

DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2023.130.20>

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВЛИЯНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ РЕЖИМОВ НАПЫЛЕНИЯ НА СТРУКТУРУ И СВОЙСТВА ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ПОКРЫТИЙ НА ОСНОВЕ  $Al_2O_3$  И  $Cu$ , ПОЛУЧЕННЫХ МЕТОДОМ ХОЛОДНОГО ГАЗОДИНАМИЧЕСКОГО НАПЫЛЕНИЯ НИЗКОГО ДАВЛЕНИЯ**

Научная статья

**Павлов И.С.<sup>1,\*</sup>**

<sup>1</sup> ORCID : 0000-0002-8952-0533;

<sup>1</sup> Уральский федеральный университет имени Первого Президента РФ Б.Н.Ельцина, Екатеринбург, Российская Федерация

\* Корреспондирующий автор (igorpavlovstudy[at]gmail.com)

**Аннотация**

В данной статье исследована возможность нанесения функциональных покрытий на основе  $Al_2O_3$  и  $Cu$  на подложки из алюминиевого сплава АД1Н методом холодного газодинамического напыления низкого давления на установке ДИМЕТ – 405. Проведен металлографический анализ микроструктуры покрытий, морфометрический анализ частиц корунда, измерена микротвердость по Виккерсу и определена площадь напыленных покрытий (условный коэффициент использования материала) весовым методом. Выполненный металлографический анализ показал, что напыленные покрытия обладают двухфазной структурой, которая состоит из металлической матрицы и темной фазы. Темная фаза состоит из частиц электрокорунда и пор. Как правило, крупные темные фазы имеют грани и являются частицами электрокорунда. Исследована зависимость условного коэффициента использования материала и микротвердости от различных технологических параметров напыления. Подобран оптимальный режим напыления для получения покрытий наиболее однородных по структуре.

**Ключевые слова:** холодное газодинамическое напыление, покрытие, микротвердость, коэффициент использования материала, микроструктура.

**THE DETERMINATION OF THE INFLUENCE OF TECHNOLOGICAL PARAMETERS OF SPRAYING REGIMES ON THE STRUCTURE AND PROPERTIES OF FUNCTIONAL  $Al_2O_3$  AND  $Cu$  BASED COATINGS OBTAINED BY LOW PRESSURE GAS DYNAMIC COLD SPRAYING**

Research article

**Pavlov I.S.<sup>1,\*</sup>**

<sup>1</sup> ORCID : 0000-0002-8952-0533;

<sup>1</sup> Ural Federal University, Ekaterinburg, Russian Federation

\* Corresponding author (igorpavlovstudy[at]gmail.com)

**Abstract**

In this article, the possibility of applying functional coatings based on  $Al_2O_3$  and  $Cu$  to substrates made of aluminum alloy AD1H by cold gas dynamic spraying of low pressure on the DIMET – 405 installation was investigated. Metallographic analysis of the microstructure of the coatings was carried out, the Vickers microhardness was measured and the area of the sprayed coatings (conditional material utilization factor) was determined by the weight method. Metallographic analysis has demonstrated that the sprayed coatings have a two-phase structure, which consists of a metal matrix and a dark phase. The dark phase consists of electrocorundum particles and pores. As a rule, large dark phases have facets and are particles of electrocorundum. The dependence of the conditional coefficient of material utilization and microhardness on various technological parameters of spraying is investigated. The optimal spraying mode was selected to obtain the most homogeneous coatings in structure.

**Keywords:** gas dynamic cold spray, coating, microhardness, material utilization factor, microstructure.

**Введение**

Существует множество методов напыления функциональных покрытий – наплавка, гальваническое нанесение, напыление в вакууме, холодное газодинамическое напыление и другие способы [1], [2]. Многие связаны со сложной и трудоемкой подготовкой поверхностей и со значительным нагревом детали. Оборудование для такой обработки часто имеет большие габариты и высокую стоимость. В сравнении с вышеперечисленными методами нанесения покрытий, холодное газодинамическое напыление низкого давления (ХГДН) является быстро развивающимся методом нанесения покрытий.

Холодное газодинамическое напыление низкого давления (ХГДН) – быстро развивающийся метод порошкового нанесения покрытий, в котором частицы с характерным размером 10–50 мкм ускоряются в сверхзвуковом потоке газа до скоростей 400–1200 м/с и при ударе о подложку закрепляются на ней без фазовых переходов [3], [4]. Отсутствие высоких температур позволяет существенно расширить возможности методов нанесения покрытий порошковыми материалами.

Основное преимущество метода холодного газодинамического напыления низкого давления заключается в отсутствии высоких рабочих температур во время нанесения покрытий. В результате исключается окисление рабочей

поверхности и порошковых частиц. При помощи данного метода можно напылять покрытия практически на любой материал с минимальной очисткой поверхности [5], [6]. Все это открывает широкий спектр возможностей практического использования метода ХГДН.

Практический опыт использования газотермических покрытий показывает, что существенно улучшаются технические характеристики металлопокрытий, полученных подобным способом. Например, износ деталей сокращается в 2-5 раз – в различных условиях эксплуатации [7]. Актуальность работы связана с тем, что использование метода ХГДН открывает широкий спектр возможностей по нанесению покрытий со значительным набором функциональных свойств, а также позволяет восстанавливать геометрию деталей и увеличивать срок службы без демонтажа конструкций за счет простоты процесса и мобильности установок для напыления. Также метод холодного газодинамического напыления повышает результативность защиты металла от коррозионных разрушений.

