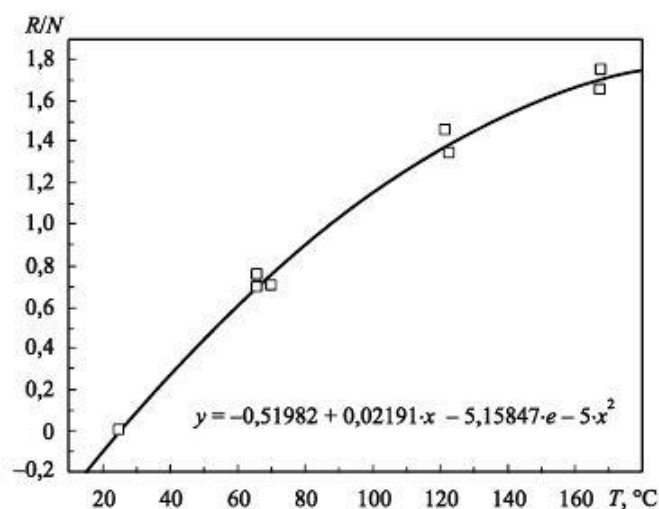


Рисунок 4.7. Калибровка радиометра для двухфазных потоков с порошком ПЖР-1

Рисунок 4.8 отражает характерную картину результатов измерения температуры частиц стального порошка в потоке установки «Димет-403». На рисунке первая картина показывает сигналы радиометра и измерителя концентрации, а также температуру конца сопла (умноженную на 10). Следующие графики показывают величину отношения сигналов радиометра R и измерителя концентрации N для тех моментов, когда в потоке присутствует твердая фаза. Средняя величина отношения определяет среднюю температуру частиц в потоке, разброс мгновенных значений – может быть связан как с флуктуациями средней температуры в пределах измерительного объема радиометра, так и с проявлениями неравномерности в распределении концентрации в пределах измерительных объемов радиометра и измерителя концентрации (области наблюдения существенно неидентичные).

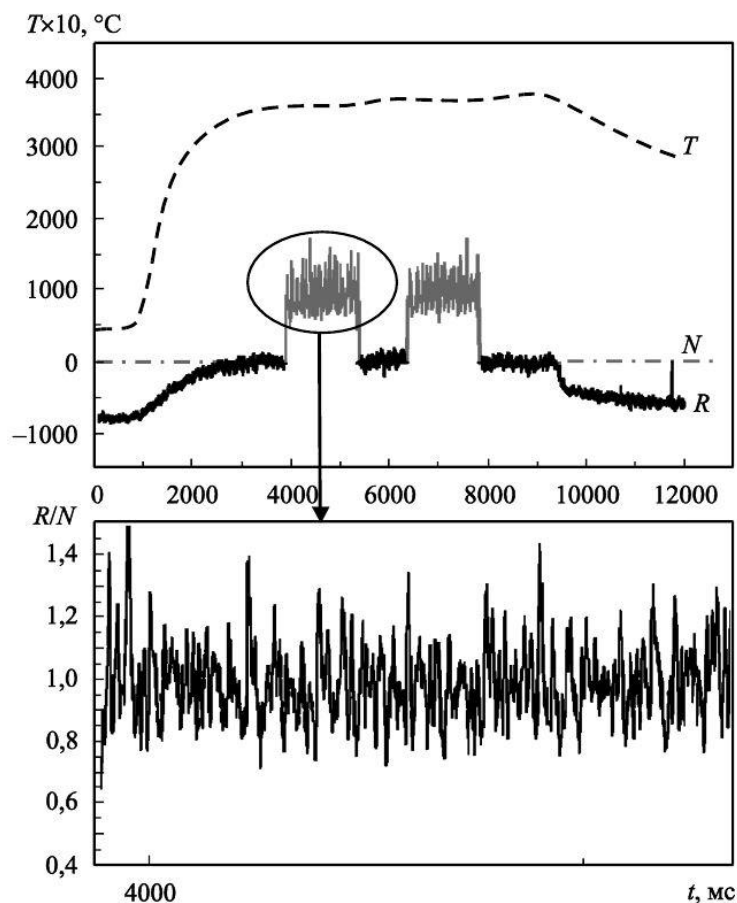


Рисунок 4.8 Результаты измерения сигнала радиометра для порошка ПЖР-1

На всех графиках показания радиометра имеют подставку, определяемую паразитным излучением сопла (уменьшали за счет помещения сопла в

радиационный цилиндрический экран (Рисунок 4.2) измерительное поле станда) и излучением струи нагретого газа. Последний вклад становится ощутимым при высоких температурах струи.

Установлено, что статическая температура порошка железа практически не зависит от его концентрации в потоке (Рисунок 4.9) [77, 145].

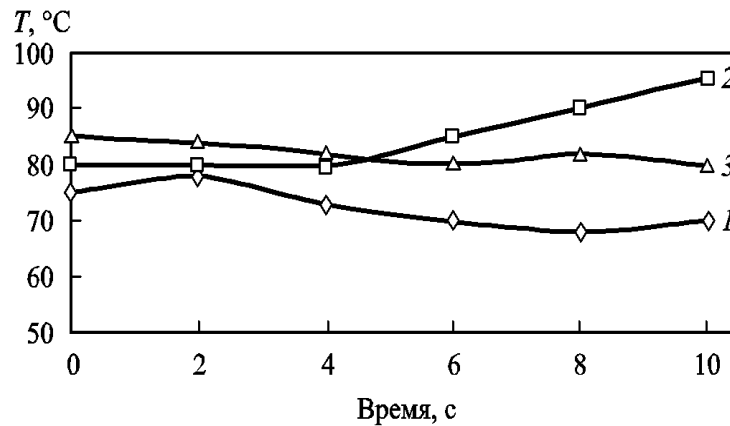


Рисунок 4.9. Статическая температура для частиц порошка ПЖР1: 1 – расход порошка 1,75 г/с; 2 – расход порошка 1,0 г/с; 3 – расход порошка 2,0 г/с

4.3.2. Температурные измерения на порошке алюминия (ПА-ВЧ-1)

Рисунок 4.10 отражает результаты построения калибровочной кривой радиометра, проведенные для порошка ПА-ВЧ-1.

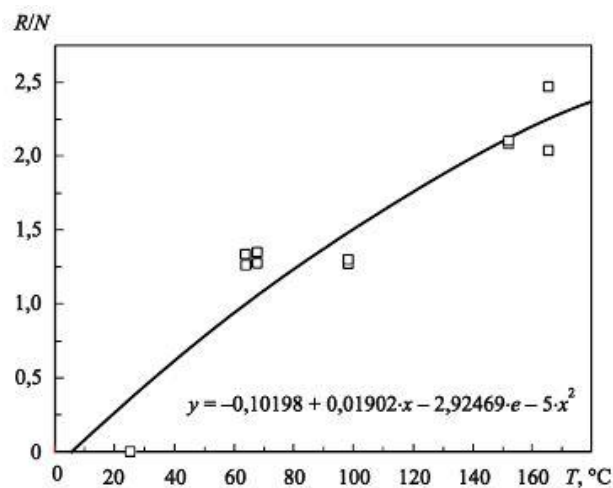


Рисунок 4.10. Калибровка радиометра для двухфазных потоков с порошком ПА-ВЧ-1

Рисунок 4.11 показывает характерную картину результатов измерения температуры частиц алюминия в потоке установки «Димет-403».

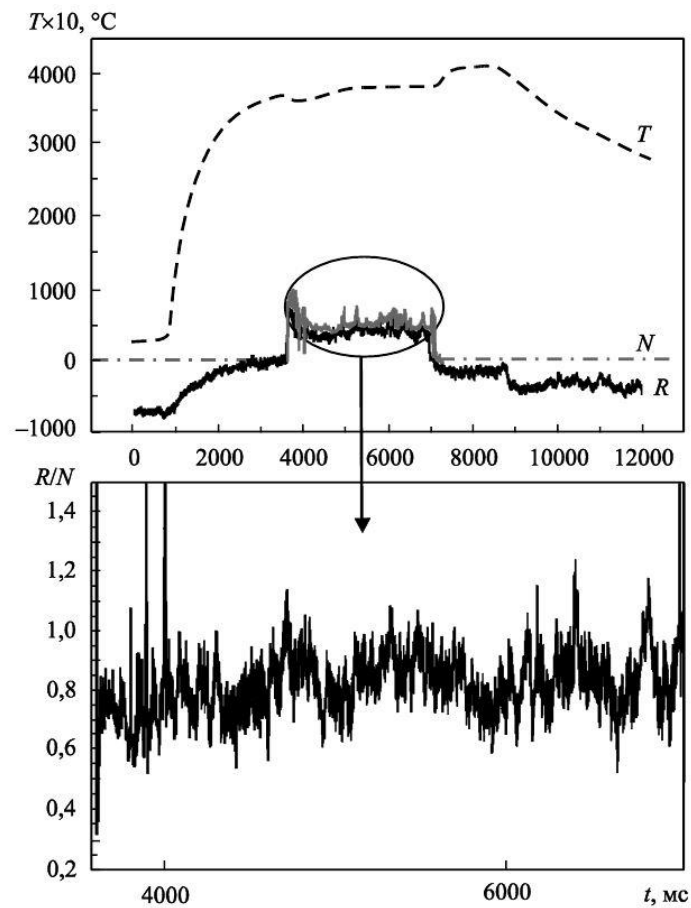


Рисунок 4.11 Результаты измерения сигнала радиометра для порошка ПА-ВЧ-1

Статическая температура алюминиевого порошка практически не зависит от его концентрации в потоке Рисунок 4.12) [77, 145].

Сравнительный анализ данных, полученных для стального и алюминиевого порошка, показывает, что статическая температура алюминиевого порошка ниже, чем у стального порошка (Рисунок 4.9 и Рисунок 4.12). Вероятно это является следствием различных значений теплоемкости исследуемых материалов.

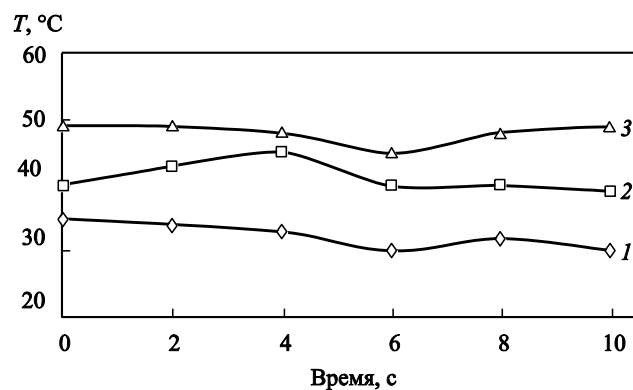


Рисунок 4.12 Статическая температура порошка ПА-ВЧ-И: 1 – расход порошка 1,0 г/с; 2 – расход порошка 1,75 г/с; 3 – расход порошка 2,0 г/с

Теплоемкость алюминия (880 Дж/кг×град) почти в два раза превышает теплоемкость железа (457 Дж/кг×град). Кроме того, можно сделать предположение, что не последнюю роль играет время пребывания частиц в потоке, т.е. скорость частиц, о чем более подробно будет указано в следующем разделе.

Следует особо отметить, что разогрев частиц алюминия в потоке до 55°С не оказывает существенного влияния на пластические характеристики материала и как следствие на величину адгезии наносимого покрытия на подложку. Для данного процесса температура частиц не является критической при определении критериев технологических режимов.

Как было указано в Главе 1, принципиальную роль играет скорость частиц в гетерофазном потоке. Адгезионная прочность определяется в основном условиями преобразования кинетической энергии в тепловую в процессе взаимодействия с преградой, т. е. непосредственно при формировании покрытия.

4.4. Определение скорости частиц в гетерофазном потоке

С помощью разработанного стенда определены также скорости частиц в гетерофазном потоке с использованием ЛДИС.

4.4.1. Характеристики доплеровского измерителя скорости

Лазерный луч пересекал ось потока под углом 121° (угол между волновым вектором излучения и скоростью потока). Угол рассеяния был выбран 63°, что при длине волны 0,6328 мкм дает величину удельного доплеровского сдвига равную $1,58 \times 10^6$ Гц×с/м.

Свободный спектральный интервал используемого в ЛДИС сферического интерферометра равен 725,4 МГц. Характеристики системы пьезосканирования интерферометра таковы, что перестройка интерферометра на свободный спектральный интервал обеспечивается за 436 шагов – точек измерения в спектре. В результате верхняя граница измеряемой скорости для данной геометрии системы наблюдения рассеянного света равна 459 м/с, а коэффициент

пересчета, связывающий число точек измерения со скоростью близок к 1 и равен $1,05 \text{ м/с} \times \text{шаг}$.

Область наблюдения ЛДИС определялась экспериментально (Рисунок 4.13). Ее диаметр определяется диаметром лазерного луча (2,5 мм), а чувствительность распределения вдоль луча.

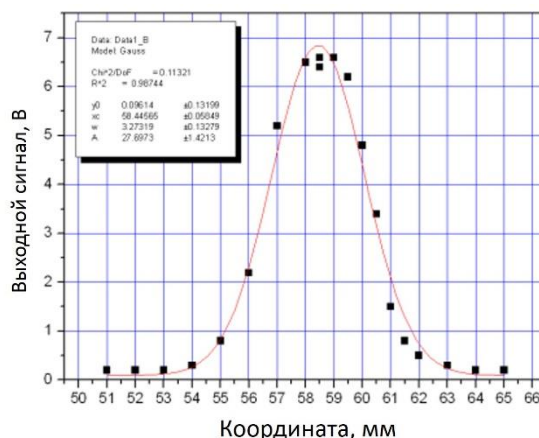


Рисунок 4.13 Распределение чувствительности ЛДИС вдоль лазерного луча

Проводилась запись положения собственной частоты интерферометра, в данный момент времени соответствующей нулевой скорости потока (несмещенная частота лазера). Для этого вход интерферометра переключался на опорный канал, в который подавалось излучение лазера. Проводилась запись рассеянного в потоке излучения. Для этого вход интерферометра переключался на измерительный канал, связанный с системой сбора рассеянного излучения. Каждый раз система автоматической регулировки усиления выбирала уровни усиления так, чтобы сигналы попадали в динамический диапазон каналов измерения. При снятии спектров рассеяния усиление всех трактов фиксировалось. Одновременно с записью спектров рассеяния производилась запись уровня рассеянного в потоке света. Типичный вид регистрируемых сигналов соответствует сигналу опорного канала (Рисунок 4.14, Кривая 1). Положение максимума этого сигнала показывает уровень нулевой скорости по шкале перестройки интерферометра по частоте (шагов). Кривая 2 соответствует сигналу рассеянного на частицах потока света. Максимум этого сигнала сдвинут на средний доплеровский сдвиг, а сам сигнал уширен. Это говорит о большом разбросе частиц потока по скоростям. Кривая 3 показывает изменение уровня

рассеяния и стабильность концентрации за период измерения скорости потока в области наблюдения ЛДИС. При измерении скорости частиц в дальнейшем будем говорить только о средней скорости переноса частиц, соответствующей максимуму сигнала (Кривая 2). В результате проведенных таким образом измерений установлен диапазон скоростей частиц: скорость частиц лежит в пределах 100–350 м/с максимумом 190 м/с.

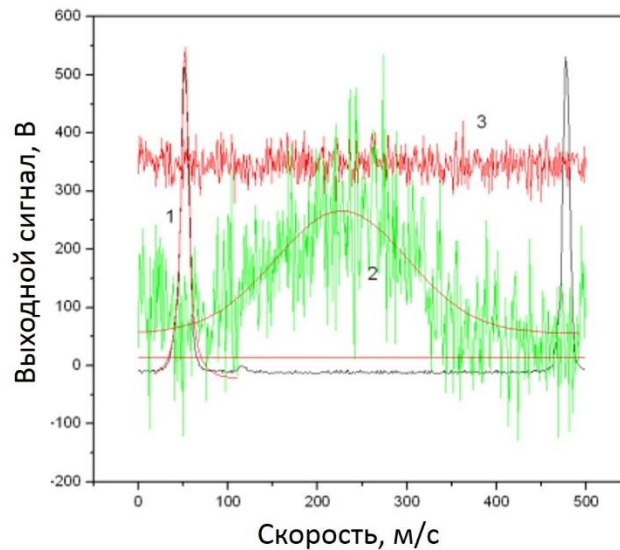


Рисунок 4.14 Общий вид сигналов на выходе доплеровского измерителя скорости частиц. Приведены данные для потока с частицами стального порошка при рабочем давлении 6,0 атм.

4.4.2. Результаты измерения скорости твердой фазы в струях установки «Димет-403» при ее работе с порошком железа

Измерения скорости частиц производились на двух дистанциях от среза сопла – 15 мм и 50 мм при разных производительностях дозатора (Таблица 4.1).

Таблица 4.1. Значения скорости частиц порошка на основе железа

Расстояние от среза сопла, мм	Расход порошка, г/сек.	Усредненная скорость порошка, м/с
15	2,5	142,6
	1,75	207,3
	1,0	224,7
50	2,5	139,1
	1,75	184,3
	1,0	217,7

4.4.3. Результаты измерения скорости твердой фазы в струях установки «Димет-403» при использовании порошка алюминия

Измерения скорости частиц производились также на двух дистанциях от среза сопла – 15 мм и 50 мм при разных производительностях дозатора (Таблица 4.2).

Таблица 4.2 Значения скорости частиц порошка на основе алюминия

Расстояние от среза сопла, мм	Расход порошка, г/сек.	Усредненная скорость порошка, м/с
15	2,5	286,3
	1,75	308,1
	1,0	316,9
50	2,5	141,3
	1,75	177,3
	1,0	220,7

Выводы по Главе 4

Таким образом, в ходе экспериментов установлено, что температура торможения газового потока изменяется в диапазоне значений от 637°С до 540°С, что соответствует температуре частиц для стального порошка в диапазоне от 65°С до 95°С, а для алюминиевого порошка в диапазоне от 25°С до 55°С.

В ходе экспериментов установлено, что максимальная скорость газового потока 654 м/с, что соответствует усредненной скорости частиц для стального порошка 220 м/с и для алюминиевого порошка 316 м/с при расходе порошка 1,0 г/с, увеличение концентрации порошка в потоке приводит к снижению скорости частиц.

Значение температуры порошка алюминия ниже температуры порошка железа, это связано с тем, что алюминий имеет меньшую плотность, а следовательно, и частицы порошка обладают меньшей массой. Это позволяет им быстрее разгоняться в потоке и достигать более высоких скоростей, в связи с чем время их пребывания в потоке значительно меньше и воздействие на них

теплового потока менее продолжительно. Это выдвигает дополнительные специфические требования при разработке технологического процесса напыления покрытий из разнородных материалов (напыление механических смесей), каждый из которых характеризуется конкретными требованиями к параметрам процесса.

Есть основание предполагать, что температурно-скоростные параметры процесса напыления выбранных алюминиевых сплавов несущественно отличаются от чистого алюминия.

Глава 5. ВЗАИМОСВЯЗЬ СТРУКТУРЫ И СВОЙСТВ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ПОКРЫТИЙ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ПАРАМЕТРОВ НАНЕСЕНИЯ, ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА И ТЕХНОЛОГИИ ПОЛУЧЕНИЯ ПОРОШКОВОГО МАТЕРИАЛА

Глава посвящена экспериментальному исследованию адгезионной прочности, микротвердости и пористости функциональных покрытий на основе матричных и композиционных порошков, полученных по различной технологии и различного химического состава. Представлены примеры покрытий, полученных при оптимальных температурно-скоростных режимах потока, и изучено влияние структуры покрытий на их функциональные свойства. Приведены результаты исследования коэффициента трения и интенсивности изнашивания функциональных покрытий, полученных из матричных и композиционных порошков. Описана технология получения ФГП с применением специально разработанного модуля с программируемой системой дозаторов и представлены результаты исследования ФГП, полученного из матричного порошка С9 и композиционного порошка С9И70.

5.1. Выбор технологических режимов напыления при напылении функциональных покрытий из матричных порошков

Для получения базы сравнения напыление покрытий из порошков матричных материалов производили при различных температурно-скоростных

параметрах, постепенно увеличивая температуру и скорость. Типичные примеры структуры покрытий МСП9, МЛ9, С9, С6, полученные при напылении при Режиме № 3 и расстоянии от среза сопла 10 мм (температуре 360°C и скорости газового потока 580 м/с, Рисунок 4.5 и Рисунок 4.6) представлены ниже (Рисунок 5.1 - Рисунок 5.4).



9

Рисунок 5.1. Поперечное сечение покрытия МЛ9, полученное при режиме напыления со скоростью 580 м/с и температуре потока 360°C



Рисунок 5.2. Поперечное сечение покрытия МСП9, полученное при режиме напыления со скоростью 580 м/с и температуре потока 360°C



Рисунок 5.3. Поперечное сечение покрытия С9, полученное при режиме напыления со скоростью 580 м/с и температуре потока 360°С

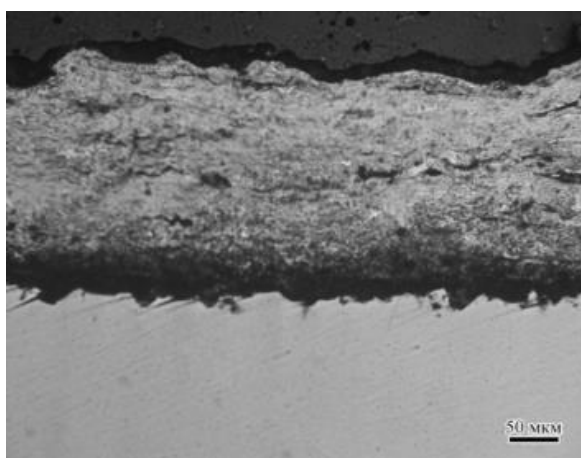


Рисунок 5.4. Поперечное сечение покрытия С6, полученное при режиме напыления со скоростью 580 м/с и температуре потока 360°С

При этом наблюдалось образование волнистых пор длиной до 100 мкм в поперечном сечении повторяющих профиль покрытия. Подобные поры наблюдались на покрытиях всех исследуемых составов. Это, вероятно, является следствием того, что при напылении с низкой скоростью и температурой частицы не обладают необходимой энергией для образования достаточной когезионной прочности покрытия. Становится очевидным, что для повышения энергии частиц необходимо увеличивать температурно-скоростные параметры процесса напыления.

При увеличении скорости до 600 м/с и температуры до 450°С газового потока, что соответствует использованию при напылении Режима № 4 и расстоянию от среза сопла 15 мм, наблюдается иная картина (Рисунок 5.5 - Рисунок 5.8).

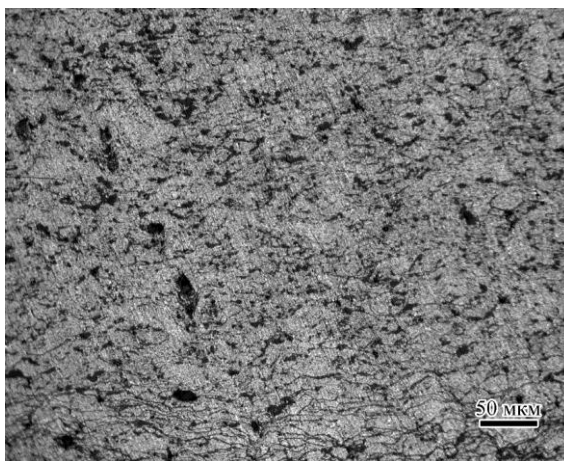


Рисунок 5.5. Поперечное сечение покрытия МЛ9, полученное при режиме напыления со скоростью 600 м/с и температуре потока 450°С

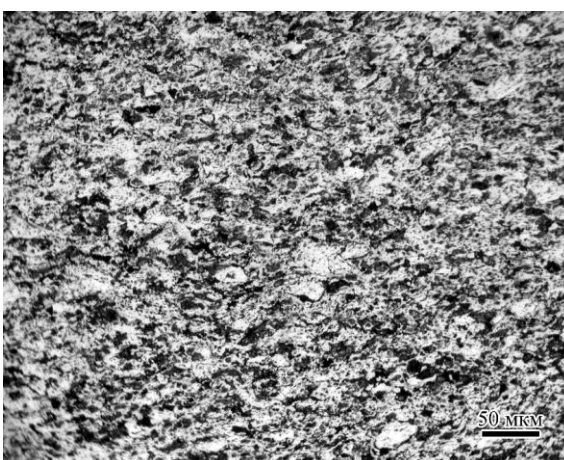


Рисунок 5.6. Поперечное сечение покрытия МСП9, полученное при режиме напыления со скоростью 600 м/с и температуре потока 450°С

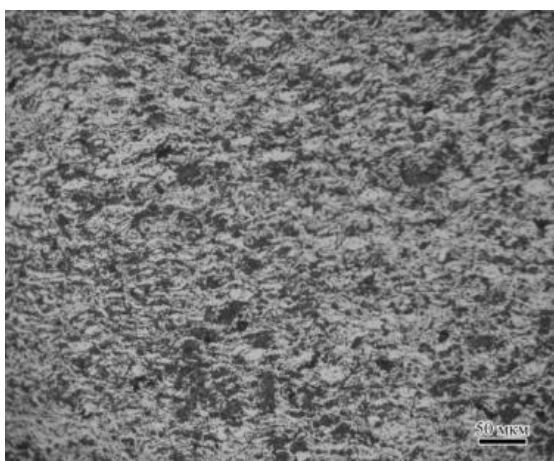


Рисунок 5.7. Поперечное сечение покрытия С9, полученное при режиме напыления со скоростью 600 м/с и температуре потока 450°С

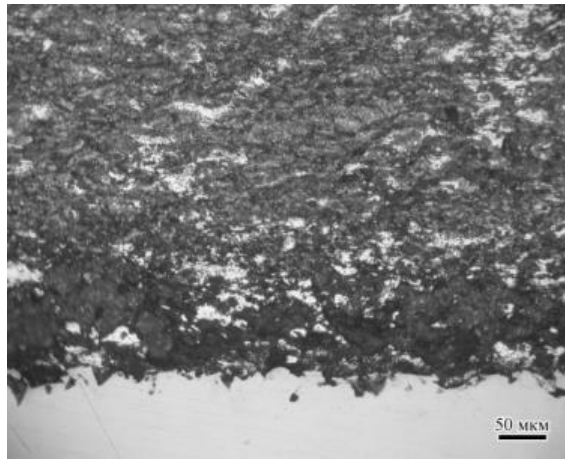


Рисунок 5.8. Поперечное сечение покрытия С6, полученное при режиме напыления со скоростью 600 м/с и температуре потока 450°С

Покрyтия получаютcя достаточно плотные без наличия протяженных пор.

Однако, дальнейшее увеличение температурно-скоростных параметров до значений (540°С и 660 м/с), что соответствует напылению на Режиме № 5 и расстоянию от среза сопла 10 мм, приводит к тому, что на поверхности покрытия наблюдается образование глубоких кратеров, связанных с некоторым локальным перегревом покрытия. При этом покрытие становится неравномерным и края кратера постепенно утолщаются.

Таким образом, было установлено, что оптимальными для нанесения порошков системы Al-Sn-Zn при напылении покрытий можно считать Режим № 4 и расстояние от среза сопла 15 мм. Далее в работе указанный режим будет использоваться при нанесении остальных исследуемых покрытий по умолчанию.

Для определения состава функционального покрытия из матричного порошка С9 был проведен рентгеноспектральный микроанализ (Рисунок 5.9).

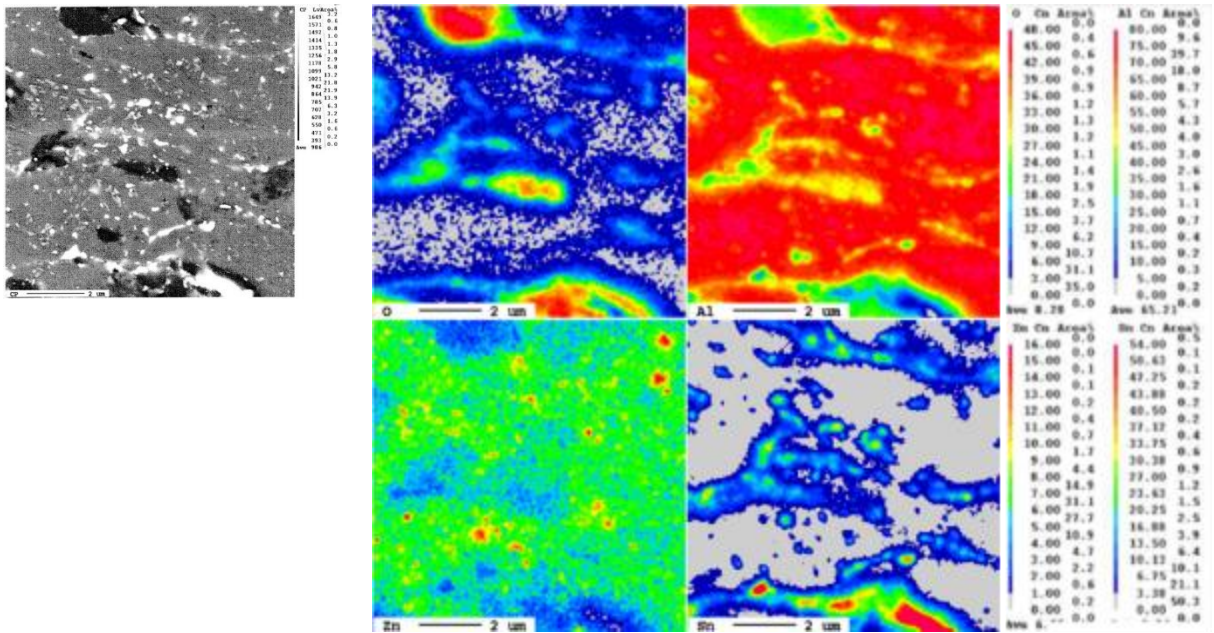


Рисунок 5.9. Результаты PCMA функционального покрытия из порошка С9.

Результаты показали, что в процессе нанесения покрытия методом ХГДН не произошло структурных и фазовых изменений, Zn практически равномерно растворен в Al, а Sn присутствует в виде самостоятельной фазы. Полученное покрытие по своему фазовому и химическому составу полностью соответствует исходному порошковому материалу [77]. Это позволяет достаточно легко управлять химическим и фазовым составом получаемого покрытия, регулируя состав исходного порошкового материала.

5.2. Создание покрытий с композиционной структурой

Для создания покрытий с композиционной структурой были опробованы механические смеси матричного порошка С9 и Al_2O_3 различных составов. Функциональные покрытия, получаемые из механической смеси порошков, наносили при температуре $450^\circ C$ и скорости газового потока 600 м/с, расход порошкового материала составлял 1,0 г/с (Рисунок 5.10 - Рисунок 5.13).

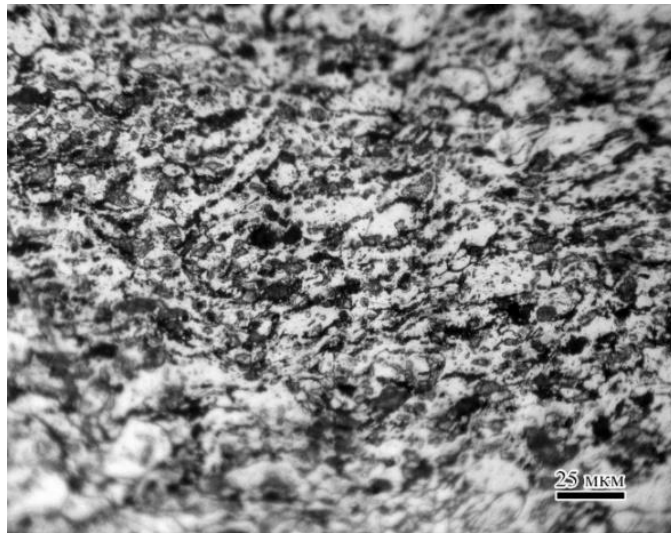


Рисунок 5.10. Поперечное сечение покрытия из порошка МС5

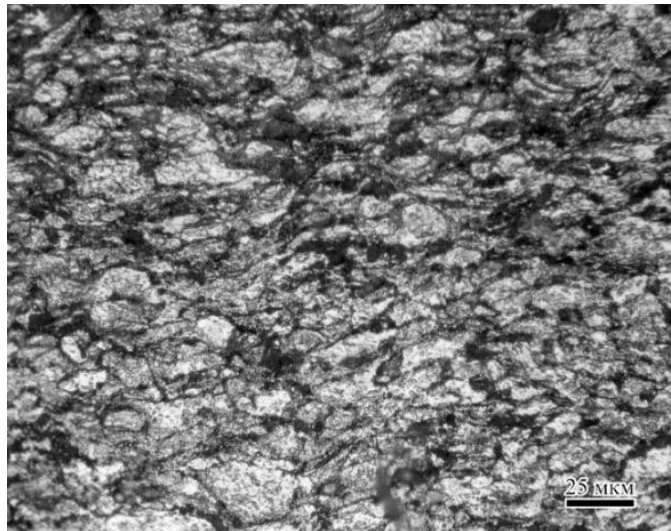


Рисунок 5.11. Поперечное сечение покрытия из порошка МС10

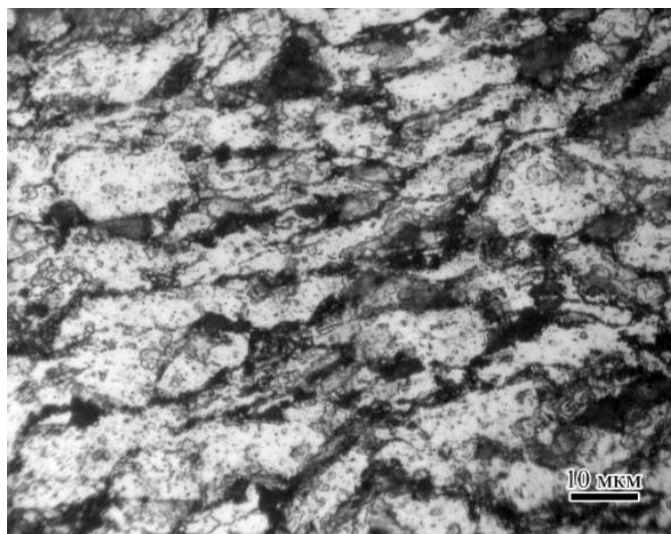


Рисунок 5.12. Поперечное сечение покрытия из порошка МС20

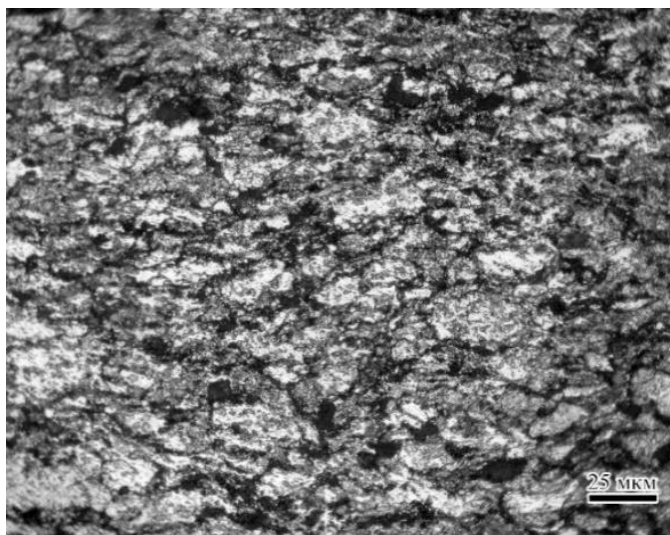


Рисунок 5.13. Поперечное сечение покрытия из порошка МС40

Из приведенных снимков видно, что все покрытия имеют равномерную структуру, трещины и отслоения отсутствуют.

Далее представлены результаты металлографических исследований функциональных покрытий из композиционных порошков, полученных методом механосинтеза (Рисунок 5.14 - Рисунок 5.19).