Свойства напыленных покрытий зависят от состава порошка, размера составляющих его частиц, способа и режимов нанесения. Структура и однородность покрытия, количество и размер частиц электрокорунда, зависят от выбора технологических параметров напыления: скорости и дистанции напыления, режима расхода подачи порошка, режима нагрева сжатого воздуха [8], [9]. Исходя из вышеизложенного, была определена цель работы – определение оптимального режима нанесения покрытий на основе порошка С-01-01 методом ХГДН на установке ДИМЕТ-405. Практическая значимость работы заключалась в отработке параметров режимов нанесения покрытий.

Поставленная цель определяет необходимость выполнения следующих задач: провести эксперименты нанесения покрытий при различных режимах работы установки, исследовать микроструктуру покрытий и измерить микротвердость образцов, определить площади напыленных покрытий и установить зависимость условного коэффициента использования материала и микротвердости от различных технологических параметров напыления. Проанализировать результаты проведенных экспериментов и выбрать оптимальный режим напыления покрытия наиболее однородного по структуре.

### Материалы и методы исследования

В данном исследовании для получения образцов металлокерамических покрытий в качестве исходного материала использовался порошок марки С-01-01 производства Обнинского центра порошкового напыления, состоящий из частиц технически чистой меди и электрокорунда. Химический состав порошка представлен в таблице 1. Крупность порошка составляла 10 – 50 мкм. Частицы электрокорунда являются важной особенностью технологии формирования покрытий методом ХГДН, поскольку если наносить покрытие только из порошка, без корунда, то коэффициент напыления упадет, а прочность сцепления с подложкой уменьшится примерно в 2-3 раза. Основными задачами керамических частиц являются: увеличение прочности сцепления покрытия с подложкой за счет создания развитого микрорельефа и очистки поверхности подложки, уменьшение пористости и увеличение когезии.

Таблица 1 - Химический состав порошка С-01-01

DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2023.130.20.1>

Марка	Оксид алюминия (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ), %	Медь (Cu), %
С-01-01	45	55

В качестве подложки для нанесения покрытий использовались пластины, изготовленные из алюминиевого сплава (АД1Н), химический состав которого указан в стандарте ГОСТ 21631-76 [10]. Размеры образцов составляли 50 × 20 × 5 мм, а их шероховатость составляла Ra = 0,088 мкм. Перед нанесением покрытий подложки подвергали пескоструйной обработке (с использованием инжекторной пескоструйной установки РСТ КСО-130-И-ФВР-М) корундом с размером зерна 160 мкм. Напыление покрытий осуществлялось методом холодного газодинамического напыления низкого давления (ХГДН) с использованием установки «Димет – 405» (см. рис. 1)



Рисунок 1 - Установка холодного газодинамического напыления «Димет – 405»  
DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2023.130.20.2>

На поверхность образцов нанесли 20 покрытий с использованием порошка С-01-01, но при различных технологических параметрах напыления (см. табл. 2). К основным изменяющимся параметрам газодинамического напыления относились: режим нагрева сжатого воздуха (температура потока воздуха  $T$ ), режим расхода порошка  $k$  и угол напыления. Давление воздуха  $p$ , время напыления  $t$ , скорость напыления  $v$  и дистанция напыления (расстояние от среза сопла до подложки поверхности образца  $L$ ) поддерживали постоянными на протяжении всего эксперимента. Изменение температуры сжатого воздуха происходило равномерно за счет изменения положения регулятора на блоке управления установки. Переключение положения регулятора на следующий режим увеличивает температуру на  $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ , а время выхода на режим составляет 10 секунд, согласно руководству по эксплуатации установки «Димет – 405» [11]. Данный период времени необходим для стабилизации температуры сжатого воздуха. Каждый режим нагрева сжатого воздуха соответствовал определенной температуре (см. табл 3).

Таблица 2 - Основные технологические параметры режимов нанесения покрытий  
DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2023.130.20.3>

№ образца	Напыляемый порошок	Режим нагрева	Режим расхода порошка	Угол напыления	Время напыления, сек	Скорость напыления, мм/сек	Дистанция напыления, мм	Давление, атм
1	С-01-01	3	7	90	10	50	15	5,5
2		4						
3		5						
4		3	5					
5		4						
6		5						
7		3	9					
8		4						
9		5						
10		3	5					
11		7						
12		9						
13		5	75					
14		60						
15		75						

16			90				
17			75				
18		4	60				
19			45				
20			90				

Таблица 3 - Соотношение режима нагрева сжатого воздуха и температуры

DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2023.130.20.4>

Режим нагрева сжатого воздуха	Температура, °С
3	400
4	500
5	600

Для исследования возможности нанесения покрытий в труднодоступных местах смоделирована и разработана специальная насадка для сопла СК – 20, модель которой представлена на рисунке 2.

Рисунок 2 - Модель насадки сопла - СК-20  
DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2023.130.20.5>

Изучение микроструктуры образцов выполнено при помощи металлографического анализа на металлографическом микроскопе OLYMPUS GX-71. Перед металлографическим анализом образцы предварительно подготовили по следующей схеме: образцы покрытий были разрезаны на автоматическом отрезном станке Discotom-6. После того как образцы нарежали, их тщательно промыли и высушили. Затем образцы были запрессованы при помощи автоматического электрогидравлического прессы Cito-Press-1. Далее запрессованные образцы обработали на полуавтоматическом шлифовально-полировальном станке TegraPol-15 для создания микрошлифов покрытий. Микротвердость покрытий измерили по методу Виккерса при помощи твердомера ПМТ-3 [12].