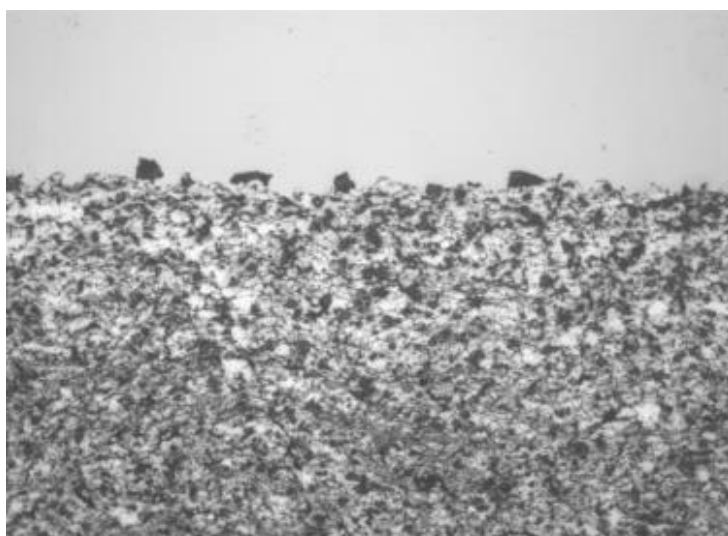


Рисунок 5.14. Поперечное сечение покрытия из порошка С9Д30

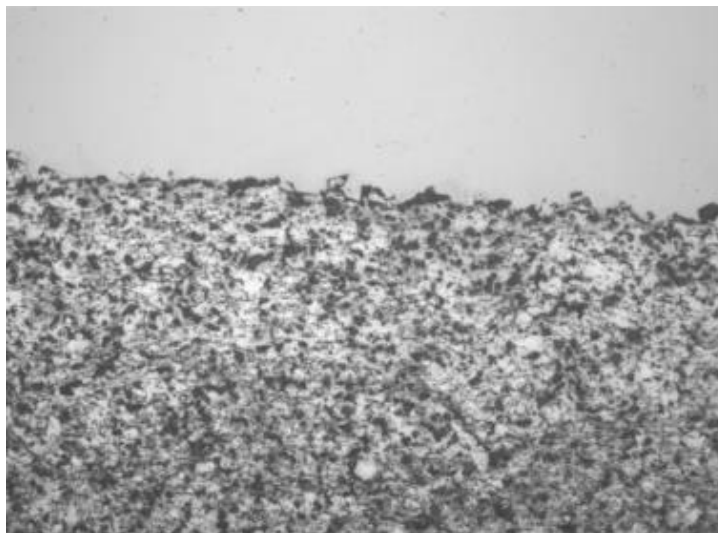


Рисунок 5.15. Поперечное сечение покрытия из порошка С9Д70

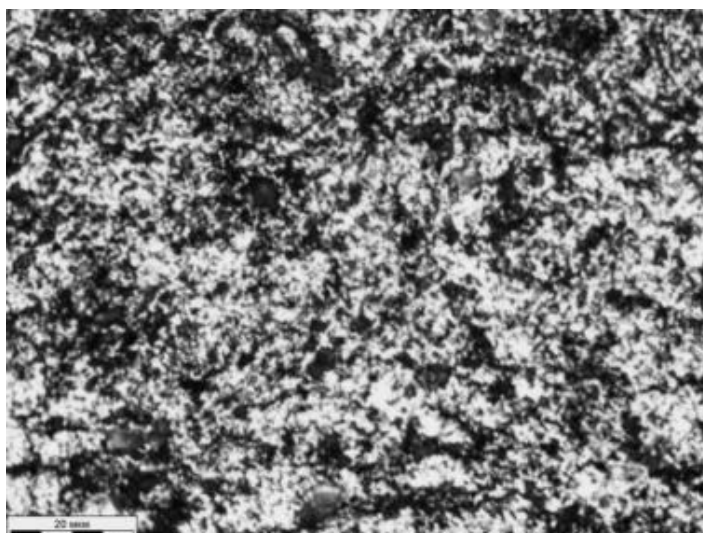


Рисунок 5.16. Поперечное сечение покрытия из порошка С9М30

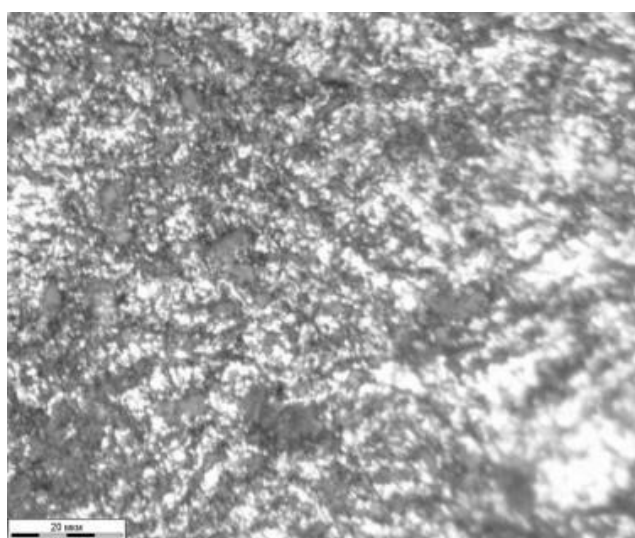


Рисунок 5.17. Поперечное сечение покрытия из порошка С9М70

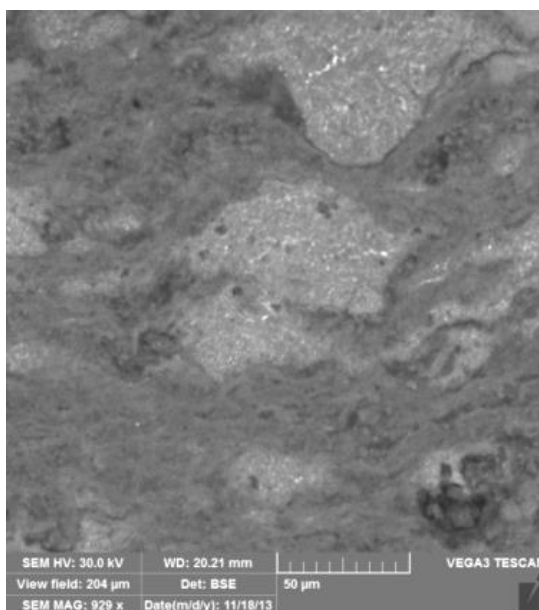


Рисунок 5.18. Поперечное сечение покрытия С9И30

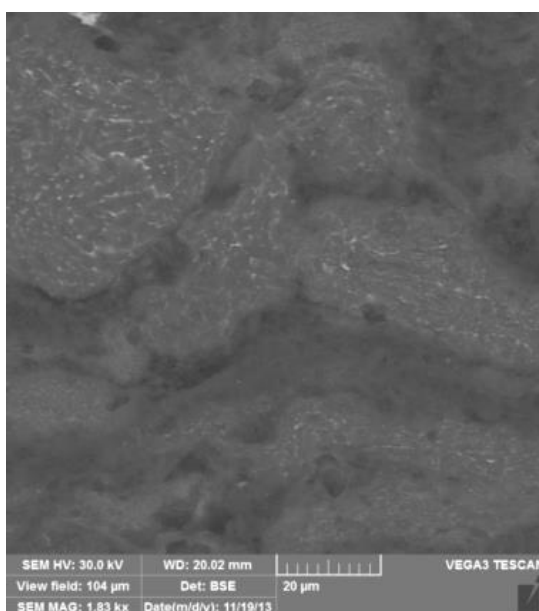


Рисунок 5.19. Поперечное сечение покрытия С9И70

Все исследованные покрытия имеют равномерную структуру, трещины и отслоения отсутствуют.

Проведенный рентгеноспектральный микроанализ покрытия из порошка С9 показал, что химический и фазовый состав покрытия сохраняется после напыления и соответствует исходному порошковому материалу (Рисунок 5.20 и Таблица 5.1) [146].

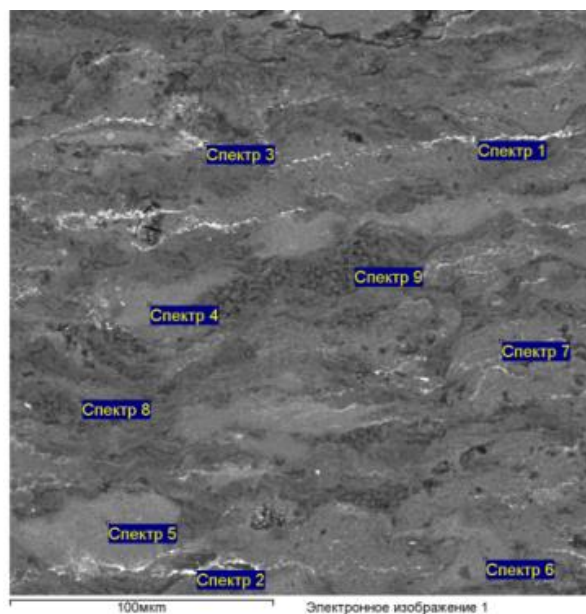


Рисунок 5.20. Исследуемая область покрытия С9И70

Таблица 5.1. Результаты рентгеноспектрального микроанализа покрытия С9И70

Все результаты в весовых %											
Сп	O	Al	Si	S	Cl	Cr	Fe	Ni	Cu	Zn	Sn
Сп 1	36.8	20.9				3.5	13.2	2.1		1.2	22.4
Сп 2	53.1	20.3					0.2			0.6	25.8
Сп 3	40.6	22.1	0.3	0.3	0.5		0.8			0.9	34.6
Сп 4		90.1								3.9	6.0
Сп 5		88.0					0.7			3.9	7.5
Сп 6		90.2					0.7			3.7	5.4
Сп 7		94.4								3.1	2.6
Сп 8	48.9	46.9								1.3	3.0
Сп 9	40.9	55.4							1.9	0.7	1.2

5.3. Исследование микротвердости функциональных покрытий

5.3.1. Исследование микротвердости функциональных покрытий из матричных порошков

Для исследования микротвердости функциональных покрытий из порошков матричного материала, полученного смешением исходных порошков МСП9, механическим легированием МЛ9, металлургическим методом С3, С6,

С9 были изготовлены шлифы. По всему сечению покрытия микротвердость была в пределах погрешности измерения (Таблица 5.2 и Таблица 5.3).

Таблица 5.2. Результаты измерения микротвердости функциональных покрытий, полученных из исходных порошков чистых металлов

Материал покрытия	Микротвердость, HV
МСП9	43
МЛ9	49

Таблица 5.3. Результаты измерения микротвердости функциональных покрытий, полученных из матричных порошков

Материал покрытия	Микротвердость, HV
С9	53
С6	55
С3	56

Установлено, что микротвердость функциональных покрытий из порошков, полученных металлургическим методом выше, чем у покрытий на основе исходных порошков чистых металлов. Это, очевидно, является следствием того, что состав и структура этих порошков более однородны, как показано в Главе 3.

5.3.2. Исследование микротвердости функциональных покрытий из механической смеси порошков С9 и армирующей компоненты

Как показано выше, для повышения микротвердости в состав механической смеси вводили корунд. Механическую смесь матричного порошка С9 и армирующей компоненты Al_2O_3 заданного состава получали в смесителе типа «пьяная бочка» в течение 30 мин. Были исследованы покрытия из порошков четырех композиции с различным содержанием матричной и армирующей составляющих: МС5, МС10, МС20, МС40 (Таблица 5.4).

Таблица 5.4. Результаты измерения микротвердости функциональных покрытий, полученных из механической смеси порошков

Состав покрытия	Микротвердость, HV
MC5	78
MC10	84
MC20	86
MC40	85

Из таблицы видно, что введение в алюминиевый порошок корунда повышает твердость. График зависимости микротвердости от содержания армирующей компоненты в порошке механической смеси показывает, что эффективное увеличение твердости наблюдается при 5%, далее увеличивается до значения 86 HV и после чего возрастание прекращается (Рисунок 5.21).

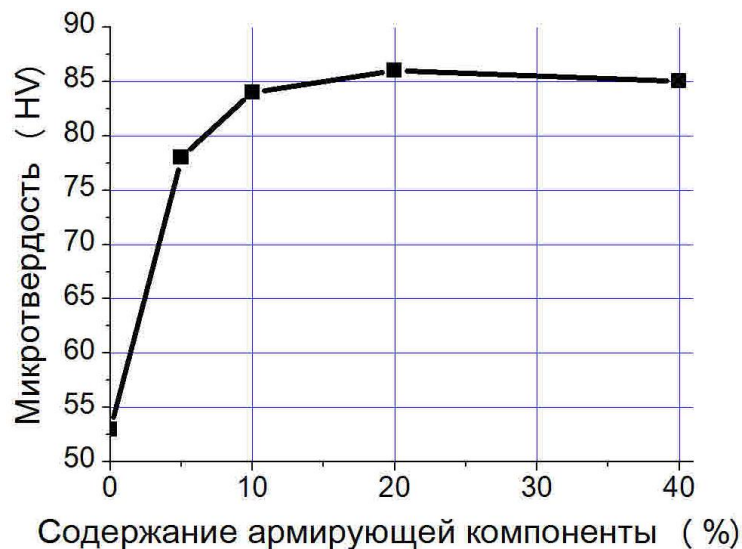


Рисунок 5.21. Зависимость микротвердости от содержания армирующей компоненты для покрытий из порошков MC5, MC10, MC20, MC40

Эти результаты подтверждают, что для повышения микротвердости необходимо использовать композиционные порошковые материалы.

5.3.3. Исследование микротвердости функциональных покрытий из композиционных порошков

Значения микротвердости покрытия на основе композиционных порошков, полученных с использованием УДА обработки, во многом зависят от режима обработки и количества армирующей компоненты (Таблица 5.5, Таблица 5.6) [137].

Таблица 5.5. Результаты измерения микротвердости функциональных покрытий, из композиционных порошков, полученных в дезинтеграторе при содержании армирующей компоненты 30%

Скорость, об/мин	Число проходов	Микротвердость, HV
6000	1	79
6000	2	82
6000	3	81
9000	1	72
9000	2	98
9000	3	73
15000	1	89
15000	2	94
15000	3	82

Как видно из таблицы, максимальная твердость достигается при УДА обработке со скоростью 9000 об/мин при осуществлении двух проходов и равна 98 HV.

Таблица 5.6. Результаты измерения микротвердости функциональных покрытий, из композиционных порошков, полученных в дезинтеграторе при содержании армирующей компоненты 70%

Скорость, об/мин	Число проходов	Микротвердость, HV
6000	1	73
6000	2	115
6000	3	80
9000	1	79
9000	2	98
9000	3	85
15000	1	79
15000	2	121
15000	3	78

Как видно из таблицы, максимальная твердость покрытия достигается с использованием композиционного порошка, содержащего 70% корунда, при УДА обработке со скоростью 15 000 об/мин при осуществлении двух проходов и составляет 121 HV [147]. При этом следует отметить, что величины микротвердости покрытий из порошков, полученных методом УДА после двух проходов на всех представленных скоростях обработки, имеют более высокие

значения. Это интересный факт, но в данной работе подробно не рассматривался.

Значения микротвердости покрытий из композиционных порошков, полученных с использованием планетарной мельницы, показаны ниже (Таблица 5.7).

Таблица 5.7. Результаты измерения микротвердости функциональных покрытий, из композиционных порошков, полученных в МПП

Состав покрытия	Микротвердость, HV
С9М30	93
С9М70	124

Увеличение доли армирующей составляющей в композиционном порошке, полученном в МПП, приводит к увеличению микротвердости.

Более высокие значения микротвердости были определены у покрытий из композиционных порошков, полученных после обработки в чашечном истирателе (Таблица 5.8).

Таблица 5.8. Результаты измерения микротвердости функциональных покрытий, из композиционных порошков, полученных в МПП

Состав покрытия	Микротвердость, HV
С9И30	120
С9И70	240

Результаты показывают, что введение армирующей компоненты приводит к значительному увеличению микротвердости покрытия по сравнению с покрытиями, полученными из порошков после обработки с использованием дезинтегратора и МПП. Таким образом, обработка порошков в чашечном истирателе является более эффективной, и рекомендуется для практической реализации на установке «Димет-403».

5.4. Исследование пористости покрытий

Пористость покрытий определяли на шлифах с получением микроструктуры при увеличениях $\times 100$ и $\times 400$. Для выявления пористости и количественной оценки статистических особенностей структурных состояний применяли анализатор изображений Image Expert Pro3.0.

5.4.1. Исследование пористости функциональных покрытий из матричных порошков

Исследование пористости и максимального размера пор покрытий из матричных порошков показало, что пористость покрытий сильно зависит от способа получения порошкового материала (Таблица 5.9 и Таблица 5.10).

Таблица 5.9. Результаты измерения пористости матричного покрытия из исходных порошков чистых металлов

Состав покрытия	Характеристика	Значение	Ед.изм
МЛ9	Средний размер пор	16,2	мкм
	Процент площади, занятой порами	3,0	%
МСП9	Средний размер пор	17,5	мкм
	Процент площади, занятой порами	2,2	%

Таблица 5.10. Результаты измерения пористости матричного покрытия из порошков, полученных высокоскоростным распылением из сплава

Состав покрытия	Характеристика	Значение	Ед.изм
С3	Средний размер пор	10,3	мкм
	Процент площади, занятой порами	0,5	%
С6	Средний размер пор	12,5	мкм
	Процент площади, занятой порами	0,3	%
С9	Средний размер пор	8,0	мкм
	Процент площади, занятой порами	0,6	%

Анализ полученных результатов показывает, что матричное покрытие из порошка, полученного из сплава, имеет пористость менее 0,6% (Таблица 5.10).

5.4.2. Исследование пористости функциональных покрытий из механической смеси порошков С9 и армирующей компоненты

С увеличением количества корунда в механической смеси порошков увеличивается пористость покрытия (Таблица 5.11).

Таблица 5.11. Результаты измерения пористости функциональных покрытий, полученных из механической смеси Al-9%Sn-3%Zn+корунд

Состав покрытия	Характеристика	Значение	Ед.изм
МС5	Средний размер пор	10,5	мкм
	Процент площади, занятой порами	7,3	%
МС10	Средний размер пор	10,3	мкм
	Процент площади, занятой порами	10,2	%
МС20	Средний размер пор	13,8	мкм
	Процент площади, занятой порами	13,4	%
МС40	Средний размер пор	28,8	мкм
	Процент площади, занятой порами	18,3	%

Увеличение армирующей составляющей повышает общую пористость покрытия, а также увеличивается средний размер пор.

5.4.3. Исследование пористости функциональных покрытий из композиционных порошков

Далее приведены результаты для покрытий, полученных из композиционных порошков (Таблица 5.12 - Таблица 5.14).

Таблица 5.12. Результаты измерения пористости функциональных покрытий из композиционных порошков, полученных после обработки УДА

Состав покрытия	Характеристика	Значение	Ед.изм
С9Д30	Средний размер пор	10,8	мкм
	Процент площади, занятой порами	1,1	%
С9Д70	Средний размер пор	11,4	мкм
	Процент площади, занятой порами	1,2	%

Таблица 5.13. Результаты измерения пористости функциональных покрытий из композиционных порошков, полученных после обработки в МПП

Состав покрытия	Характеристика	Значение	Ед.изм
С9М30	Средний размер пор	11,2	мкм
	Процент площади, занятой порами	0,7	%
С9М70	Средний размер пор	13,4	мкм
	Процент площади, занятой порами	0,9	%

Таблица 5.14. Результаты измерения пористости функциональных покрытий из композиционных порошков, полученных после обработки в ИВЧ

Состав покрытия	Характеристика	Значение	Ед.изм
С9И30	Средний размер пор	9,8	мкм
	Процент площади, занятой порами	0,7	%
С9И70	Средний размер пор	12,1	мкм
	Процент площади, занятой порами	0,8	%

Средний размер пор покрытий из композиционных порошков ниже, чем из порошков механической смеси, и находится в пределах значений для матричных порошков, что является следствием отсутствия агломератов, свойственных покрытиям из механических смесей. Пористость функциональных покрытий увеличивается при введении корунда в состав покрытия. Наибольшие значения пористости наблюдаются в покрытиях, содержащих упрочняющую компоненту, полученных из механической смеси порошков, и составляют 18,3%. В покрытиях, которые были получены при использовании для напыления механической смеси, пористость имеет максимальные значения. Наименьшей пористостью обладают функциональные покрытия из матричных порошков, полученных металлургическим методом. В покрытиях, полученных при использовании композиционных порошков, пористость незначительно отличается от пористости покрытий из матричных порошков и при использовании композиционных порошков, полученных в чашечном истирателе и планетарной мельнице, не превышает 0,9%, а при УДА обработки достигает 1,2%.

5.5. Исследование адгезионной прочности функциональных покрытий

Адгезионная прочность является одной из основных характеристик покрытий, а ее повышение является важнейшей задачей при разработке износостойких покрытий.

5.5.1. Исследование адгезионной прочности функциональных покрытий из матричных порошков

Исследование адгезионной прочности покрытий, полученных из матричных порошков, показало значительный разброс значений в зависимости от способа получения порошкового материала (Таблица 5.15 и Таблица 5.16).

Таблица 5.15. Результаты измерения адгезии покрытий, полученных из порошков исходных металлов

Материал покрытия	Адгезия, МПа
МСП9	41
МЛ9	40

Таблица 5.16. Результаты измерения адгезионной прочности покрытий из быстрозакаленных порошков

Материал покрытия	Адгезия, МПа
С9	60
С6	51
С3	48

Из приведенных данных видно, что покрытия из порошка, полученного металлургическим методом, обладают более высокой адгезионной прочностью. При использовании порошка матричного С9 для напыления покрытия обладают наибольшей адгезионной прочностью. На основании этого указанный порошковый материал выбран в качестве матричной составляющей для получения композиционного порошка [139].

5.5.2. Исследование адгезионной прочности функциональных покрытий из механической смеси порошков С9 и армирующей компоненты

Результаты измерения адгезионной прочности функциональных покрытий, полученных из механической смеси порошков матричной и армирующей компоненты, указывают на значительный разброс значений в зависимости от содержания армирующей компоненты (Таблица 5.17).

Таблица 5.17. Результаты измерения адгезионной прочности покрытий, полученных из смеси матричного и армирующего порошка в зависимости от концентрации

Материал покрытия	Адгезия, МПа
МС5	57
МС10	53
МС20	49
МС40	39

Введение армирующей составляющей в состав покрытия при использовании механических смесей значительно снижает адгезионную прочность.

5.5.3. Исследование адгезионной прочности функциональных покрытий из композиционных порошков

Результаты исследования адгезионной прочности покрытий из композиционных порошков имеют меньший разброс значений (Таблица 5.18).

Таблица 5.18. Результаты измерения адгезионной прочности функциональных покрытий, полученных из композиционных порошков

Материал покрытия	Адгезия, МПа
С9Д30	54
С9Д70	50
С9М30	55
С9М70	51
С9И30	56
С9И70	52

Таким образом, полученные результаты комплексных испытаний функциональных покрытий показали, что наибольшей адгезионной прочностью обладает покрытие, состоящее из матричного материала С9, а максимальной микротвердостью – композиционное покрытие С9И70. Очевидно, чтобы обеспечить оптимальное сочетание высокой адгезионной прочности и высокой микротвердости, необходимо создать функционально-градиентное покрытие, что, как показали наши исследования, вполне реально для метода ХГДН.

5.6. Получение и исследование функционально-градиентного покрытия

Идея получения ФГП состоит в том, что при напылении покрытия от подложки к поверхности необходимо в соответствии с заданным законом, например, линейным (Рисунок 5.22) менять состав напыляемых порошков [132, 148].

При этом определяющим является объемное соотношение матричного и композиционного порошков.

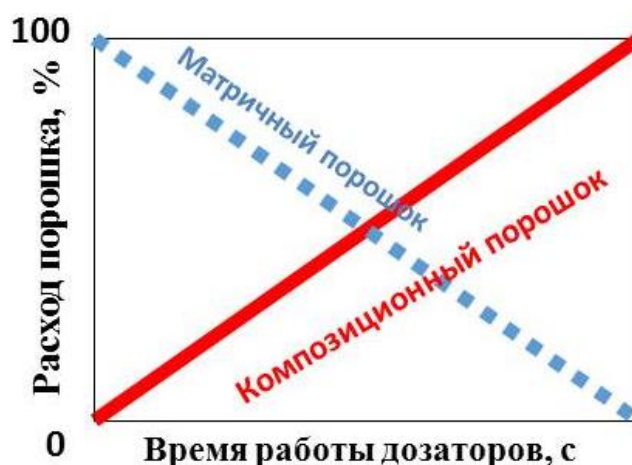


Рисунок 5.22. Схема работы дозаторов при получении ФГП

Для решения этой задачи была привлечена фирма ООО «ОЦПН», г. Обнинск, которая является производителем установок «Димет». Перед фирмой ООО «ОЦПН» были поставлены следующие задачи:

- разработка и изготовление оборудования системы дозаторов порошковых материалов;

- разработка и отладка компьютерной программы, согласующей работу элементов комплекса установки для напыления «Димет», систему позиционирования напылительной части и систему автоматизированной подачи порошков.

Успешным результатом выполнения работы ООО «ОЦПН» можно считать разработку оборудования и программного обеспечения для специальной автоматизированной системы дозаторов.

В качестве примера получения и исследования ФГП было опробовано нанесение покрытия из двух дозаторов. В одном из них находился порошок матричного материала С9, во втором – С9И70, была определена программа управления дозаторами (Рисунок 5.23) [149].



Рисунок 5.23. Диалоговое окно расхода порошка по дозаторам при получении ФГП

Исследование полученного ФГП показало, что покрытие равномерное, отслоения отсутствуют (Рисунок 5.24).

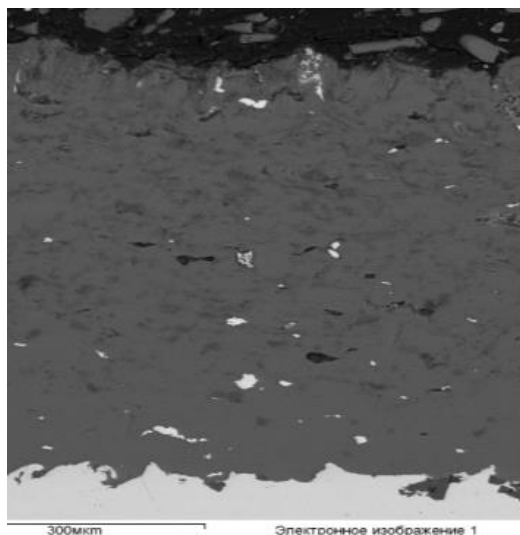


Рисунок 5.24. Поперечное сечение шлифа ФГП

Результаты РСМА указывают на ярко выраженный градиент по химическому составу (Рисунок 5.25).

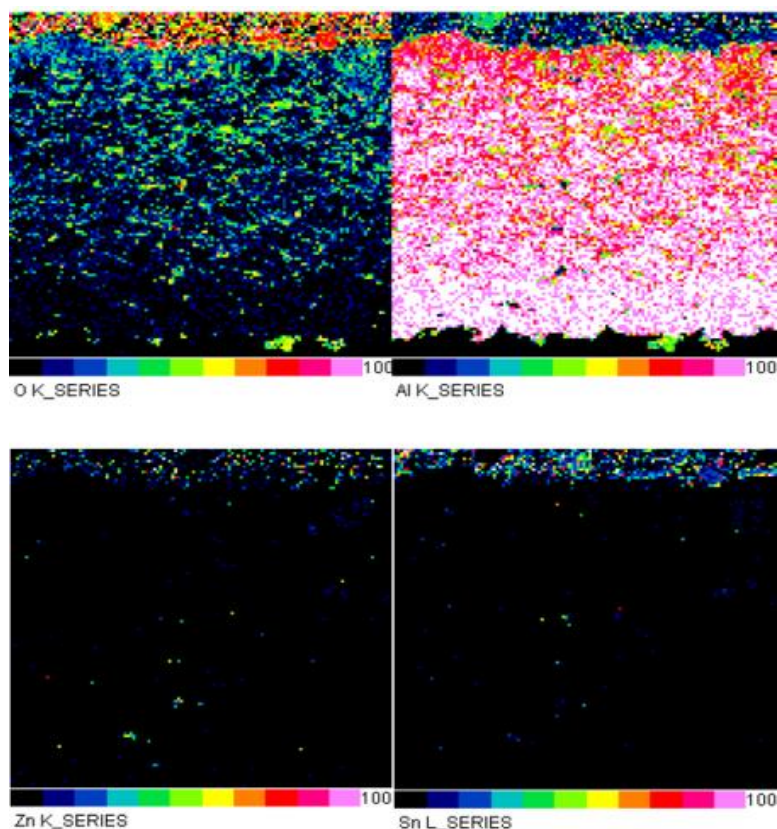


Рисунок 5.25. Результаты рентгеноспектрального микроанализа ФГП

Это также подтверждается результатами исследования микротвердости (Рисунок 5.26 и Рисунок 5.27).



Рисунок 5.26. Следы отпечатков пирамидки при определении микротвердости

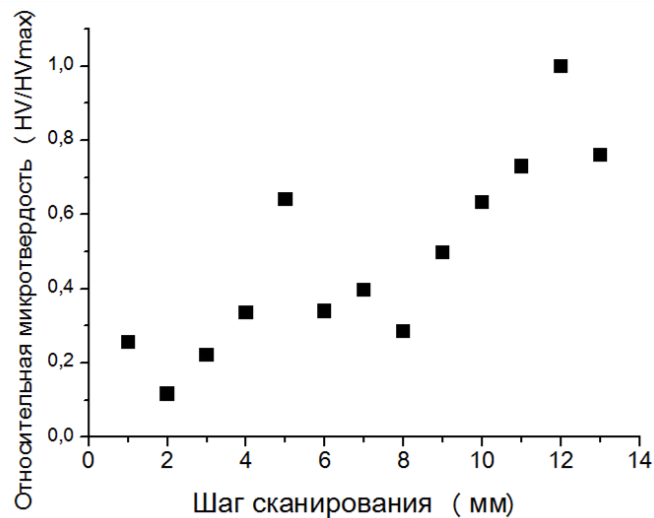


Рисунок 5.27. Результаты исследования микротвердости ФГП

Микротвердость ФГП от подложки к периферии увеличивается примерно в четыре раза и достигает 240 HV, при сохранении высокой адгезионной прочности – до 60 МПа [150].

5.7. Результаты трибологических испытаний полученных функциональных покрытий

Оценка работоспособности разработанных ФГП проводилась в соответствии ускоренной оценкой износостойкости трущихся сопряжений в условиях граничного трения.

Для проведения трибологических испытаний в качестве образца контртела была выбрана сталь 20Х13. Испытания проводили при линейной скорости 1,0 м/с; в условиях граничного (сухого) трения (экстремальные условия работы –

пуск и останов двигателя, прекращение подачи смазки), толщина покрытия 1,0 мм. В ходе испытания установлено, что при нагрузке 160 Н коэффициент трения снижается с увеличением содержания олова в покрытии, а с увеличением содержания армирующей компоненты происходит его увеличение (Рисунок 5.28).

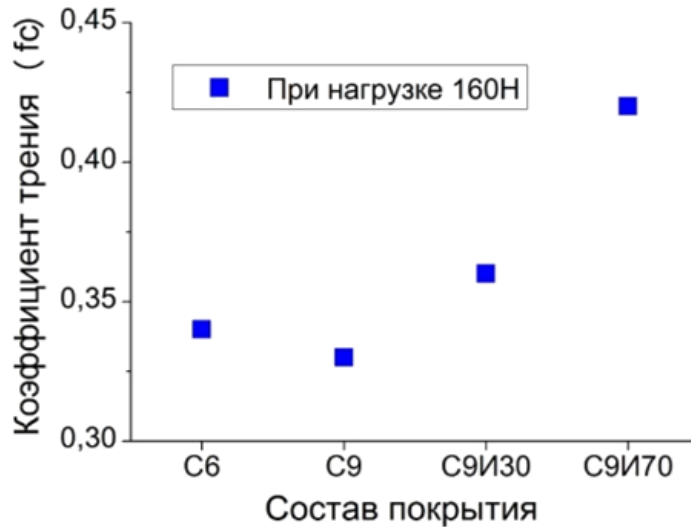


Рисунок 5.28. Значения коэффициента трения в зависимости от состава покрытия

Покрытия, состоящие из матричных материалов C6 и C9, не выдержали испытаний при 160 Н более 5 мин. Контактное давление при данной нагрузке составило 5 МПа. Поэтому для дальнейших исследований было выбрано покрытие C9I70, т.к. имеет значительно меньшую интенсивность изнашивания.

Значения коэффициента трения и интенсивности изнашивания покрытий определяли при установившемся режиме трения (Рисунок 5.29).



Рисунок 5.29. Изменение момента трения от времени испытания покрытия C9I70

Значения коэффициента трения и интенсивности изнашивания покрытия С9И70 показали, что с увеличением нагрузки (контактного давления) до 360 Н возрастает коэффициент трения и износ (Рисунок 5.30).

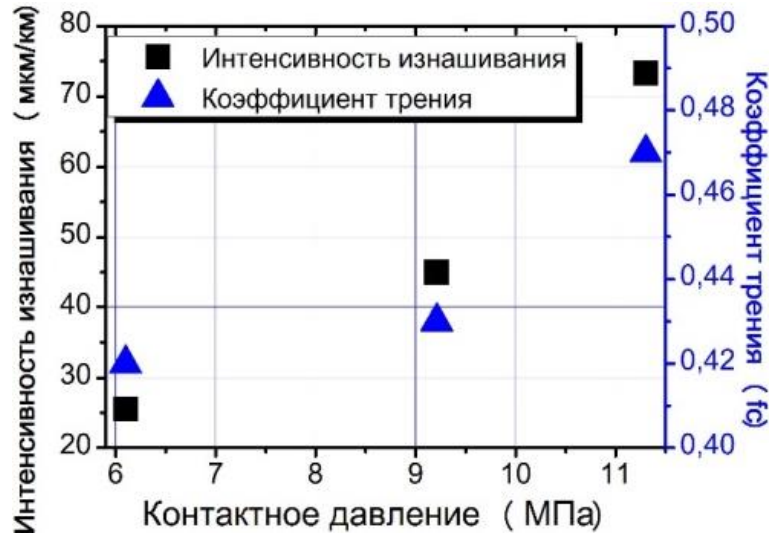


Рисунок 5.30. Значения коэффициента трения и интенсивности изнашивания покрытия С9И70

При испытании покрытия С9И70 при нагрузке 360Н было установлено, что произошел разогрев образца с покрытием до температуры выше 400°С (Рисунок 5.31).

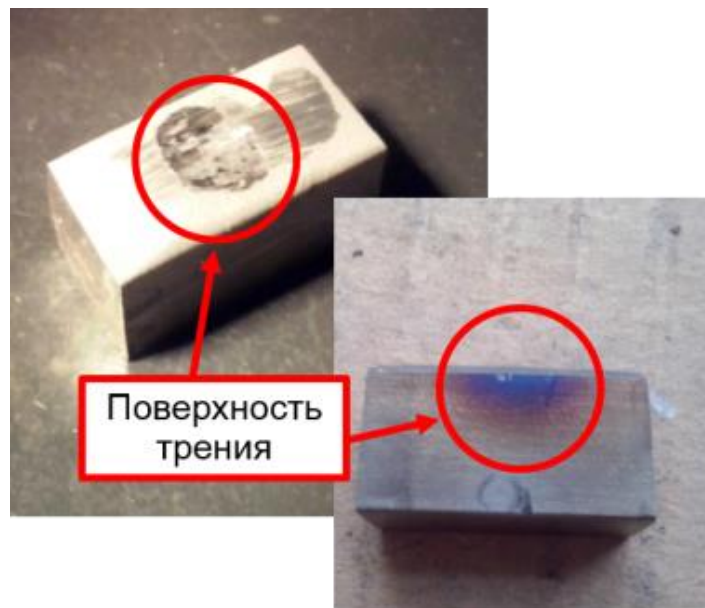


Рисунок 5.31. Внешний вид образца с покрытием С9И70 после испытания

После испытания при нагрузках 160 Н, 260 Н, 360 Н и установления характеристик (коэффициента трения и интенсивности изнашивания) были

проведены испытания с целью определения предельных нагрузок. Для этого проводили нагружение с постепенным увеличением нагрузки 450 Н, 650 Н, 850 Н, 1050 Н. При каждой из указанных нагрузок испытания проводили по 5 мин. После 20 мин испытаний и достигнутой нагрузке 1050 Н испытания были остановлены, т.к. при указанной нагрузке были достигнуты предельные значения момента трения установки. Кроме того, при достижении 1050 Н произошел разогрев образца контртела до температуры свыше 600°C (Рисунок 5.32)

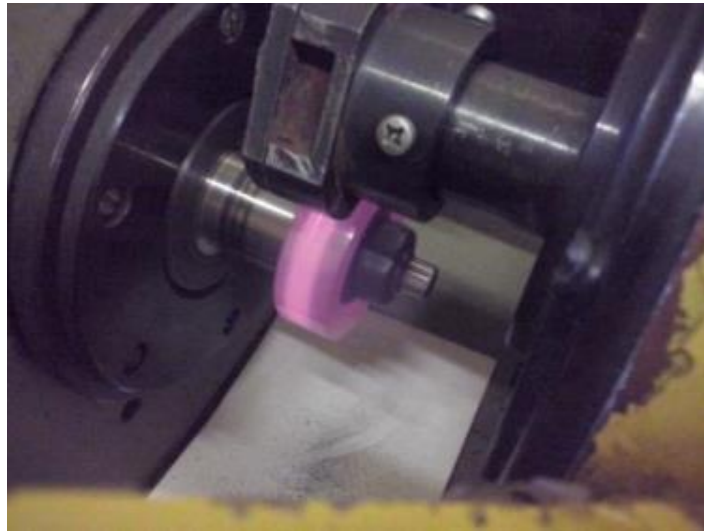


Рисунок 5.32. Контртело ролик из стали 20X13 нагрелся при испытании

Следует отметить, что на образце с покрытием внешних признаков нагрева не наблюдалось.

Результаты исследования коэффициента трения показывают изменения его значений с увеличением нагрузки (Рисунок 5.33).

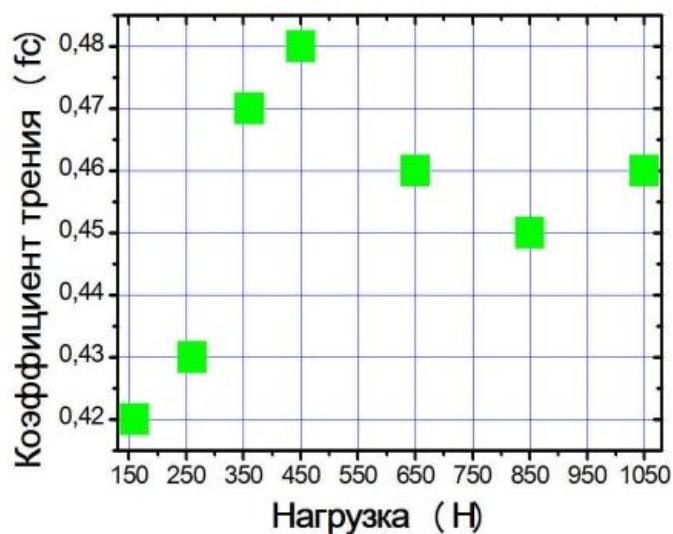


Рисунок 5.33. Измеренное значение коэффициента трения при различных нагрузках

Зависимость коэффициента трения от нагрузки показывает, что с увеличением нагрузки от 160 Н до 450 Н происходит увеличение коэффициента трения от 0,42 до 0,48. Максимальное значение коэффициента трения находится в интервале нагрузки от 450 Н до 650 Н, затем снижается до значений 0,45–0,46.

Рентгеноструктурный качественный анализ показал, что дифракционные максимумы фаз чистого алюминия и олова слабые и уширены, что свидетельствует о большой деформации поверхностного слоя (Рисунок 5.34). В процессе трения произошел перенос материала контртела на поверхность образца с композиционным покрытием (Рисунок 5.35 и Таблица 5.19).