#### Исследование микроструктуры напыленных покрытий

Для исследования микроструктуры образцов был проведен металлографический анализ на микроскопе OLYMPUS GX-71 при оптическом увеличении 500х. Напыленные покрытия обладают двухфазной структурой, которая состоит из металлической матрицы и темной фазы. На металлической матрице можно отследить форму и размеры частиц расплавленной меди. Выполненный микрорентгеноспектральный анализ, позволил идентифицировать частицы корунда ( $Al_2O_3$ ) в темной фазе, между которыми различимы пустоты, т.е. закрытые поры. Включения корунда в напыленных покрытиях обладают высокой степенью анизотропии формы, они сильно вытянуты в горизонтальном направлении, перпендикулярном направлению напыления, а в поперечном направлении сильно сплюснены. Как правило, крупные темные фазы имеют грани и являются частицами электрокорунда.

Для получения морфометрической характеристики частиц электрокорунда в покрытиях использовали цифровые изображения, полученные на электронном микроскопе высокого разрешения OLYMPUS GX-71. Анализ изображений проводился специальным программным обеспечением, а именно программным модулем SIAMS Photolab 700. В качестве объекта исследования использовались шлифы покрытий. Для анализа была получена серия исходных изображений на двух режимах – топографического и композиционного контраста. В результате проведенного анализа результатов РЭМ, были получены данные о количестве и размере частиц электрокорунда в структуре покрытий, которые представлены в таблице 4. По полученным данным построены гистограммы распределения частиц по размерам и их процентное содержание (см. рис 4,6,7,9,10,12,13,15,17)

Таблица 4 - Анализ данных морфометрических характеристик частиц корунда

DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2023.130.20.6>

№ образца	Число частиц	Минимальное значение,	Максимальное значение,	Среднее значение, мкм	СКО, мкм	Медиана, мкм	Размах, мкм
-----------	--------------	-----------------------	------------------------	-----------------------	----------	--------------	-------------

		мкм	мкм				
1	3229	0,30	37,09	2,28	2,64	1,38	1,51
2	3621	0,30	18,01	1,61	1,90	0,85	1,02
3	3229	0,30	15,92	1,46	1,87	0,72	0,82
4	3772	0,30	12,74	1,32	1,63	0,65	0,72
5	3605	0,30	18,37	1,80	2,00	1,05	1,17
6	4885	0,17	25,23	1,43	1,83	0,84	0,73
7	2652	0,12	15,32	1,06	1,32	0,70	0,54
8	5006	0,30	20,50	1,51	1,77	0,88	0,77
9	4746	0,12	20,44	0,89	1,18	0,60	0,50
10	2900	0,12	14,20	0,97	1,27	0,60	0,56
11	2606	0,30	20,52	2,10	2,26	1,26	1,37
12	1010	0,30	32,31	3,32	2,75	2,70	2,50
13	606	0,30	13,35	2,59	2,20	1,58	1,91
14	859	0,30	12,30	2,43	2,19	1,90	2,05
15	527	0,30	7,14	1,57	1,14	1,26	1,18
16	378	0,30	33,12	3,20	3,02	2,63	2,20
17	577	0,30	20,78	2,72	2,67	1,76	2,17
18	985	0,30	14,34	2,71	2,15	2,26	1,83
19	554	0,30	13,48	2,46	2,09	1,89	1,72
20	703	0,30	15,01	2,30	2,10	1,64	1,68

На рисунке 4 представлена микроструктура образцов покрытий №1, №2, №3 при оптическом увеличении 500х.

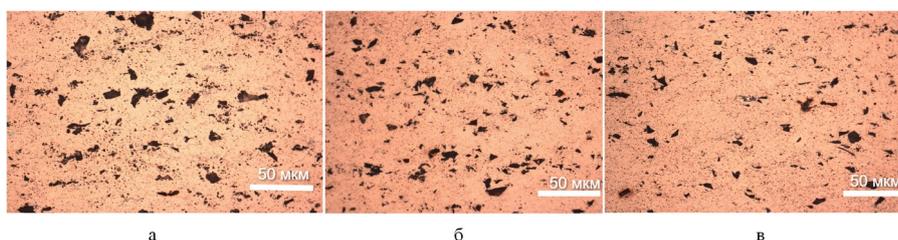


Рисунок 3 - Микроструктура образцов покрытий 1–3:  
 а – образец № 1; б – образец № 2; в – образец № 3  
 DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2023.130.20.7>

Согласно ключевым параметрам режима напыления (см. табл. 2) и изображениям микроструктуры образцов покрытий №1, №2, № 3 (см. рис. 3), проведенный металлографический анализ показал, что при сравнении образцов данной группы, структура первого образца характеризуется наличием мелких частиц темной фазы и содержанием электрокорунда в количестве 3229 частиц, средний размер 2,28 мкм, форма металлических частиц – «кирпичики». Морфометрический анализ, полученный по результатам статистической обработки величин частиц корунда показал, что основная доля частиц 38,3% и 37,4% от общего количества частиц имеют размер 0,30 – 1 мкм и 1 – 3 мкм соответственно.