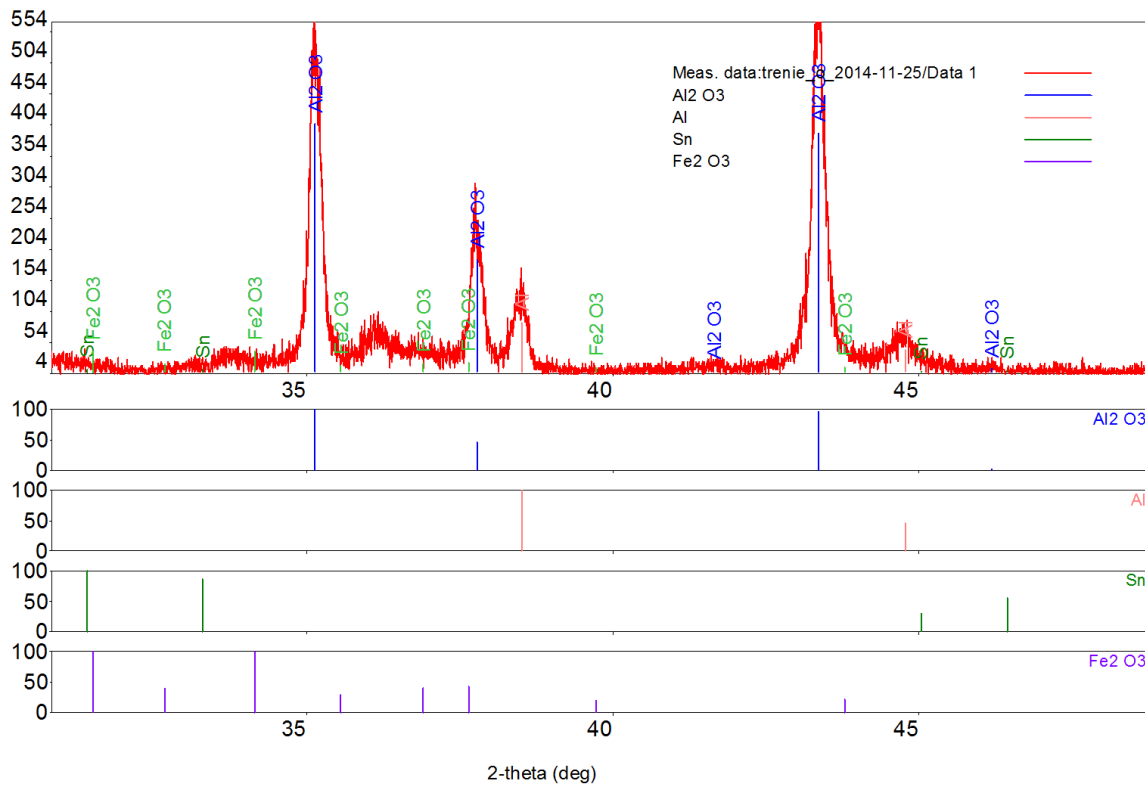


Рисунок 5.34. Результаты рентгеноструктурного качественного анализа поверхности покрытия С9И70 после испытания на трение

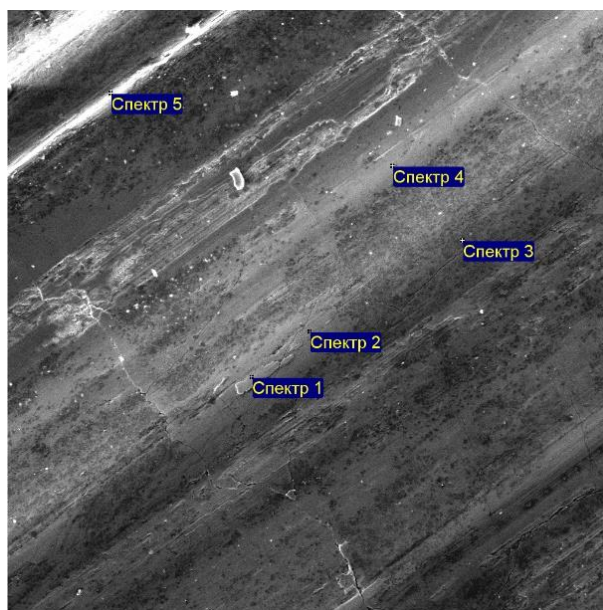


Рисунок 5.35. Исследуемая область поверхности покрытия С9И70 после испытания на трение

Таблица 5.19. Результаты РСМА поверхности покрытия С9И70 после испытания на трение

Все результаты в весовых %									
Спектр	O	Na	Al	Si	Cr	Mn	Fe	Cu	Zn
Сп 1	40.4		5.6	0.2	2.0		47.0	0.5	4.5
Сп 2	42.8		14.7	0.2	3.9		37.1		1.5
Сп 3	48.7		38.0	0.5	1.1	0.2	10.8		0.7
Сп 4	44.3		13.9	0.4	4.4	0.3	35.8	0.2	0.7
Сп 5	24.5	0.5	11.3	0.3	6.7		56.7		

Это вызвано тем, что при нагреве в зоне контакта до температуры выше 600°C твердость поверхности стали 20X13 значительно снизилась с 580 HV до 230 HV по сравнению с твердостью поверхности композиционного покрытия.

Повышенные характеристики разработанных ФГП на основе композиционных армированных порошков делают их весьма перспективными при использовании в качестве контртела более прочных материалов, что соответственно повышает эксплуатационные возможности изделий транспортной, энергетической и машиностроительной техники в целом.

Выводы по Главе 5

Таким образом, в результате комплексных исследований процесса нанесения функциональных покрытий с помощью метода ХГДН экспериментально установлено, что при получении функциональных покрытий из порошковых материалов на основе алюминия оптимальными характеристиками гетерофазного потока являются – температура 450°C и скорость газового потока 600 м/с.

Результаты исследования адгезионной прочности, микротвердости и пористости функциональных покрытий показали, что использование матричного порошка, полученного металлургическим методом (распылением из сплава заданного химического состава) является наиболее эффективным (все исследуемые характеристики положительные). В качестве матричного порошкового материала был выбран порошок С9. Использование порошка механической смеси матричной и армирующей составляющей (С9+корунд) дает прирост микротвердости на 60%, при содержании корунда 20%, но дальнейшее увеличение концентрации приводит лишь к увеличению пористости и снижению адгезионной прочности, а применение композиционных порошков ведет к значительному повышению исследуемых характеристик. Максимальное значение микротвердости (240 НV) достигается при использовании композиционного порошка С9И70.

Совмещение высоких значений адгезионной прочности и микротвердости функциональных покрытий в составе единой системы реализуется при создании функционально-градиентного покрытия за счет разработки технологии его получения с использованием модуля с программируемой системой дозаторов для разработанных порошковых материалов, описанных в Главе 3.

Создание ФГП показано на примере использования порошков С9 и С9И70, результаты исследования подтверждают наличие ярко выраженного градиента химического состава по поперечному сечению шлифа с покрытием.

Результаты трибологических исследований функциональных покрытий показали, что наименьшим коэффициентом трения обладает покрытие из

матричного порошка С9, с увеличением армирующей компоненты в покрытии наблюдается увеличение коэффициента трения, но при этом возрастает износостойкость покрытия. Использование функционального покрытия из композиционного порошка С9И70 дает возможность увеличения контактного давления в 5 раз (до 25 МПа). Однако появляются дополнительные требования к материалу контртела, а именно к повышению его твердости, что позволит рекомендовать к применению такое покрытие в тяжело нагруженных узлах трения.

Глава 6. АДАПТАЦИЯ ТЕХНОЛОГИИ ХГДН ПРИМЕНИТЕЛЬНО К СОЗДАНИЮ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ПОКРЫТИЙ НА КОНКРЕТНЫХ ИЗДЕЛИЯХ. ПРАКТИЧЕСКАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ РАБОТЫ

В первом разделе данной главы представлены результаты исследования технологичности напыления покрытий в зависимости от расхода порошкового материала, скорости сканирования и угла наклона сопла к напыляемой поверхности.

В следующих разделах показаны примеры реального применения результатов исследования и отработки технологии создания функциональных покрытий методом ХГДН на изделиях машиностроения и не только.

6.1. Определение коэффициента использования порошка и угла наклона сопла

6.1.1. Исследование расхода напыляемого порошка

Для определения оптимального расхода порошка производили напыление, варьируя расход в широких пределах от 0,2 г/с до 2,0 г/с, при оптимальных температурно-скоростных параметрах, установленных в Главе 4. При расходах менее 0,4 г/с наблюдается снижение коэффициента использования порошка и низкая скорость нарастания покрытия, что, во-первых, соответствует данным работ [72, 80] о малых концентрациях частиц в газовом потоке, а во-вторых, штатные дозаторы установки «Димет-403» при малых расходах порошка С9 не обеспечивают стабильной работы. По результатам исследований скорости

частиц, при расходе порошка более 1,0 г/с скорость частиц снижается, что не позволяет получать покрытия без трещин или отслоений, как было показано в Главе 5. Оптимальным является расход от 0,8 г/с до 1,2 г/с.

6.1.2. Исследование влияния скорости сканирования на толщину покрытия

Исследования влияния скорости сканирования подложки (перемещение пятна напыления относительно подложки) на толщину покрытия проводились при фиксированном технологическом режиме при использовании порошка С9. Расстояние до среза сопла составляло 10 мм, расход порошка составлял 1,0 г/с. Скорость сканирования изменялась в диапазоне от 0,35 м/мин до 1,8 м/мин. Как известно, скорость сканирования подложки влияет на толщину покрытия, получаемого за один проход напыления, и эпюру распределения покрытия на подложке. Поэтому после каждого цикла напыления с фиксированной скоростью строили эпюры распределения покрытия заданного состава на подложке (Рисунок 6.1). Ширина напыляемой дорожки при одном проходе составляет около 8 мм.

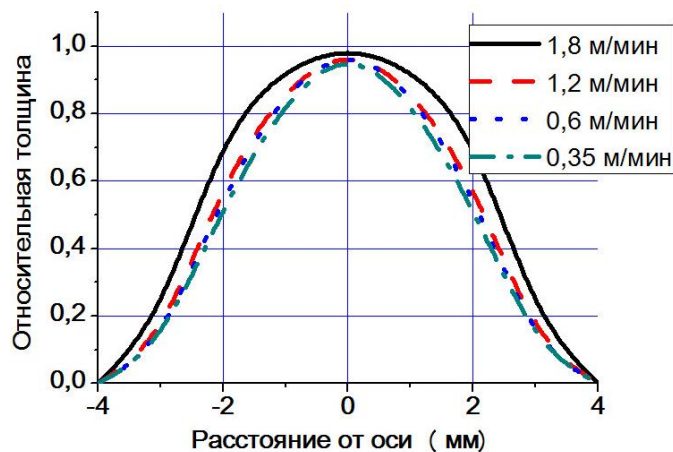


Рисунок 6.1. Эпюра распределения толщины покрытия из сплава Al–9%Sn–3%Zn при различной скорости сканирования

Эпюра распределения относительной толщины покрытия, полученного при различных скоростях сканирования, показывает, что при увеличении скорости сканирования вершина становится более полой. Для получения покрытий с наиболее равномерной поверхностью по толщине покрытий желательно

использовать скорости напыления от 1,2 м/мин до 1,8 м/мин. Максимальная толщина покрытия получена при скорости сканирования 0,35 мм/мин. При этом шаг напыления составит 3–4 мм. При снижении скорости сканирования ширина равномерного слоя составит 1,5–2 мм. При этом за счет подпыления соседних слоев покрытие будет более равномерным с гарантированной толщиной.

Необходимо отметить, что представленная зависимость эпюры распределения толщины покрытия от скорости сканирования является универсальной для порошков на основе системы Al–Sn, а выявленная закономерность, по всей видимости, будет прослеживаться и при напылении покрытий из других материалов. Анализ полученных данных позволит использовать их для определения наиболее оптимальных скоростей сканирования в зависимости от требований к толщине покрытия. Таблица 6.1 отражает данные по максимальной толщине получаемого за один проход покрытия различных составов. Расстояние от среза сопла до подложки 15 мм. Положение сопла – нормальное (под углом 90°), температура газового потока 450°C, скорость 600 м/с.

Таблица 6.1. Максимальные толщины покрытия, получаемого за один проход

Состав покрытия	Скорость сканирования, м/мин	Максимальная толщина полученного слоя, мм
Al–12%Sn*	0,35	Образуется толщиной до 0,01 мм. Дальнейшего роста не наблюдается.
Al–9%Sn–3%Zn	0,35	0,19
	0,6	0,16
	1,2	0,13
	1,8	0,08
Al–6%Sn–6%Zn	0,35	0,23
	0,6	0,20
	1,2	0,18
	1,8	0,13
Al–3%Sn–9%Zn	0,35	0,25
	0,6	0,22
	1,2	0,19
	1,8	0,13
Al–12%Zn**	0,35	0,27
	0,6	0,24
	1,2	0,2
	1,8	0,16

** Данный состав был опробован на начальном этапе и впоследствии был уточнен, см. Глава 3*

*** Данный состав был опробован при отработке режимов нанесения покрытий, но для дальнейших исследований не использовался, т.к. не содержит олова*

Полученные результаты показывают, что увеличение скорости сканирования в пять раз снижает толщину покрытия примерно в два раза. Следует отметить, что с увеличением содержания олова в порошке толщина покрытия уменьшается, а при отсутствии цинка в составе порошка сплошное покрытие практически не напыляется.

6.1.3. Исследование влияния угла наклона сопла к подложке на толщину наносимого покрытия

При нанесении покрытий на реальные изделия не всегда представляется возможным производить напыление нормально к поверхности (под углом 90°). Поэтому были проведены исследования по определению предельного угла, при котором коэффициент использования порошка был бы относительно высок.

Толщину напыляемого покрытия определяли при углах наклона 65° и 80° и относили к толщине покрытия при нормальном расположении сопла по отношению к подложке. Коэффициент использования порошка определяли, как отношение взвешенного после напыления образца к весу исходного порошка. Все образцы напыляли при температурно-скоростном режиме, соответствующему скорости 600 м/с и температуре торможения потока 450°C . Расход порошка составлял $1,0$ г/с. Расстояние от среза сопла до подложки составляло 15 мм. Все измерения проводили при одном слое покрытия, так как формирование повторных слоев затрудняет измерение толщины каждого нового слоя, что приводит к значительным ошибкам (Таблица 6.2).

Таблица 6.2. Результаты измерения максимальной толщины покрытия и коэффициента использования порошка при разных углах наклона сопла по отношению к подложке

Угол наклона сопла, °	Относительная толщина, %	Относительный коэффициент использования порошка, %
65	75–61	0,51–0,63
80	81–71	0,72–0,75

Результаты исследования показывают, что при отклонении угла напыления от нормального на 10° коэффициент использования порошка снижается на 25%, а при отклонении более чем на 25° коэффициент использования порошка снижается на 50%. Это важные результаты и их необходимо учитывать при напылении покрытий на изделия сложной формы. Представленные результаты были использованы при разработке технологических инструкций и руководящих документов [151, 152].

6.2. Нанесение функциональных покрытий на шатунные подшипники двигателя внутреннего сгорания

В рамках договора с одним из подразделений корпорации Toyota была разработана технология нанесения покрытия на шатунные подшипники двигателя внутреннего сгорания.

Заказчиком были выдвинуты основные требования к покрытию:

- Материал покрытия – система Al–Sn;
- Адгезионная прочность – не менее 30 МПа;
- Микротвердость – не менее 45HV;
- Толщина покрытия – от 0,4 мм до 0,5 мм.

Материал вкладыша (подложки) – холоднокатаная сталь, внутренний диаметр – 47,6 мм.

В качестве материала покрытия использовали порошки состава Al-6%Sn-6%Zn и Al-9%Sn-3%Zn. Покрытие наносили на стенде (Рисунок 6.2) согласно технологии, описанной в Главе 5. Образцы закреплялись в приспособление, которое затем крепилось в патрон, скорость вращения в

диапазоне 5-15 об/мин. Это соответствует линейной скорости от 0,8 м/мин до 2,4 м/мин.



Рисунок 6.2. Процесс напыления на шатунный подшипник

Сопловой блок закрепляли в устройстве, имеющем три степени свободы. Для обеспечения нанесения покрытия за один цикл устанавливали угол наклона сопла по отношению к подложке 70° . Предварительно фиксировали расстояние от среза сопла до подложки, равное 13 мм. Напыление производили при следующих параметрах:

- Температура газового потока – 450°C ;
- Скорость газового потока – 600 м/с;
- Массовый расход порошка – 1,0 г/с.

Скорость сканирования – 1,1 м/мин. При этой скорости гарантированная толщина покрытия составляет 0,1 мм на ширине полосы 3 мм. На основании этого выбрали шаг, равный 2 мм. В этих условиях создается достаточно равномерный слой, без отслоений (Рисунок 6.3).

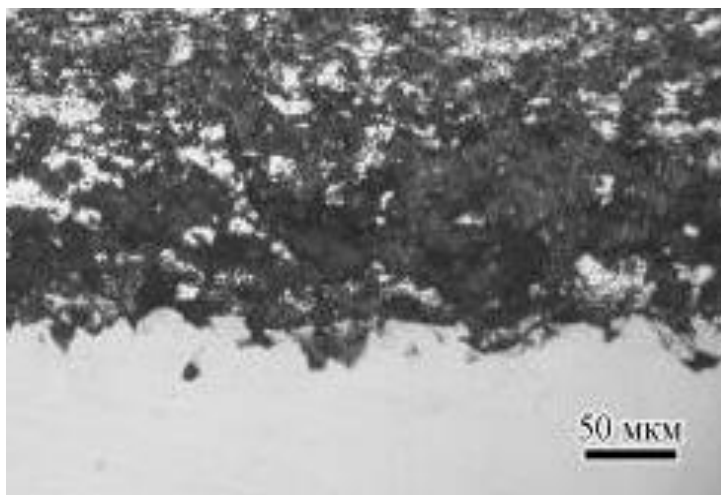


Рисунок 6.3. Структура нанесенного на вкладыш подшипника покрытия системы Al-9%Sn-3%Zn

Исследование структуры показало, что покрытие – равномерное, поры отсутствуют. Микротвердость и адгезионная прочность, полученных покрытий, превышает требования заказчика и составляет: адгезионная прочность – более 50 МПа, а микротвердость – не менее 50 HV. Опытная партия шатунных подшипников, с покрытием из составов (Al-6%Sn-6%Zn и Al-9%Sn-3%Zn) полученным по разработанной технологии, в количестве 20 комплектов была передана заказчику, и ее эксплуатационные испытания оказались положительными.

6.3. Нанесение защитных покрытий на секции рейзера (длина 3,0 м)

В рамках договора для компании ОАО «ОК РУСАЛ» были выполнены работы по нанесению износостойких покрытий на внутреннюю поверхность и сварной шов секций райзера для морских буровых платформ (материал секции – алюминиевый сплав).

Требования к покрытию:

- Материал покрытия – алюминий или его сплавы;
- Адгезионная прочность – не менее 35 МПа;
- Микротвердость – не менее 70HV;
- Толщина покрытия – 0,8 мм.

В результате проведения предварительных коррозионных испытаний из ряда опробованных материалов был определен материал покрытия – сплав Al-Sn-Zn. Было установлено, что функциональное покрытие выбранного состава в паре с материалом секции является протектором. Для повышения микротвердости в состав порошка был введен корунд фракции до 12 мм в количестве 30%.

Для нанесения покрытий на секции был подготовлен специализированный участок (Рисунок 6.4), включающий:

- Компрессор;
- Систему вытяжной вентиляции;
- Кантователь секции;
- Защитную камеру, предотвращающую загрязнение окружающего пространства цеха;
- Установку для напыления.



Рисунок 6.4. Участок напыления секции райзера

Напыление покрытий проводилось при следующих параметрах:

Для установки.

- Материал наносимого порошка – система Al-Sn-Zn+Al₂O₃;
- Температура газового потока – 450°C;
- Скорость газового потока – 600 м/с;

- Расстояние до подложки – 10 мм;
- Массовый расход порошка – 1 г/с.

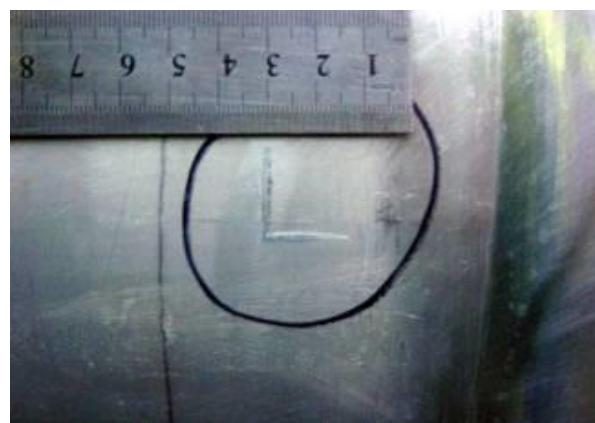
За время одного прохода (оборот – 4 мин) секции райзера напыляется полоса шириной 5–6 мм (сопло круглого сечения).

Перекрытие соседних напыляемых полос составляло 1–2 мм.

Входной контроль полученных сварных элементов райзера для последующего нанесения покрытий показал, что внешняя сторона зоны сварного соединения имеет множество дефектов различного рода, как металлургического происхождения, так и в результате механических повреждений, например, дефекты типа А и типа Б (Рисунок 6.5).



А



Б

Рисунок 6.5. Дефекты в результате механических повреждений – вмятины и забоины на внешней стороне райзера

Дефекты в результате механических повреждений – вмятины и забоины на внешней стороне райзера, дефекты типа С и типа Д (Рисунок 6.6)



С



Д

Рисунок 6.6. Дефекты металлургического происхождения на фланце в зоне сварного соединения в виде вскрытых пор при токарной подготовке перед сваркой

Такие и другие подобные поверхностные дефекты в местах нанесения покрытий существенно затрудняли процесс создания сплошного защитного покрытия. В случае изменения микрорельефа подложки (как следствие поверхностного дефекта) в момент соприкосновения реактивной струи газового носителя и твердых частиц с подложкой создавались различного вида «паразитные» вихри, которые коренным образом изменяли условия взаимодействия частиц с подложкой. Как правило, в месте углубления в поверхности подложки в виде кратера с отвесными стенками происходило отражение этой струи и в результате происходило ничтожно малое наращивание покрытия, а рядом – избыточное увеличение толщины. В результате небольшой дефект поверхности в виде кратера (Рисунок 6.6, С) в процессе напыления приводил к образованию подобного кратера, но в гораздо больших размерах (Рисунок 6.7). Поэтому проводились пробы по локальной зачистке дефектов и предварительному ручному нанесению покрытий на поврежденные участки. В случае образования на дефектных участках значительных утолщений покрытия (в отдельных случаях до 5 мм) производилась их зачистка ручным и механическим способами (Рисунок 6.8 и Рисунок 6.9).

На внутренних поверхностях секций райзера, прошедших механическую обработку, поверхностных дефектов обнаружено не было. В результате чего технологический процесс нанесения покрытий происходил устойчиво, а само покрытие имело однородный рельеф и практически одной толщины.

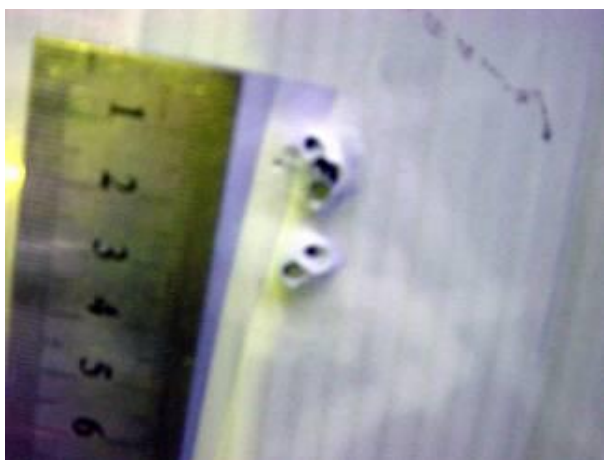


Рисунок 6.7.Образование напыленных кратеров на месте дефекта типа С

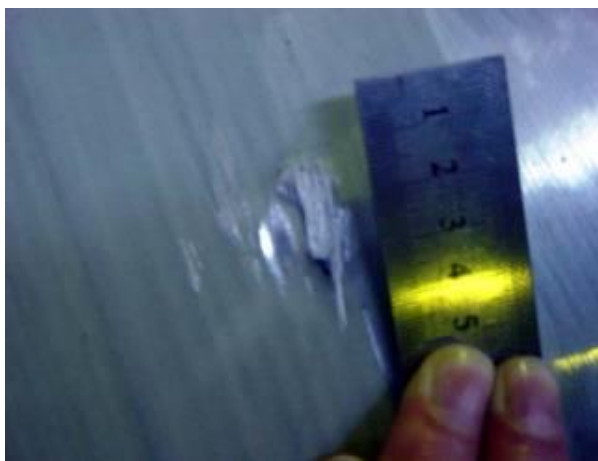


Рисунок 6.8. Зачистка напыленного кратера на месте дефекта типа С



Рисунок 6.9. Окончательный вид устраненного дефекта типа С

Дефекты типа А в процессе напыления увеличиваются незначительно (Рисунок 6.10) и устранение такого рода дефектов сводится к наращиванию толщины покрытия в зоне поражения.



Рисунок 6.10. Устранение дефекта типа А

Наружное защитное покрытие (Рисунок 6.11 и Рисунок 6.12) практически не имеет дефектов и надежно защищает конструкцию.

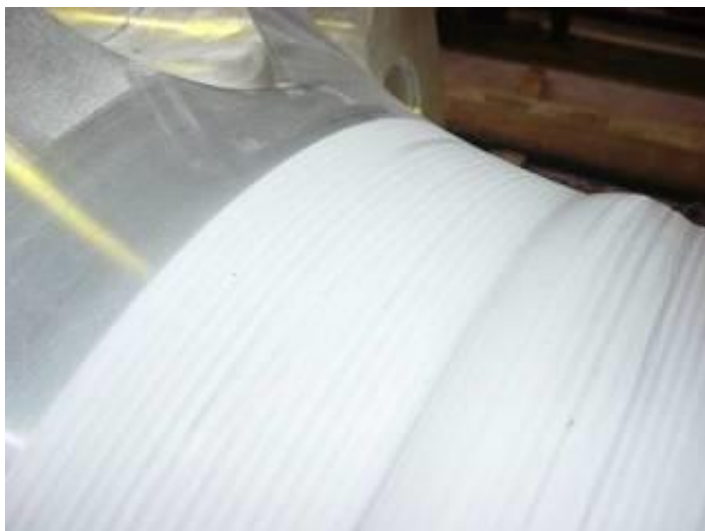


Рисунок 6.11. Внешний вид защитного покрытия на наружной стороне секции по сварному шву



Рисунок 6.12. Внешний вид защитного покрытия на внутренней стороне секции

6.4. Восстановление вкладышей подшипников скольжения двигателя газовой электростанции

В рамках договора с ООО «Элефант» были проведены работы по восстановлению поверхности вкладышей подшипников скольжения диаметром 250 мм используемых в двигателе внутреннего сгорания газовой электростанции мощностью 4000 кВт. В качестве примера (Рисунок 6.13) представлен подшипник, требующий восстановления. Материал основы подшипника – сталь.



Рисунок 6.13. Подшипник скольжения, требующий восстановления

Требования:

- Материал покрытия – аналог AS1241, содержание олова 7%;
- Толщина покрытия после механической обработки – 0,4 мм;
- Микротвердость – не менее 50 HV;
- Адгезионная прочность – не менее 30 МПа.

В качестве напыляемого материала покрытия выбран порошок состава Al-9%Sn-3%Zn (С9). Температура двухфазного потока составляет 450 С. Расстояние от среза сопла 10 мм. Толщина напыленного слоя от 0,6 до 0,7 мм (Рисунок 6.14).



Рисунок 6.14. Вкладыши подшипника в оснастке после напыления

Напыление производилось при тех же технологических режимах, которые указаны разделе 6.2.

Толщина покрытия после механической обработки составляет 0,4 мм. Для этого проводилась механическая обработка (Рисунок 6.15).



Рисунок 6.15. Процесс механической обработки

Была изготовлена партия в количестве 30 комплектов, она передана заказчику для использования непосредственно в двигателях внутреннего сгорания (Рисунок 6.16).



Рисунок 6.16. Подшипники после механической обработки

Кроме того, непосредственно на эксплуатирующем предприятии были восстановлены 3 комплекта крупногабаритных рабочих подшипников с

использованием композиционной системы порошка $Al-Sn+Al_2O_3$, по разработанной при выполнении работы технологии [152].

6.5. Нанесение промежуточного слоя для повышения адгезионной прочности соединяемых листов биметалла титан – сталь сваркой взрывом

Результаты разработки базовой технологии нанесения функциональных покрытий методом ХГДН на основе сплавов алюминия, отраженные в работе, позволяют выполнять работы по нанесению покрытий на основе других материалов. Например, при выполнении договора по договору от 15.10.08 №1355-491/08/ДЗ-2056/0038/225-2008 этапа № 2 в рамках государственного контракта от 01.09.2008 ГК 02.523.12.3021 с Минобрнауки были выполнены экспериментальные работы, направленные на повышение адгезионной прочности между соединяемыми листами сваркой взрывом при производстве биметалла сталь - титан. Был предложен способ нанесения методом ХГДН промежуточного слоя повышающего адгезионную прочность соединения. Для определения оптимального химического состава промежуточного слоя проводили предварительное напыление на образцы размером 100x100 мм. для лабораторных испытаний. В качестве материала покрытия был опробован ряд материалов, а именно, Al, Zn, Cu, Ni и сплавы на их основе. В результате исследования адгезионной прочности соединяемых пластин сваркой взрывом был определен наиболее перспективный сплав на основе никеля.

Получение биметаллического листа размером 1000x400 мм осуществлялось непосредственно на производственной площадке ОАО «Уралхиммаш».

В качестве стальной пластины используется лист толщиной 20 мм марки Х18Н10Т. В качестве титановой пластины используется лист толщиной 8 мм марки ВТ1-0. В качестве материала промежуточного слоя применяется никель, который напыляется методом ХГДН на поверхность стальной пластины. Способ получения биметалла был разделено на несколько этапов.

На первом этапе происходит обезжиривание поверхности стальной пластины, затем на втором этапе осуществляют абразивную обработку поверхности.

На третьем этапе происходит напыление Ni толщиной 30-40 мкм методом ХГДН при скоростях двухфазного потока 450 м/с и температурой частиц, не превышающей 100°C, расстояние от среза сопла 10-15 мм, расход порошка 0,7 г/с. Адгезия слоя никеля к стальной пластине 36-41 МПа.

На четвертом этапе производится процесс соединения пластин методом сварки взрывом.

На предложенный способ получения получен патент РФ [153].

6.6. Напыление многослойных покрытий на постоянные магниты

Пример реализации метода ХГДН для получения антикоррозионных покрытий на постоянные спеченные магниты из $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$ и NdFeB .

Требования к покрытию:

- В качестве напыляемых антикоррозионных материалов должны использоваться алюминий, цинк и олово в виде порошков дисперсностью не более 50 мкм;
- В качестве подложки для напыления должны использоваться постоянные спеченные магниты из $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$ и NdFeB ;
- Количество слоев антикоррозионного материала в многослойном покрытии должно быть от 2 до 5;
- Толщина многослойных антикоррозионных покрытий должна быть не более 100 мкм. Толщина контролируется микрометром по ГОСТ 6507;
- Нанесенные на поверхность постоянных магнитов покрытия должны обеспечивать их антикоррозионную защиту при эксплуатации в диапазоне температур от минус 60°C до 350°C.

Нанесение антикоррозионных покрытий с учетом полученных экспериментальных данных по температурно-скоростным параметрам процесса

проводилось на установке холодного газодинамического напыления. Были изготовлены образцы с покрытиями из алюминия, свинца, цинка, а также образец с двухслойным алюминиево-цинковым покрытием (Рисунок 6.17).

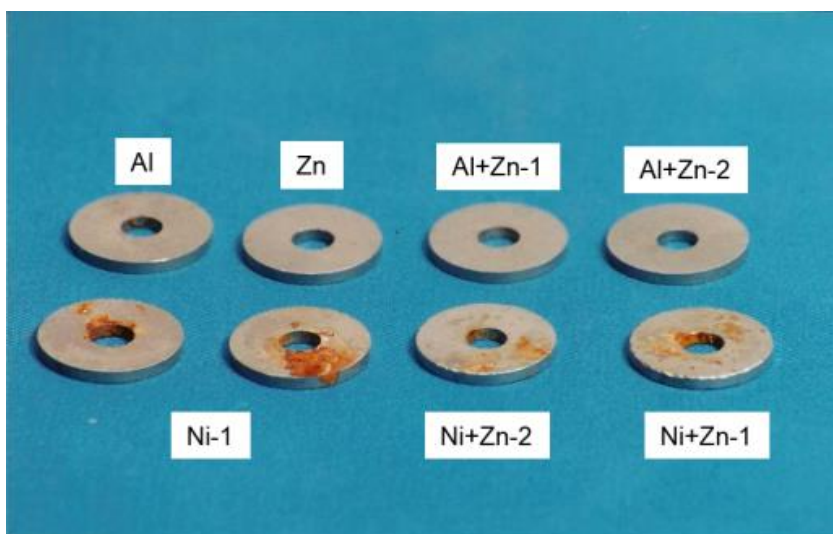


Рисунок 6.17 Внешний вид образцов после 198 часов испытаний

Затем были проведены ускоренные коррозионные испытания магнитов с антикоррозионным покрытием по методике с периодическим погружением (один раз в сутки на час) в 3%-ный раствор NaCl при комнатной температуре и нормальном атмосферном давлении с последующей выдержкой образцов над этим раствором в эксикаторе объемом 10 литров.

На образцах с покрытием из свинца по истечении 48 часов испытаний были обнаружены продукты сплошной коррозии магнитного сплава на торцевых стенках и кромках образца до 25% от общей площади образца. В продуктах коррозии содержится много железа в виде ржавчины, Fe_2O_3 и $Fe(OH)_3$. Образцы были сняты с испытаний.

На образцах с покрытием из цинка по истечении 168 часов испытаний были обнаружены продукты сплошной коррозии цинкового покрытия в виде белого порошкообразного налета ZnO и $Zn(OH)_2$. Явных продуктов коррозии магнитного сплава не наблюдалось. По истечении 264 часов испытаний был обнаружен белый порошкообразный налет продуктов коррозии цинка по всей поверхности цинкового покрытия. При пятикратном увеличении в местах пор в микроуглублениях наблюдались продукты коррозии в виде серо-синих точек

(предположительно соединения Nd), а также микроскопических очагов коррозии, содержащих Fe.

На образцах с покрытием из алюминия по истечении 168 часов испытаний было обнаружено оголение поверхности магнита по краям образца, а также продукты коррозии алюминиевого покрытия по всей поверхности в виде порошкообразного белого налета Al_2O_3 и $Al(OH)_3$. Явных продуктов коррозии магнитного сплава не наблюдалось. По истечении 264 часов испытаний были обнаружены небольшие очаги коррозии (ржавчина) по торцевым стенкам образца, оголение поверхности сплава по кромкам образца и белый порошкообразный налет Al_2O_3 и $Al(OH)Cl_2$.

На образцах с двухслойным покрытием из цинка и алюминия по истечении 168 часов испытаний были обнаружены продукты сплошной коррозии цинка в виде белого порошкообразного налета ZnO и $Zn(OH)_2$. Явных продуктов коррозии магнитного сплава не наблюдалось. По истечении 264 часов испытаний был обнаружен белый порошкообразный налет продуктов коррозии цинка. При пятикратном увеличении наблюдалось небольшое количество серо-синих и ржавых точечных очагов коррозии.

Полученные результаты позволили судить о защитных свойствах различных металлических покрытий по отношению к магнитному сплаву NdFeB.

В гальванопаре NdFeB – Pb свинец является катодом и не защищает магнитный сплав от коррозии. При наличии пор и нарушении сплошности покрытия свинец способствует коррозии магнита. В качестве защитного покрытия для редкоземельных магнитов свинец не рекомендуется.

Цинковое покрытие имеет более отрицательный потенциал по отношению к магниту и защищает его электрохимически даже при существовании пор или нарушении сплошности покрытия. Защитные свойства зависят от толщины покрытия. Для улучшения свойств цинкового покрытия, увеличения срока службы, надежности и долговечности магнитов необходима его дополнительная защита путем нанесения полимерных или лакокрасочных пленок.

Алюминиевое покрытие в коррозионной гальванопаре является анодным. Алюминий обеспечивает электрохимическую защиту магнита от коррозии. Алюминиевое покрытие несколько уступает цинковому по защитным свойствам, которые зависят от толщины покрытия и пористости.

Установлено, что двухслойное алюминиево-цинковое покрытие обеспечивает надежную электрохимическую защиту магнитного сплава от коррозии, которое значительно превосходит все однослойные варианты. Этот вариант был рекомендован для практического применения.

На процесс нанесения покрытий разработан Руководящий документ [154].

6.7. Производство анодов для получения высокочистого никеля и кобальта

На основе экспериментальных данных разработан также метод ХГДН для соединения разнородных материалов без применения традиционных методов сварки или пайки. Соединяемые разнородные несплавляемые материалы свинцовый лист (толщина 5 мм, масса 80 кг) – медная штанга (Рисунок 6.18).



Рисунок 6.18 Пластина свинцового анода, соединенная методом ХГДН с медной штангой

Требование: обеспечить прочное соединение лист – штанга. При технологическом процессе осаждения металлов механические нагрузки на

конструкцию практически отсутствуют. Однако механические нагрузки, которые испытывает конструкция при транспортировке и монтаже, весьма велики.

Для обеспечения прочноплотного соединения в качестве напыляемого материала использовался порошок свинца.

В процессе напыления температура двухфазного потока составляла 120°С, расстояние от среза сопла 5-15 мм, расход порошка 1,2 г/с.

Было изготовлено 2 образца, которые были переданы заказчику и успешно прошли испытания непосредственно на предприятии «Норильский никель».

Выводы по Главе 6

Таким образом, спектр практической реализации результатов работы весьма разнообразен и не ограничивается приведенными примерами. Получены также положительные результаты при восстановлении и ремонте: соединительной и запорной арматуры (шаровые краны газопроводов); строительной техники (восстановление посадочных поверхностей подшипников качения крышки демпфера бульдозера Komatsu D65 – EX15), ремонте головки блока цилиндров двигателя A01M-03 передвижной установки АСТ-4А, ремонте радиатора системы охлаждения двигателя Komatsu SAA6D1102E2 экскаватора РС-200. Кроме того, данные, полученные при разработке композиционных порошков методами механосинтеза, позволяют применять новые материалы для выполнения весьма актуальных задач в области аддитивных технологий.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработанная базовая технология получения функциональных покрытий методом ХГДН с использованием композиционных порошков, позволяет выполнять широкий спектр задач, как для получения новых изделий, так и для проведения ремонтно-восстановительных работ различных узлов машиностроительной техники. Кроме того, разработанная и освоенная технология получения композиционных порошков весьма перспективна для выполнения актуальных задач в области аддитивных технологий.

Результатом проведенных исследований, представленных в диссертационной работе служат следующие результаты, которые соответствуют поставленной цели и задачам.

1. В результате экспериментальных исследований был обоснован выбор матричного материала сплава системы Al–Sn, оптимизирован его химический состав за счет введения цинка в качестве пластификатора для нанесения покрытий методом ХГДН, а в качестве армирующей компоненты для получения композиционных порошков определен Al_2O_3 .
2. Изучены особенности получения армированных композиционных порошковых материалов системы «металл-неметалл» и разработана базовая технологии получения порошков с помощью механосинтеза на примере системы Al-Sn+ Al_2O_3 .
3. Установлены оптимальные скорость и температура гетерофазного потока обеспечивающие возможность получения практически беспористых покрытий, которые составляют - 600 м/с и 450°C соответственно.
4. Обоснована необходимость создания функционально-градиентных покрытий с регулируемой твердостью по толщине для обеспечения высокой адгезионной прочности и высокой микротвердости на периферийных слоях покрытия с использованием специально разработанного модуля с программируемой системой дозаторов.