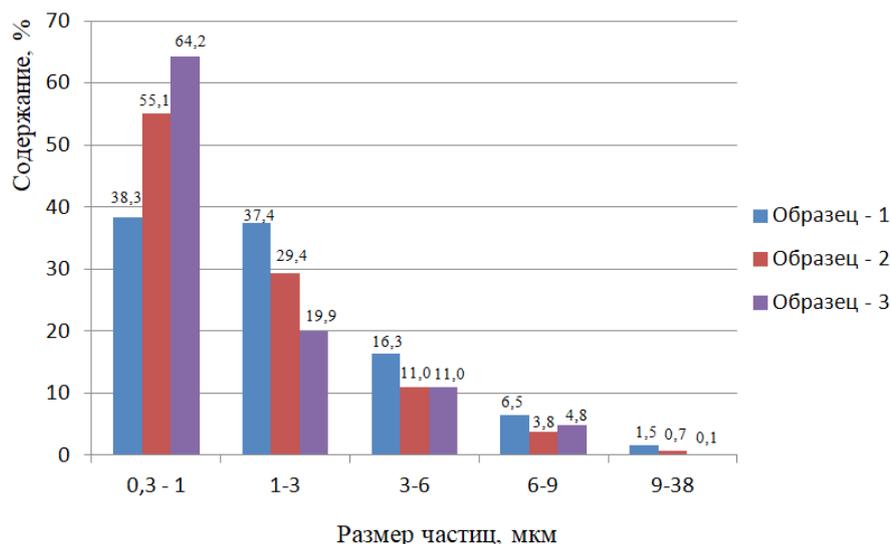


Рисунок 4 - Гистограмма распределения частиц по размерам и их процентное содержание для образцов 1-3  
DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2023.130.20.8>

Образцы №4, №5, №6 напыляли при режимах нагрева сжатого воздуха 3,4,5, режиме расхода порошка 5, а угол напыления составил 90°. Покрытие четвертого образца является оптимальным по строению – частицы электрокорунда мелкие (минимальный размер – 0,30 мкм, а среднее и максимальное значение – 1,32 мкм и 12,74 соответственно) и частицы темной фазы практически отсутствуют (см. рис 5.а). Микроструктура образца 5 (см. рис. 5.б) характеризуется наличием мелких частиц темной фазы и необходимостью увеличения режима нагрева сжатого воздуха. В структуре образца 6 (см. рис. 5.в.) видны следы окалины, частицы более вытянутые.

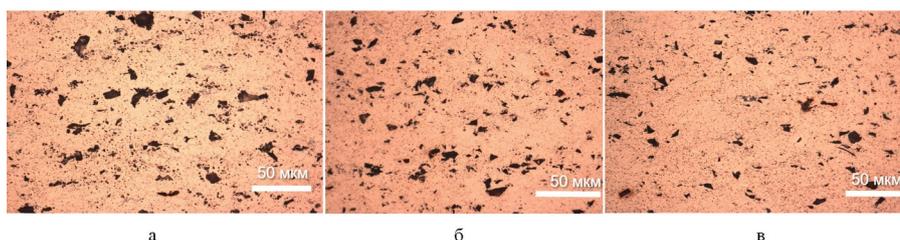


Рисунок 5 - Микроструктура образцов покрытий 4-6:  
а - образец № 4; б - образец № 5; в - образец № 6  
DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2023.130.20.9>

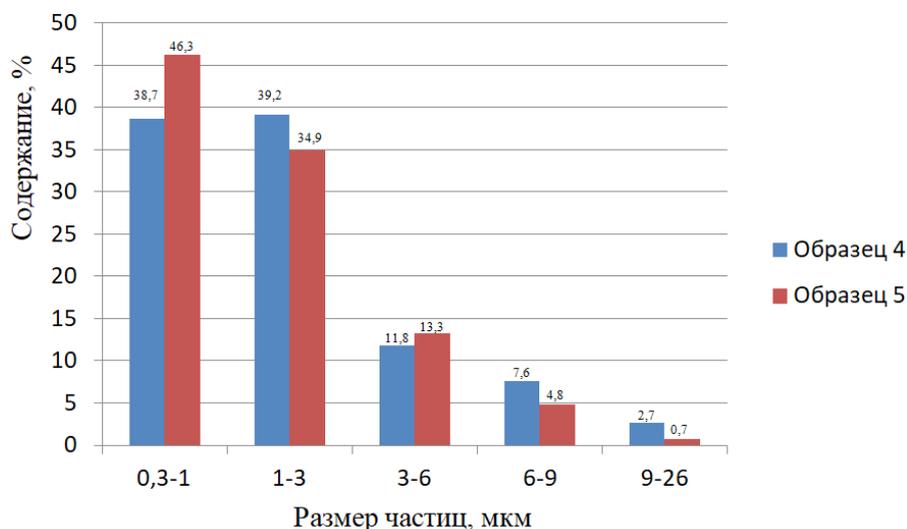


Рисунок 6 - Гистограмма распределения частиц по размерам и их процентное содержание для образцов 4-5  
DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2023.130.20.10>

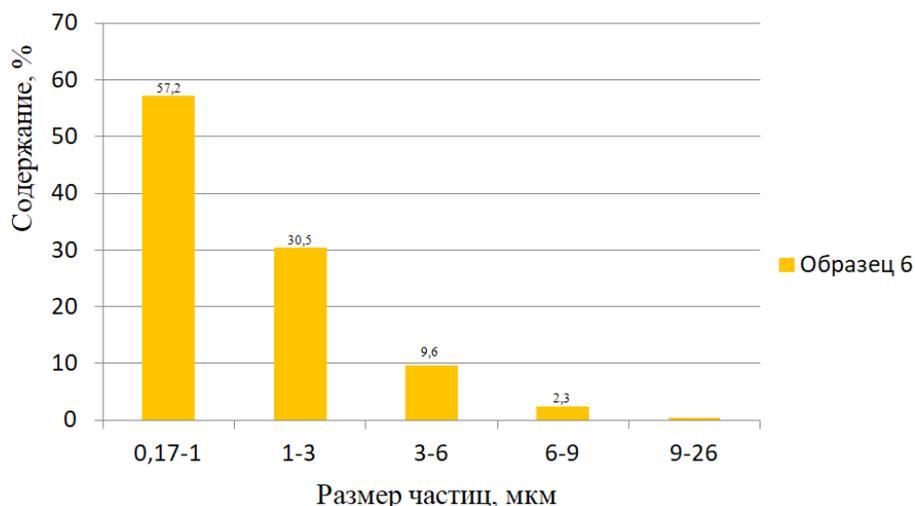


Рисунок 7 - Гистограмма распределения частиц по размерам и их процентное содержание для образца 6  
DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2023.130.20.11>