5. Установлено, что наибольшей адгезионной прочностью 60 МПа обладает покрытие состава Al-9%Sn-3%Zn из порошка, полученного методом эжекторного распыления из сплава.
6. Установлено, что покрытие, полученное из композиционного порошка С9И70 (состава Al-9%Sn-3%Zn+70%Al₂O₃) обладает наибольшей микротвердостью, которая достигает 240 НV.
7. Определено влияние структуры на микротвердость и адгезионную прочность в зависимости от условий формирования композиционного покрытия. Показано, при использовании механической смеси порошков матричной и армирующей составляющих (МС5, МС10, МС20, МС40) структура покрытия более пористая до 18% (средний размер пор 28 мкм) с образованием агломератов из частиц корунда в отличие от покрытий, полученных из композиционных порошков.
8. В соответствии с Р 50-54-62-88 было установлено, что использование композиционного порошка на основе системы Al-Sn, армированного Al₂O₃, позволяет повысить удельное давление на покрытие более чем в 5 раз по сравнению с гомогенным покрытием до 25 МПа и снизить интенсивность изнашивания.
9. Результаты работы нашли практическое применение: разработанная технология предложена как основная для производства вкладышей ДВС; получены положительные результаты при нанесении промежуточного (адгезионного слоя) при получении биметаллов; а так же при проведении ремонтно-восстановительных работ узлов и элементов различных изделий машиностроения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Буше Н. А. Подшипники из алюминиевых сплавов. М.: Транспорт, 1974.
2. Борисов Ю. С., Харламов Ю. А., Сидоренко С. Л., Ардамовская Е. Н. Газотермические покрытия из порошковых материалов. Киев: Наукова думка, 1987. 544 с.
3. Ройх И. Л., Колтунова Л. Н., Федосов С. Н. Нанесение защитных покрытий в вакууме. М.: Машиностроение, 1976. 369 с.
4. Хасуи А., Моригаки О. Наплавка и напыление. М.: Машиностроение, 1985.
5. Алхимов А. П., Клинков С. В., Косарев В. Ф. Исследование теплообмена сверхзвуковой плоской струи с преградой в условиях газодинамического напыления // Теплофизика и аэромеханика. 2000. Т. 7. № 3. С. 389–396.
6. Алхимов А. П., Клинков С. В., Косарев В. Ф., Фомин В. М. Холодное газодинамическое напыление. Новосибирск: Физматлит, 2010. 536 с.
7. Xian-Jin Ning, Jae-Hoon Jang, Hyung-Jun Kim, Chang-Jiu L., Changhee Lee. Cold spraying of Al–Sn binary alloy: Coating characteristics and particle bonding features // Surface & Coatings Technology. 2008. P. 1681–1687.
8. Lu Z.C., Zeng M.Q., Gao Y., Zhu M. Significant improvement of wear properties by creating micro/nanodual-scale structure in Al–Sn alloys // Wear. 2012. P. 469–478.
9. Марголин В. И. Основы нанотехнологии. СПб., 2004. 310 с.
10. Rohatgi P. Cast aluminum-matrix composites for automotive applications // JOM. 1991. April. N 43. Issue 4. P. 10–16.
11. Чернышова Т. А., Кобелева Л. И., Лемешева Т. В. Дисперсно наполненные композиционные материалы на базе антифрикционного силумина для узлов трения скольжения // Перспективные материалы. 2003. № 3. С. 69–75.
12. Чернышова Т. А., Кобелева Л. И. Композиционный материал антифрикционного назначения для работы в условиях ограниченной смазки. Патент № 2171307, 2001.

13. Михеев Р. С., Калашников И. Е., Кобелева Л. И., Чернышова Т. А. Разработка композиционных материалов системы Al-Ti-TiC. 2009. № 3. С. 85–90.
14. Клюев О. Ф., Каширин А. И., Шкодкин А. В. Технология газодинамического нанесения металлических покрытий // Сварщик. 2003. Т. 4. № 32. С. 25–27.
15. Сова А. А. Исследование процесса нанесения многокомпонентных покрытий методом холодного газодинамического напыления: Автореф. дисс. ... канд. техн. наук, 2009.
16. Агуреев Л. Е., Костиков В. И., Еремеева Ж. В., Савушкина С. В. Влияние оксидных микродобавок на характеристики дисперсноупрочненных порошковых материалов на основе алюминия // Технология легких сплавов. 2014. № 3. С. 59–66.
17. Курбаткина Е. И., Белов Н. А., Горшенков М. В. Структура и фазовый состав композиционных гранул на основе термостойкого алюминиевого сплава АЛТЭК с борсодержащим наполнителем // Известия вузов. Порошковая металлургия и функциональные покрытия. 2012. № 3. С. 33–36.
18. Ляхов Н. З., Панин В. Е., Дудина Д. В. и др. Разработка конструкционных материалов на основе нанокompозитных порошков // Физическая мезомеханика 6. 2003. Р. 63–76.
19. Витязь П. А., Ловшенко Ф. Г., Ловшенко Г. Ф. Наноструктурные механически легированные дисперсно-упрочненные материалы на основе металлов. Минск: Диатех, 2010. С. 127–150.
20. Каширин А. И. и др. Способ создания слоистых изделий объемной прерывистой формы. Патент № 2038399, 1993.
21. Фармаковский Б. В. и др. Способ получения износостойких функционально-градиентных-покрытий. Заявка на изобретение № 2013140669, 2013.

22. Горынин И. В. Размышления с оптимизмом. СПб.: Издательство политехнического университета, 2014.
23. Хинт И. А. Основы производства силикальцитных изделий. М.: Госстройиздат, 1962.
24. Хинт И. А. Об основных проблемах механической активации. Таллин: Препринт, 1977.
25. Сеппель Х. А., Кипнис Б. М. Семинар «Свойства, переработка и применение порошковых полимерных и олигомерных материалов» // Технология приготовления эпоксидных порошковых композиций на ударно-диспергирующих агрегатах. Л., 1976. С. 31–32.
26. Жорин В. А., Макарова И. Ф., Ген М. Я., Ениколопян Н. С.. Докл. АН СССР // Образование твердых растворов металлов при пластическом течении под высоким давлением. 1981. С. 405–408.
27. Неверов В. В., Житников П. П. Процессы образования соединений при пластической деформации двойных смесей металлов // ФФМ. 1990. Т. 70. № 11. С. 143–149.
28. Низкотемпературная плазма / Под ред. Пархоменко В. Д. и др. Новосибирск: Наука, 1991. Т. 4. 392 с.
29. Моссэ А. Л., Буров И. С. Обработка дисперсных материалов в плазменных реакторах. Минск: Наука и техника, 1980. 208 с.
30. Самохин А. В., Алексеев Н. В., Цветков Ю. В. Плазмохимические процессы создания нанодисперсных порошковых материалов // Химия высоких энергий. 2006. Т. 40. № 2. С. 120–126.
31. Шишковский И. В. Лазерный синтез функционально-градиентных мезоструктур и объемных изделий // М.: Физматлит, 2009. 424 с.
32. Орыщенко А. С., Кузнецов П. А., Бобырь В. В., Савин В. И., Терещенко А. В. Применение технологий селективного лазерного спекания и объемной лазерной наплавки для создания и восстановления деталей, используемых в машиностроении // Прогрессивные технологии и системы. 2013. Т. 2(46). № 1. С. 238–244.

33. Терещенко А. В., Бобырь В. В., Савин В. И. Исследование влияния параметров лазерного излучения на геометрию наплавляемого материала по технологии LENS // *Металлообработка*. 2012. № 1(67). С. 28–32.
34. Штерцер А. А., Злобин Б. С. Использование взрывных технологий для производства подшипников скольжения дизельных двигателей // *Известия Самарского научного центра Российской академии наук*. 2011. Т. 13. № 4–4. С. 1056–1060.
35. Ганигин С. Ю, Ибатуллин И. Д. Синтез твердосплавных материалов в технологическом процессе детонационного напыления // *Известия Самарского научного центра Российской академии наук*. 2013. Т. 15. № 4–2. С. 451–454.
36. Клинков С. В., Косарев В. Ф. Влияние активации поверхности на процесс газодинамического напыления // *Физическая мезомеханика*. 2006. Т. 6. № 3. С. 85–90.
37. Аввакумов М. Е., Руфицкий М. В. Надежность и качество покрытия при использовании метода «холодного» газодинамического напыления // *Труды Международного симпозиума «Надежность и качество»*. 2013. Т. 2.
38. Винокуров Г. Г., Суздалов И. И., Стручков Н. Ф. Исследование структуры и свойств газотермических покрытий из порошковых проволок // *Вестник Северо-Восточного федерального университета им. М. К. Аммосова*. 2005. Т. 2. № 3. С. 57–61.
39. Лебедев Д. И., Винокуров Г. Г., Стручков Н. Ф. Исследование контактной поверхности износостойких газотермических покрытий с ультрадисперсными добавками при трении скольжения со стальным контртелом // *Современные наукоемкие технологии*. 2014. № 1. С. 42–45.
40. Никитин М. М. *Технология и оборудование вакуумного напыления*. М.: *Металлургия*, 1992.
41. Гришко Л. Б., Елинсон В. М., Иванковский Г. Ф., Слепцов В. В. *Электронная промышленность*. 1986. Вып. 4 (152).

42. Кривобоков В. П., Сочугов Н. С., Соловьев А. А. Плазменные покрытия (свойства и применение). Томск: Издательство Томского политехнического университета, 2011.
43. Арутюнов В. С., Крылов О. В. Окислительная конверсия метана // Успехи химии. 2005. Т. 74. № 12. С. 1216–1243.
44. Корабельников А. В., Куранов А. Л., Рыжиков С. С. Химическая регенерация тепла и преобразования топлива в энергетических установках URL: www.chemphys.edu.ru/pdf/2006-10-12-002.pdf
45. Ярмоленко М. А., Рогачев А. А., Рогачев А. В., Тапальский Д. В., Горбачев Д. Л., Лучников П. А. Плазмохимический синтез нанокпозиционных биосовместимых покрытий, обладающих антибактериальным пролонгированным действием // Наноматериалы и наноструктуры – XXI век. 2011. Т. 2. № 1. С. 26–35.
46. Рябчиков Б. Е. Современные методы подготовки воды для промышленного и бытового использования // ДеЛи принт. 2004. 328 с.
47. Беликов С. Е. Водоподготовка: Справочник для профессионалов. М.: Аква-Терм, 2007. 240 с.
48. Андреев В. С. Электроуправляемая сорбция в гетерогенных системах. Возможности и перспективы электрокондиционирования при децентрализованной водоподготовке // Доклады межрегиональной научно-технической конференции: «Новейшие инженерные разработки в области водоподготовки и водоотведения», 2006.
49. Андреев В. С., Заболотский В. И., Борисенко Г. С. Практика использования электрокондиционеров при децентрализованной обработке питьевой воды и стоков // Электроуправляемая сорбция в практике водоочистки. Доклады межрегиональной научно-технической конференции «Новейшие инженерные разработки в области водоподготовки и водоотведения», 2006.
50. Кекало И. Б., Столяров В. Л., Цветков В. Ю. Релаксационные процессы и магнитные свойства высококобальтовых сплавов с нулевой

- магнитострикцией // Аморфные металлические материалы. 1984. С. 119–126.
51. Шадров В. Г., Немцевич Л. В. Нанокристаллические магнитные материалы // Физика и химия обработки материалов. 2002. № 5. С. 50–61.
 52. Казаков С. С., Матвеев Ю. И. Разработка производственной технологии лазерного упрочнения поршневых колец в судоремонтном производстве // Вестник НГИЭИ. 2011. Т. 2. № 5(6). С. 55–60.
 53. Тескер Е. И., Пермякова А. В., Тараненко В. Ю. Лазерные методы упрочнения деталей, работающих в условиях многофакторного воздействия // Известия Волгоградского государственного технического университета. 2012. Т. 9. № 6. С. 183–186.
 54. Арзамасов Б. Н., Сидорин И. И., Косолапов Г. Ф. и др. Материаловедение: Учебник для высших технических учебных заведений. 2-е изд., испр. и доп. М.: Машиностроение, 1986. 384 с.
 55. Кречмер Э. Напыление металлов и пластмасс. М., 1966.
 56. Клубникин В. С. О достижениях в термическом напылении покрытий // Труды 6-й Международной конференции «Пленки и покрытия–2001». 2001. С. 15–21.
 57. Иванов В. Г., Никитин В. П., Яцечко А. М. Термическая стойкость теплозащитных керамических покрытий на образцах из алюминиевых сплавов // Сварочное производство. 1990. № 12. С. 11–12.
 58. Коровин А. Я., Хромов В. Н. Оборудование для сверхзвукового газопламенного напыления покрытий // Сборник научных трудов РГАЗУ. 2000. С. 183–186.
 59. Панин С. В., Алхимов А. П., Клименов В. А. Исследование влияния адгезионной прочности на характер развития пластической деформации на мезоуровне композиций с газодинамически напыленными покрытиями // Физическая мезомеханика. 2000. Т. 3. № 4. С. 97–106.

60. Кузнецов Ю. А. Ресурсосберегающие технологии газотермического напыления при ремонте машин АПК // Вестник ОрелГАУ. Ремонт и организация технического сервиса. 2009. С. 13–15.
61. Папырин А. Н., Алхимов А. П., Косарев В. Ф. Газодинамическое напыление. Экспериментальное исследование процесса напыления // ПМТФ. 1998. Т. 39. № 2. С. 182–188.
62. Клинков С. В., Косарев В. Ф., Алхимов А. П., Нестерович Н. И. Газодинамическое напыление. Состояние и перспективы // Труды 5-й Междунар. конф. «Пленки и покрытия'98». 1998. С. 20–25.
63. Алхимов А. П., Гулидов А. И., Косарев В. Ф., Нестерович Н. И. Особенности деформирования микрочастиц при ударе о твердую преграду // Прикладная механика и техническая физика. 2000. Т. 41. № 1. С. 204–209.
64. Алхимов А. П., Демчук А. Ф., Косарев В. Ф., Спесивцев В. П. Установка для напыления на внутреннюю поверхность труб // Труды 5-й Междунар. конф. «Пленки и покрытия'98». 1998. С. 117–120.
65. Клинков С. В., Алхимов А. П., Косарев В. Ф. Натекание сверхзвуковой струи прямоугольного сечения на плоскую преграду // Теплофизика и аэромеханика. 2000.
66. Алхимов А. П., Клинков С. В., Косарев В. Ф. Исследование взаимодействия двухфазного потока с нагретой поверхностью // Теплофизика и аэромеханика. 1998. Т. 5. № 1. С. 67–73.
67. Чернышев Д. Л. Применение метода газодинамического напыления для получения композиционных материалов // Труды Международного симпозиума «Надежность и качество». 2012. Т. 2.
68. Клименов В. А., Панин С. В., Безбородов В. П. Исследование характера деформации на мезомасштабном уровне и разрушения композиции «газотермическое покрытие – основа» при растяжении // Физическая мезомеханика. 1999. Т. 2. № 1–2. С. 141–156.

69. Костиков В. И., Агуреев Л. Е., Еремеева Ж. В. Разработка упрочненных наночастицами алюмокомпозитов для ракетно-космической техники // Известия вузов. Порошковая металлургия и функциональные покрытия. 2014. № 1. С. 35–38.
70. Михеев Р. С., Чернышова Т. А. Дискретно армированные композиционные материалы системы Al–TiC (обзор) // Заготовительные производства в машиностроении. 2008. № 11. С. 44–53.
71. Геращенко Д. А., Фармаковский Б. В., Васильев А. Ф., Горынин И. В. Способ получения наноструктурированных функционально-градиентных износостойких покрытий. Патент РФ № 2354749. 2009.
72. Алхимов А. П., Косарев В. Ф., Папырин А. П. Экспериментальное исследование деформации и соударения микрочастиц с преградой при высокоскоростном ударе // ПМиТФ. 2000.
73. Клинков С. В. Управление эрозионно-адгезионным переходом при ХГН. Новосибирск: Автореф. дисс. ... д-ра физ.-мат. наук, 2013.
74. Витман Ф. Ф., Златин Н. А. О процессе соударения деформируемых тел и его моделировании // Техн. физика. 1963. № 8.
75. Алхимов А. П. и др. Способ получения покрытий. Патент № 1618778, 1991.
76. Тушинский Л. И., Алхимов А. П., Косарев В. Ф., Плохов А. В., Мочалина Н. С. Структура и свойства алюминиевых покрытий, нанесенных методом холодного газодинамического напыления // Теплофизика и аэромеханика. 2006. Т. 13. № 1. С. 141–145.
77. Д.А. Геращенко, Б.В. Фармаковский, А.Ф. Васильев, А.Ч. Машек. Исследование температуры потока в процессе холодного газодинамического напыления функциональных покрытий // Вопросы материаловедения. 2014. № 2(77). С. 87–96.
78. Новые материалы и технологии. Теория и практика упрочнения материалов в экстремальных процессах / Под ред. Жукова М. Ф. Новосибирск: Наука, 1992. 196 с.

79. Папырин А. Н. Новые материалы и технологии: Теория и практика упрочнения материалов в экстремальных процессах. Новосибирск: Наука, 1992. 199 с.
80. Алхимов А. П., Клинков С. В., Косарев В. Ф., Нестерович Н. И. Тез. докл. Междунар. рабочее совещание «Генераторы термической плазмы и технологии» (приуроченное к 80-летию академика РАН М. Ф. Жукова // Ударное взаимодействие микрочастиц с поверхностью и формирование покрытий. Новосибирск. 1997. 42 с.
81. Фридляндер И. Н., Квасов Ф. И. Промышленные алюминиевые сплавы. М.: Металлургия, 1984. 528 с.
82. Миронов А. Е., Котова Е. Г. Разработка новых марок литейных алюминиевых антифрикционных сплавов для замены бронз в узлах трения // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2011. Т. 13. № 4(3). С. 1136–1140.
83. Лахтин Ю. М. Metalловедение и термическая обработка металлов. М.: Машиностроение, 1983. 360 с.
84. Колачев Б. А., Елагин В. И., Ливанов В. А. Metalловедение и термическая обработка цветных металлов и сплавов. 3-е изд., перераб. и доп. М.: МИСиС, 1999. 416 с.
85. Хрущов М. М. Современные теории антифрикционности подшипниковых сплавов // Трение и износ в машинах. 1950. С. 52–73.
86. Буше Н. А. Исследования антифрикционных сплавов подшипников подвижного состава // Труды ЦНИИ. 1956. № 112. С. 175.
87. Андрусенко О. Е., Матвеев Ю. И. Влияние аккумуляции теплоты в подшипниковом узле на прихват и усталостное разрушение подшипников скольжения // Вестник АГТУ Сер.: Морская техника и технология. 2009. С. 47–49.
88. Андрусенко О. Е., Матвеев Ю. И. Требования к материалам антифрикционного слоя, используемым при восстановлении подшипников

- скольжения коленчатых валов // Вестник АГТУ Сер.: Морская техника и технология. 2009. С. 50–55.
89. Удалов Ю. П., Германский А. М., и др. Технология неорганических порошковых материалов и покрытий функционального назначения. СПб.: Янус, 2001. 428 с.
90. Рудской А. И., Петрович С. Ю., Черепанов В. П., Гопиенко В. Г., Иваненко В. В. Быстрозакаленные материалы и покрытия. Материалы 6-й Всероссийской с международным участием научно-технической конференции в МАТИ – РГТУ им. К.Э. Циолковского // Производство и свойства быстроохлажденных порошковых сплавов на основе алюминия. М., 2007.
91. Орыщенко А. С., Загашвили Ю. В., Кулик В. И. Производство изделий из современных композиционных материалов, модифицированных наноразмерными компонентами // Инновации. 2007. № 12. С. 94–98.
92. Орыщенко А. С., Рыбин В. В., Слепнев В. Н., Шекалов В. И., Черниговский А. А. Исследование триботехнических и физико-механических характеристик антифрикционных материалов на основе бронзофторопласта, модифицированных фуллероидными наночастицами // Вопросы материаловедения. 2003. № 3. С. 65–70.
93. Любин Д. Справочник по композиционным материалам. М.: Машиностроение, 1988. 581 с.
94. Михеев Р. С., Коберник Н. В., Чернышов Г. Г., Чернышова Т. А. Влияние импульсного лазерного излучения на структуру и свойства алюмоматричных композиционных материалов, армированных частицами SiC // Физика и химия обработки материалов. 2006. № 6. С. 17–22.
95. Ксенович И. П. Триботехника и проблемы прикладной механики наземных мобильных машин // Приводная техника. 2003. № 5. С. 2–5.
96. Гаркунов Д. Н. Триботехника (конструирование, изготовление и эксплуатация машин). 5-е изд. Москва: МСХА, 2002. 632 с.
97. Черногоров Е. Подшипники скольжения. Челябинск, 2013.

98. Hashing F., Portillo F., Wunderlin R., Mehrabian R. Composites of aluminum alloys; fabrication and wear behaviour // *J.Mater.Sci.*, N 17-2, 1982. P. 477–498.
99. Sannino A. P., Rack H. J. Dry sliding wear of discontinuously reinforced aluminium composites: review and discussion // *Wear*. N 89. 1995. P. 1–19.
100. Mondol D. P., Das S., Jha A. K., Yegneswaren A. H. Abrasive wear of Al alloy–Al₂O₃ particle composite: a study on the combined effect of load and size abrasive // *Wear*. 1998. N 233. P. 131–138.
101. Ласковнев А. П. Разработка методов получения композиционных материалов с использованием порошков алюминия и его сплавов // 50 лет порошковой металлургии Беларуси. История, достижения, перспективы. 2010. С. 423–436.
102. Pramila Bai B.N., Ramasesh B.S., Surappa M.K. Dry sliding wear of A356–Al–SiC composites // *Wear*. 1992. N 2. P. 295–304.
103. Каширин АИ и др. Способ получения покрытий. Патент № 2183695, 2002.
104. Каширин АИ и др. Способ получения покрытий. Патент № 2109842, 1997.
105. Hodder K. J., Izadi H., McDonald A. G., Gerlich A. P. Fabrication of aluminum–alumina metal matrix composites via cold gas dynamic spraying at low pressure followed by friction stir processing // *Materials Science & Engineering*. 2012. P. 114–121.
106. Yong Lee, Se Hun Jung, Soo Yong Lee, Young Ho You, Kyung Hyun Ko. Correlation between Al₂O₃ particles and interface of Al–Al₂O₃ coatings by cold spray // *Applied Surface Science*. N 205. P. 1891–1898.
107. Прибытков Г. А., Храмогин М. Н., Коржова В. В. СВС композиционные порошки карбид титана – связки из сплавов на основе железа для наплавки износостойких покрытий // *Физическая мезомеханика*. 2006. С. 185–188.
108. Гаврилин С. С. и др. Способ получения шихты для изготовления керметных стержней твэлов ядерного реактора. Патент № 2467413, 2012.
109. Лекарев Ю. Г. и др. Композиционный порошковый материал для газотермического напыления и способ его получения. Патент № 1700949, 2000.

110. Ostwald W. Lehrbuch der allgemeinen Chemie. Leipzig, 1891.
111. Князев А. В., Кузнецова Н. Ю. Электронное учебное пособие. Н. Новгород: Нижегородский государственный университет им. Н. И. Лобачевского // Российское образование. 2010. 102 с. URL: http://window.edu.ru/catalog/pdf2txt/878/79878/60271?p_page=1
112. Бутягин П. Ю. Проблемы и перспективы развития механохимии // Успехи химии. 1994. Т. 63. № 12. С. 1031–1043.
113. Болдырев В. В. Механохимия и механическая активация твердых веществ // Успехи химии. 2006. Т. 75. № 3. С. 203–216.
114. Komatsu W. Proc. 5th Intern Symp. Reactivity of Solids / Ed by G. M. Schwab, Elsevier, Amsterdam. Munich, 1964.
115. Bridgman P.W. Rev. Modern. Phys. 1946. 18. 1.
116. Heegn H.. Proc. of the First Intern. Conference on Mechanochemistry. Kocise, 1989.
117. Uraakaev F. Kh., Boldyrev V.V. Powder Technology. 2000. Vol. 107. No. 2. P. 93–107.
118. Григоров И. Г. и др. Композиционный нанопорошок и способ его получения. Патент № 2493938.
119. Коркина М. А. и др. Получение композиционного порошкового материала системы металл – керамика износостойкого класса. Патент № 2460815, 2010.
120. Левашов Е. А. и др. Композиционные электродные материалы для получения дисперсно-упрочненных наночастицами покрытий. Патент № 2371520.
121. Коберник Н. В., Чернышов Г. Г., Михеев Р. С. Аргодуговая наплавка износостойких композиционных покрытий // Физика и химия обработки материалов. 2009. С. 51–55.
122. Мироненко В. Н. и др. Способ получения порошкового композиционного материала. Патент № 2394928, 2009.

123. Мироненко В. Н. и др. Порошковый композиционный материал и способ его получения. Патент № 2353689, 2006.
124. Spencer K., Fabijanic D. M., Zhang M.-X. The use of Al–Al₂O₃ cold spray coatings to improve the surface properties of magnesium alloys // *Surface & Coatings Technology*. 2009. P. 336–344.
125. Shockley J. M., Strauss H. W., Chromik R. R., Brodusch N., Gauvin R., Irissou E., Legoux J.-G. In situ tribometry of cold-sprayed Al–Al₂O₃ composite coatings // *Surface & Coatings Technology*. 2013. P. 350–356.
126. Roknia M. R., Widenera C. A., Nardib A.T., Champagne V. K. Nano crystalline high energy milled 5083 Al powder deposited using cold spray // *Applied Surface Science*. 2014. P. 797–804.
127. Eric Irissou, Jean-Gabriel Legoux, Bernard Arsenault, and Christian Moreau. Investigation of Al–Al₂O₃ Cold Spray Coating Formation and Properties // *Journal of Thermal Spray Technology*. 2007. No. 16. P. 661–668.
128. R. Arrabal, A. Pardo, M.C. Merino, M. Mohedano, P. Casas, S. Merino. Al/SiC thermal spray coatings for corrosion protection of Mg–Al alloys in humid and saline environments // *Surface & Coatings Technology*. 2010. No. 204. P. 2767–2774.
129. Yandouzi M., Böttger A. J., Hendrix R.W.A., Brochu M., Richer P., Charest A., Jodoin B. Microstructure and mechanical properties of B₄C reinforced Al-based matrix composite coatings deposited by CGDS and PGDS processes // *Surface & Coatings Technology*. 2010. No. 205. P. 2234–2246.
130. Yongshan Tao, Tianying Xiong, Chao Sun, Huazi Jin, Hao Du, Tiefan Li. Effect of α -Al₂O₃ on the properties of cold sprayed Al/ α -Al₂O₃ composite coatings on AZ91D magnesium alloy // *Applied Surface Science*. 2009. No. 256. P. 261–266.
131. Шолкин С. Е., Юрков М. А. Создание управляемой наноструктуры в покрытии, полученном методами газотермического напыления // *Вопросы материаловедения*. 2010. № 2 (62). С. 68–74.

132. Геращенко Д. А., Юрков М. А., Васильев А. Ф. Сб. докладов международного научно-практического симпозиума «Наноструктурные функциональные покрытия для промышленности» в рамках Харьковской нанотехнологической ассамблеи // Износо- и коррозионно-стойкие наноструктурированные покрытия с регулируемой твердостью, получаемые методом сверхзвукового холодного газодинамического напыления. Харьков, 2007. Т. 1. С. 258–265.
133. Береговский В. В. и др. Многослойное износостойкое термостойкое покрытие. Патент № 2445403, 2012.
134. Табаков В. П. и др. Способ получения многослойного покрытия для режущего инструмента. Заявка на патент № 2013134597/02, 23.07.2013.
135. Девойно О. Г., Оковитый В. В. Композиционный порошок на основе диоксида циркония, частично стабилизированный церием // Наука и техника. № 6. С. 3–8.
136. Геращенко Д. А., Фармаковский Б. В. Износо-коррозионно-стойкий сплав на основе алюминия для наноструктурированных покрытий. Патент № 2413024, 2011.
137. Геращенко Д. А., Бурканова Е. Ю., Самоделкин Е. А., Маренников Н. В. Разработка технологических подходов получения наноструктурированных композиционных порошков методом сверхскоростного механосинтеза // Вопросы материаловедения. 2010. С. 64–67.
138. Геращенко Д. А., Шолкин С. Е., Юрков М. А. Технологии получения дисперсных материалов с использованием ударно-дезинтеграторного метода и функционально-градиентных покрытий методами сверхзвукового холодного газодинамического напыления и микроплазменного напыления // Материалы 10-й международной научно-практической конференции «Технологии ремонта, восстановления и упрочнения деталей машин, механизмов, оборудования, инструмента и технологической оснастки». 2008. С. 567–574.

139. Геращенко Д. А., Фармаковский Б. В., Самоделкин Е. А., Геращенко Е. Ю. Исследование адгезионной прочности композиционных армированных покрытий системы металл – неметалл, полученных методом холодного газодинамического напыления // Вопросы материаловедения. № 2(78), 2014. С. 103–117.
140. Технологический регламент (инструкция), на опытную партию порошков предварительно обработанных методом механоактивационного синтеза. 2009.
141. Геращенко Д. А., Фармаковский Б. В. Способ получения износостойкого композиционного наноструктурированного покрытия. Патент № 2439198С2, 2010.
142. Геращенко Д.А., Сомкова Е.А. Способ получения композитного порошка системы Al–Zn–Sn–Al₂O₃. Патент № 2434713, 2011.
143. Технология получения композиционных порошковых материалов для метода сверхзвукового ХГДН (№ 35.378.03.13.ТР от 18.10.2013 г.).
144. Компьютеризированная технология получения композиционных армированных порошковых материалов. № 35.378.02.14.ТИ от 25.06.2014 г.
145. Геращенко Д.А., Васильев А.Ф., Орыщенко А.С., Лашков В.А. Исследование температуры потока в процессе сверхзвукового «холодного» газодинамического напыления функциональных покрытий // Порошковая металлургия: инженерия поверхности, новые порошковые композиционные материалы. Сварка., Т. 2, апрель 2015. С. 125-139.
146. Геращенко Д. А. Сб. тезисов докладов 13 международной научно-практической конференции молодых ученых и специалистов «Новые материалы и технологии», посвященной 75-летию ФГУП ЦНИИ КМ «Прометей» // Исследование адгезионной прочности композиционных покрытий системы «металл – неметалл», полученных методом холодного газодинамического напыления. СПб., 18–20 июня 2014 г. С. 78.

147. Геращенко Д. А. Сборник тезисов VI конференции молодых специалистов «Перспективы развития металлургических технологий». ФГУП «ЦНИИ ЧерМет им. И. П. Бардина» // Результаты исследования адгезионной прочности композиционных покрытий системы «металл – неметалл» на стальном основании, полученных методом холодного газодинамического напыления. М., 2015. 14 с.
148. Геращенко Д. А., Васильев А. Ф. Материалы Двадцать восьмой международной конференции «Композиционные материалы в промышленности» // Износостойкие покрытия с регулируемой твердостью, получаемые методом сверхзвукового холодного газодинамического напыления с использованием армированных нанодисперсных частиц. Ялта, 2008. 482 с.
149. Технологический регламент «Технологический процесс получения функционально-градиентных покрытий с регулируемой твердостью по толщине покрытия». РД5.УЕИА.3473-2008.
150. Орыщенко А. С., Геращенко Д. А. Алюмоматричные функциональные покрытия с высокой микротвердостью, полученные из композиционных порошков системы Al-Sn+Al₂O₃, методом холодного газодинамического напыления // Вопросы материаловедения. 2015. № 3(83). С. 100-107.
151. Технологическая инструкция «Процесс получения функциональных покрытий методом сверхзвукового холодного газодинамического напыления (ХГДН)».
152. Нанесение покрытий. Технологическая инструкция РД5.УЕИА.3653-2014.
153. Геращенко Д. А. и др. Способ получения многослойного материала. Заявка №2013137303/2(056276) от 08.08.2013, Решение о выдаче патента на изобретение от 25.05.2015.
154. Технологическая инструкция «Процесс нанесения многослойных антикоррозионных покрытий на постоянные магниты методом сверхзвукового холодного газодинамического напыления». РД5.АЕИШ.3447-2007. 2007.

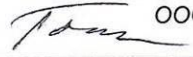
ООО «ЭЛЕФАНТ»
Россия, Санкт-Петербург, пр Лиговский д 158 литер А пом 1-Н

«УТВЕРЖДАЮ»

Генеральный директор

ООО «Элефант»

В.С. Тоестев



Исх. От 01.10.2014 №112



АКТ

внедрения результатов диссертационной работы Геращенко Д.А.
«Получение функционально-градиентных наноструктурированных износ- и
коррозионностойких покрытий методом сверхзвукового газодинамического
напыления для создания изделий транспортных систем» для изделий
машиностроения» на соискание ученой степени кандидата технических наук

Настоящий акт составлен о том, что на экспериментальном участке предприятия восстановлены коренные вкладыши подшипников двигателя внутреннего сгорания газовой электростанции мощностью 4000 кВт с нанесенным на них покрытием $Al-Sn+Al_2O_3$ разработанным Геращенко Д.А. в рамках диссертационной работы на соискание ученой степени кандидата технических наук. Покрытие наносилось методом «холодного» газодинамического напыления с использованием установки «Димет-421», оборудованного специально разработанной системой дозаторов.

Была восстановлена опытная партия комплектов вкладышей в количестве 6 шт.

Была произведена установка коренных подшипников на один двигатель.

Результаты исследования извлеченных вкладышей после 1500 часов работы показали, что износа вкладышей не наблюдается, но при этом имеет место повышенный износ шейки вала, что выдвигает дополнительные требования к повышению твердости контактной поверхности вала.

Технический директор



Д.С. Чупов

ПРИЛОЖЕНИЕ Б



АКТ

использования результатов диссертационной работы Герашенкова Д.А.
 «Создание функциональных покрытий с регулируемой микротвердостью методом
 сверхзвукового «холодного» газодинамического напыления с использованием
 композиционных порошков системы «металл-неметалл» для изделий
 машиностроения» на соискание ученой степени кандидата технических наук

Перспективными порошковыми материалами, разработанными Герашенковым Д.А.
 в ходе выполнения диссертационной работы являются композиционные порошки системы
 Ni-Cr-Mo-WC и Al-Sn+Al₂O₃, с помощью которых реально получение износостойких
 покрытий с помощью различных методов, в т.ч. для защиты внутренней поверхности
 цилиндра кристаллизатора в составе генератора теплоносителя с фазовым переходом с
 наплавленным покрытием состава Ni-Cr-Mo-WC.

Неразрушающие методы исследования полученного покрытия показали высокое
 качество покрытия с незначительными дефектами, что требует дополнительной работы по
 оптимизации режимов наплавки с учетом особенностей композиционного порошка.

Следует отметить, что использование указанного композиционного порошка в
 качестве материала для покрытий имеет достаточный потенциал для внедрения на
 производстве.

Старший научный сотрудник

 /А.С. Колесников/

Начальник отдела 31, к.т.н.

 /А.С. Кротов/

Заместитель
 генерального директора

 /В.И. Уманский/



Открытое акционерное общество
«Специализированное управление № 2»

142100 г. Подольск
Московская обл.
Пр-т Ленина 144
mail@cy-2.ru

Р/с 40702810740330101952 в Сбербанке России
г. Москва Подольское ОСБ №2573 г. Подольск БИК 044525225
ИНН 5036039459 кор. счет 30101810400000000225
ОКПО 50162647, ОКОНХ 61110, КПП 509950001

Тел: (495)540-65-86
(4967) 55-52-86
Факс: (495)540-22-10
Тел. МТГ: 2-23-94; 2-23-63

«УТВЕРЖДАЮ»
Главный инженер ОАО «СУ №2»

Матьцин В.А.

« 1 » 20 / 5 г.

М. П.

АКТ

внедрения результатов диссертационной работы Геращенко Д.А.
«Создание функциональных покрытий с регулируемой микротвердостью
методом сверхзвукового «холодного» газодинамического напыления с
использованием композиционных порошков системы «металл-неметалл» для
изделий машиностроения» на соискание ученой степени кандидата технических
наук

С использованием технологии нанесения функциональных покрытий,
базирующейся на практических рекомендациях Геращенко Д.А.,
восстановлена партия деталей строительной техники:

радиаторы системы охлаждения двигателя Komatsu SAA6D1102E2
экскаватора PC-200;

посадочные поверхности подшипников качения крышки демпфера
бульдозера Komatsu D 65- EX15 ;

головки блока цилиндров двигателя А 01М -3 передвижной сварочной
установки АСТ-4А.

В качестве материала покрытия использовался композиционный порошок
системы Al-Sn+Al₂O₃, напыляемый с помощью установки «Димет-403».


В период с 01.03. 2014 по настоящее время в условиях строительства
магистральных газопроводов находятся в эксплуатации 7 единиц строительной
техники с деталям, восстановленными предложенной технологией:

экскаватор Komatsu PC-200 – 3 ед;

бульдозер Komatsu D 65-EX15 -2 ед;
передвижная сварочная установка АСТ-4А -2 ед.

Отказов техники по причине выхода из строя восстановленных деталей не произошло.

Заместитель генерального директора по техническому обеспечению
производства и эксплуатации транспорта, доктор технических наук, профессор

 Коберниченко А.Б.

Начальник отдела материально-технического снабжения эксплуатации и
ремонта техники, кандидат технических наук, доцент

 Хлопов И.В.

Начальник ремонтно-механических мастерских

 Беркета Н.П.

ПРИЛОЖЕНИЕ Г



Открытое акционерное общество
УРАЛЬСКИЙ ЗАВОД
ХИМИЧЕСКОГО МАШИНОСТРОЕНИЯ
(ОАО «Уралхиммаш»)



Хибиногорский пер., 33, Екатеринбург, 620010, Россия
Тел.: (343) 310-08-00, 310-06-90 Факс: (343) 258-50-92, 258-60-45
E-mail: general@ekb.ru, www.uralhimmash.ru
ОКПО 00217320, ОГРН 1026605781290, ИНН/КПП 6664013880/667401001, БИК 046568945
Р/с 40702810800261000430, к/с 3010181080000000945, филиал «Газпромбанк» (ОАО) в г. Екатеринбурге

08.06.2015 № 472/241

На № _____ от _____

УТВЕРЖДАЮ:
Директор производства
взрывной обработки ОАО «Уралхиммаш», к.т.н.



Ю.П. Беспалов

«08»



АКТ

внедрения результатов диссертационной работы Гращенкова Д.А.
«Создание функциональных покрытий с регулируемой микротвердостью методом сверхзвукового «холодного» газодинамического напыления с использованием композиционных порошков системы «металл-неметалл» для изделий машиностроения» на соискание ученой степени кандидата технических наук

Настоящий акт составлен о том, что по договору от 15.10.08 №1355-491/08/ДЗ-2056/0038/225-2008 этапа №2 в рамках государственного контракта от 01.09.2008 ГК 02.523.12.3021 с Мин.обр.науки по результатам предварительных исследований образцов биметаллических листов титан-сталь, полученных сваркой взрывом с нанесением промежуточного слоя методом «холодного» газодинамического напыления (ХГДН), на базе научно-производственного подразделения «Лаборатория импульсной обработки металлов» ОАО «Уралхиммаш» был изготовлен опытный образец биметаллического листа 1000x400 системы титан-сталь с применением технологии нанесения промежуточного слоя на основе Ni, разработанной диссертантом.

Использование технологии нанесения плакирующего слоя методом ХГДН позволяет снизить себестоимость выпускаемой продукции.

Зам.директора производства
взрывной обработки, к.т.н.



В.И. Чернухин