Проведенный анализ микроструктуры образцов №7, №8, №9 (см. рис. 8) напыленных при режимах нагрева сжатого воздуха 3,4,5, режиме расхода порошка 9 и угле напыления 90° показал, что структура седьмого образца схожа со структурой пятого образца. Восьмой образец характеризуется наличием большого содержания частиц электрокорунда в количестве 5006 ед. (минимальное, среднее, максимальное значение – 0,30 мкм, 1,51 мкм и 20,50 мкм соответственно) и мелких частиц темной фазы. В структуре девятого образца содержится 4746 частиц электрокорунда, размерность указана в таблице 4, а также из-за перегрева образуются окалины, частицы вытянуты в разные стороны. В образце № 8 преобладающая доля частиц корунда (55,3%) имеет размер 0,30 – 1 мкм, а для образцов 7 и 9 доля частиц составила 66,2% и 73,2% с размером 0,12 – 1 мкм.

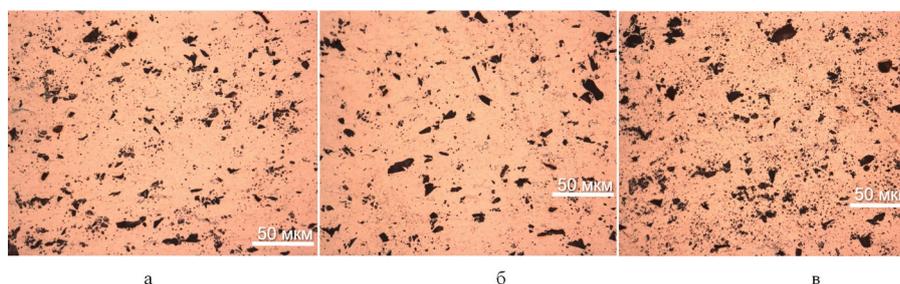


Рисунок 8 - Микроструктура образцов покрытий 7-9:  
а - образец № 7; б - образец № 8; в - образец № 9  
DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2023.130.20.12>

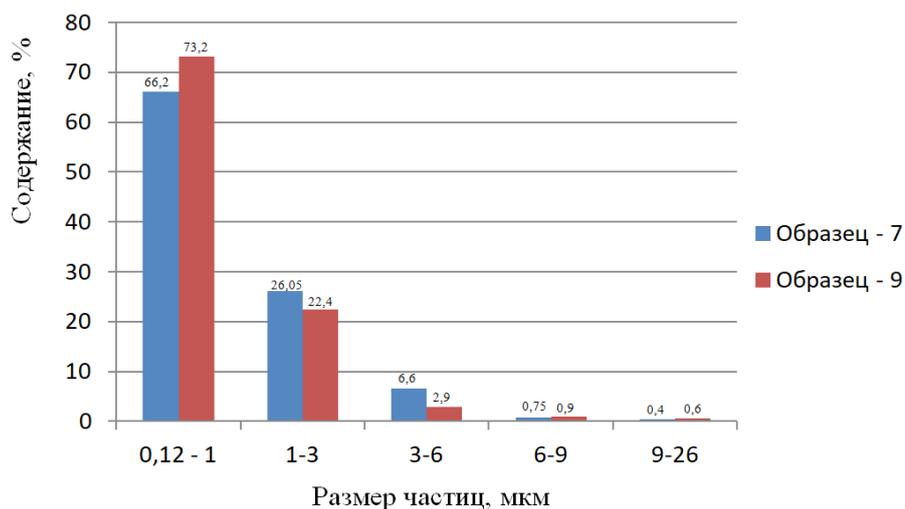


Рисунок 9 - Гистограмма распределения частиц по размерам и их процентное содержание для образцов 7 и 9  
DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2023.130.20.13>

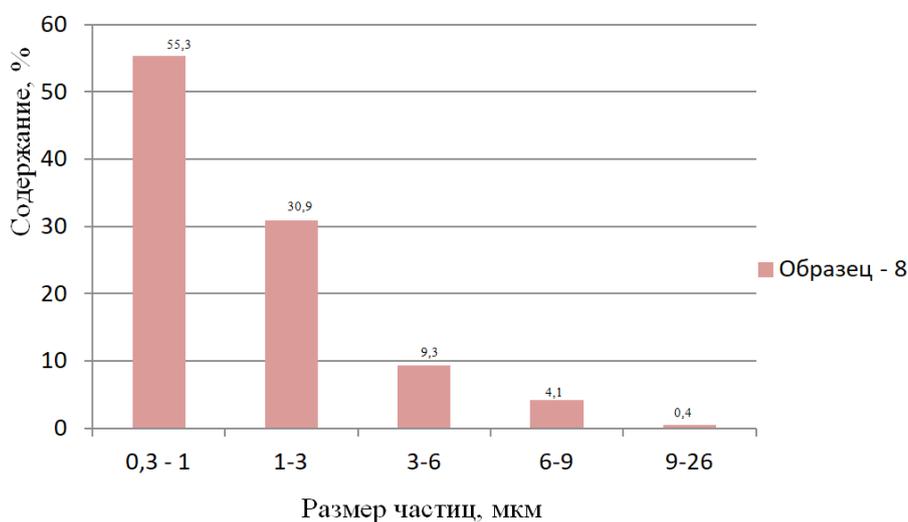


Рисунок 10 - Гистограмма распределения частиц по размерам и их процентное содержание для образца 8  
DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2023.130.20.14>

Микроструктура серии образцов 10-12 представлена на рисунке 11. Данная серия образцов характеризуется перегревом, в образце 11 присутствуют окалины. Покрытие образца 12 характеризуется большим содержанием окалин, структура частиц вытянута. Для образца 10 основная доля частиц корунда имеет размеры 1-3 мкм (42,2%), а для образцов 11 и 12 основная доля частиц корунда составила 39,3% и 41% с характерным размером 1 - 3 мкм.

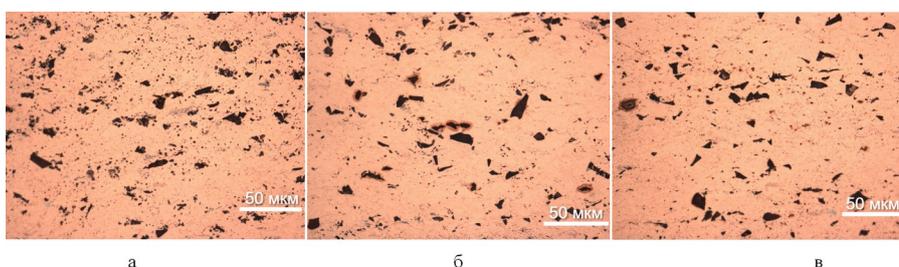


Рисунок 11 - Микроструктура образцов покрытий 10-12:  
а - образец № 10; б - образец № 11; в - образец № 12  
DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2023.130.20.15>

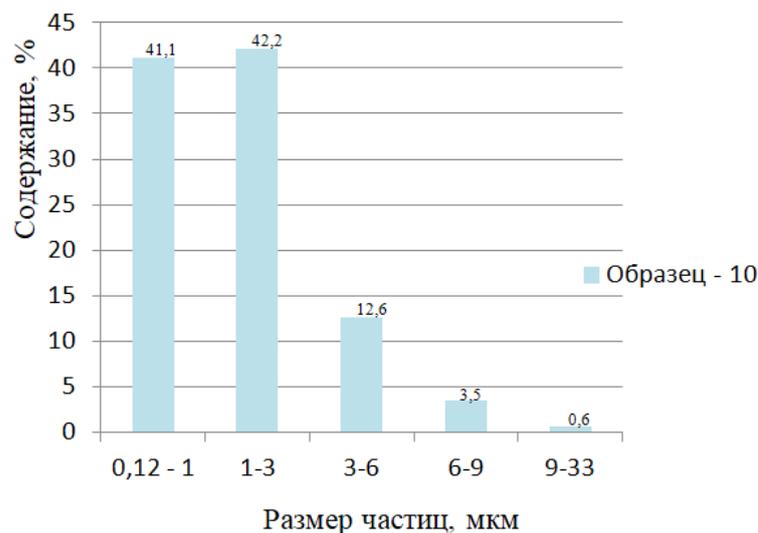


Рисунок 12 - Гистограмма распределения частиц по размерам и их процентное содержание для образца 10  
DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2023.130.20.16>

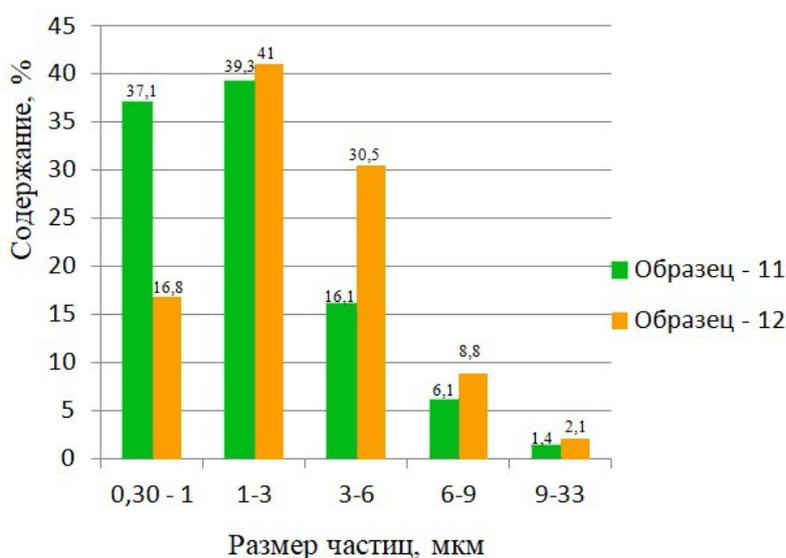


Рисунок 13 - Гистограмма распределения частиц по размерам и их процентное содержание для образцов 11-12  
DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2023.130.20.17>

При исследовании микроструктуры группы образцов №13, №14, №15, № 16 (см. рис. 14) установлено, что образец 13 характеризуется наличием крупных частиц электрокорунда в количестве 606 ед., максимальный размер которых составил 13,35 мкм. В образце 14 количество темной фазы и частиц электрокорунда больше – 859 ед., но по размеру они меньше чем в образце 13 (см. табл. 4). В 15 образце присутствуют окалины по границам электрокорунда. В образце 16 содержание частиц электрокорунда составило 378 ед. (минимальное, среднее, максимальное значение – 0,30 мкм, 3,20 мкм и 33,12 мкм соответственно).

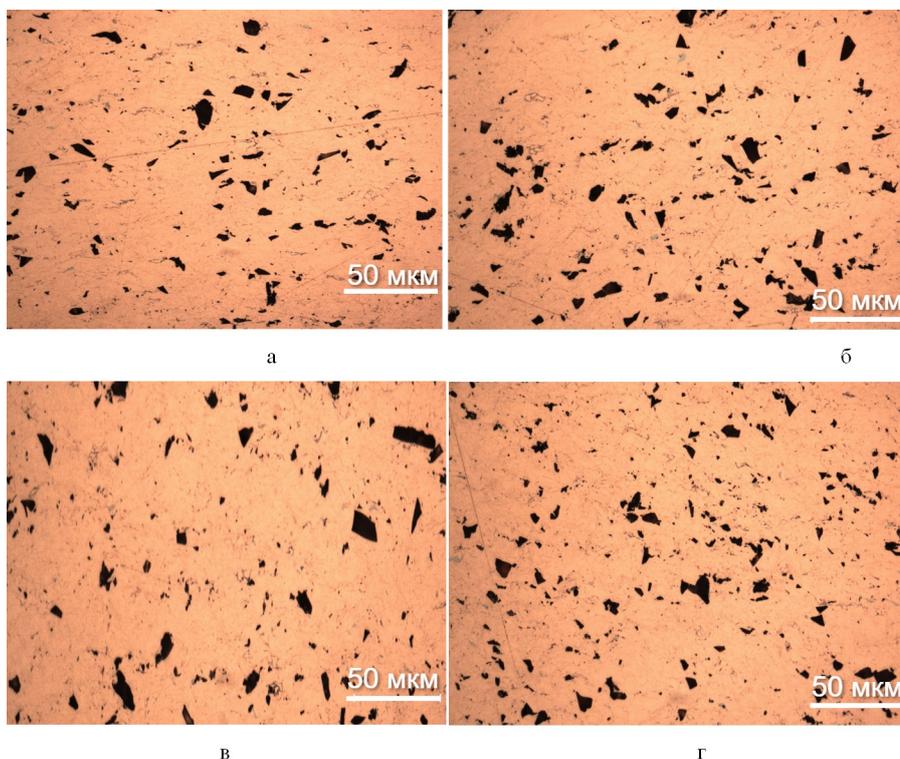


Рисунок 14 - Микроструктура образцов покрытий 13-16:  
 а - образец № 13; б - образец № 14; в - образец № 15; г - образец № 16  
 DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2023.130.20.18>

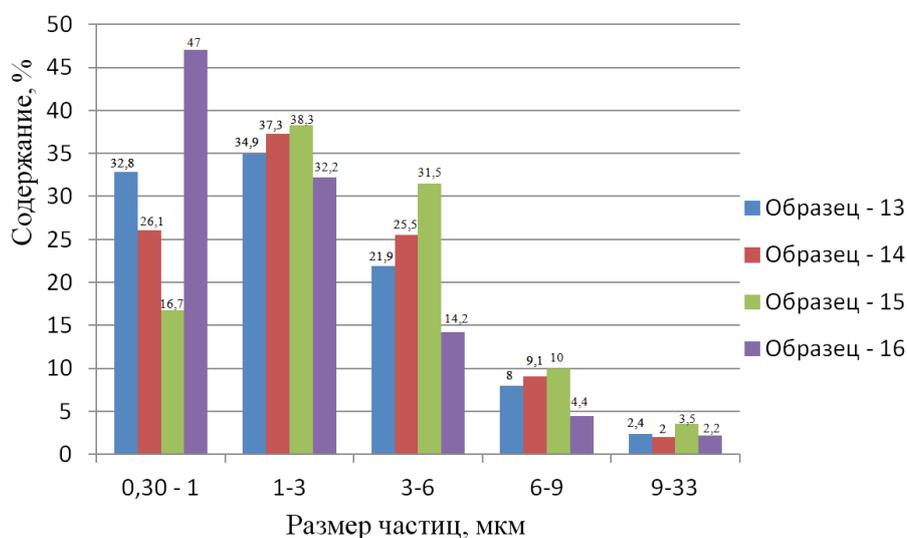


Рисунок 15 - Гистограмма распределения частиц по размерам и их процентное содержание для образцов 13-16  
 DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2023.130.20.19>

Исследовав микроструктуру серии образцов 17 – 20 (см. рис. 16) установлено, что в образце 17 мелкие частицы темной фазы практически отсутствуют, однако присутствуют крупные частицы электрокорунда размером 20,78 мкм. В образце 18 содержание частиц электрокорунда увеличилось, а размер уменьшился по сравнению с предыдущим образцом (см. табл. 4). В образце 19 произошло уменьшение размеров частиц электрокорунда по сравнению с предыдущими двумя образцами (минимальное, среднее, максимальное значение – 0,30 мкм, 2,46 мкм и 13,48 мкм соответственно). Образец 20 характеризуется большим количеством частиц электрокорунда (703 ед.) относительно образца 17.

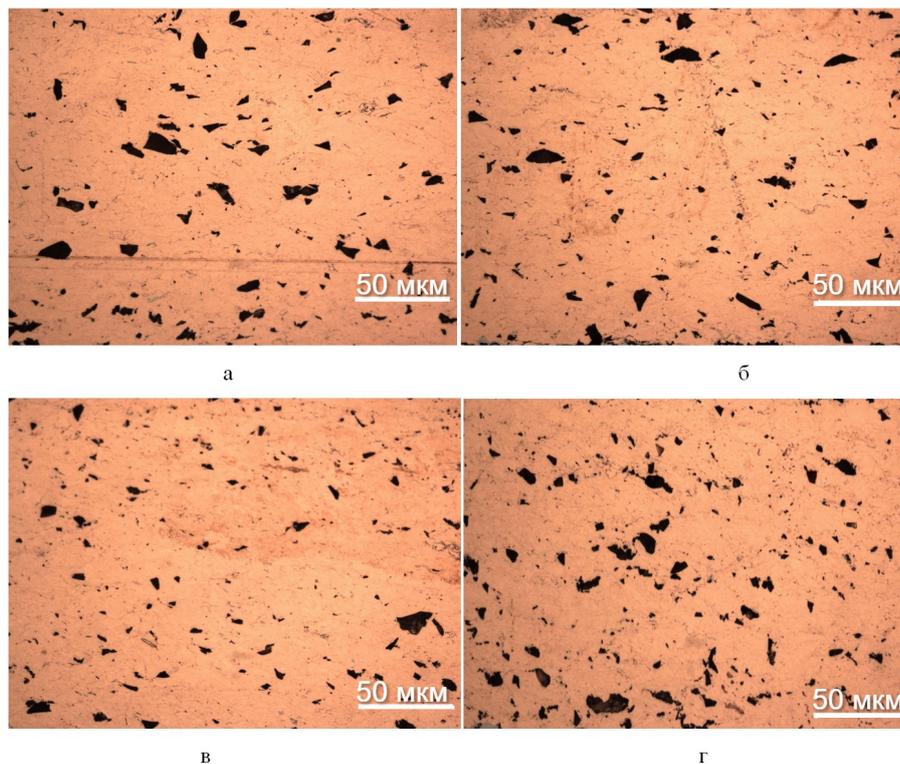


Рисунок 16 - Микроструктура образцов покрытий 17-20:  
 а - образец № 17; б - образец № 18; в - образец № 19; г - образец № 20  
 DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2023.130.20.20>

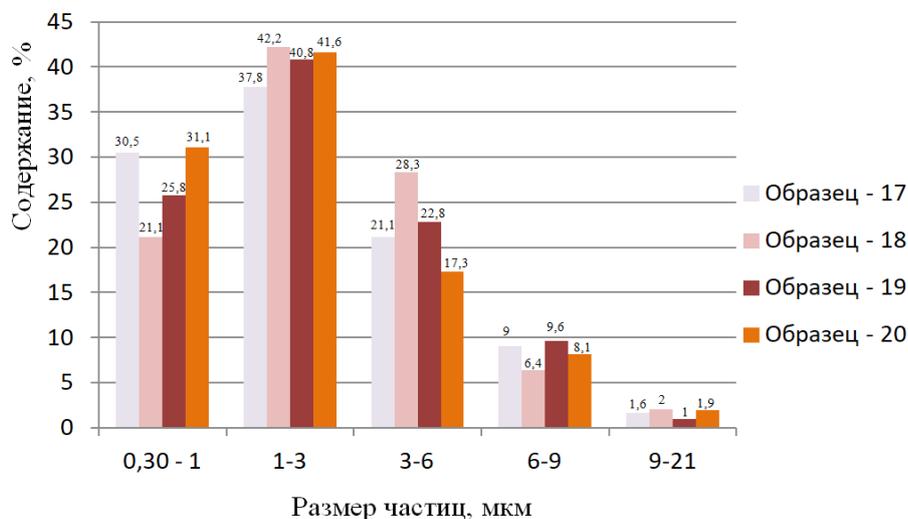


Рисунок 17 - Гистограмма распределения частиц по размерам и их процентное содержание для образцов 13-16  
 DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2023.130.20.21>

Проведенный анализ микроструктуры показал, что основными факторами, влияющими на структуру и свойства покрытия, являются режим нагрева сжатого воздуха (тепловое воздействие температуры потока воздуха) и энергия частиц. Повышение температуры сопровождается изменением скорости потока воздуха, что в свою очередь оказывает влияние на частицы меди и корунда введенных в поток. Увеличение энергии частиц приводит к их большему соударению между собой и подложкой, в результате повышается степень деформации пластичных частиц и наклеп меди. Однако следует учитывать, что в результате повышения температуры сжатого воздуха происходит прогрев частиц металла и их деформация в пластичном состоянии, вследствие чего снижается наклеп. Кроме того, нельзя исключать возможного влияния температуры потока воздуха на структуру и свойства покрытия. В структуре покрытий наблюдаются дефекты в виде микропор. Механизм их формирования связан с неравномерным воздействием частиц электрокорунда на медь, и, следовательно, недостаточно регулярно уплотнению покрытий по объему.

#### Определение микротвердости и коэффициента использования материала

Основной задачей метода определения микротвердости является исследование твердости отдельных частиц, структурных составляющих, а также анизотропии твердости в различных участках покрытия.

Измерение микротвердости по Виккерсу проводилось при помощи микротвердомера ПМТ-3. Индентором в микротвердомере ПМТ-3 служит четырехгранная алмазная пирамида с квадратным основанием, которая вдавливалась в покрытия испытуемых образцов под нагрузкой  $P = 50$  г в течение 10 секунд. После снятия нагрузки в образце остается отпечаток, возникший благодаря пластической деформации. Наносимый индентором отпечаток измерялся при помощи микроскопа. Форма отпечатков могла отклоняться от правильной, задаваемой формой индентора. После измерения диагоналей отпечатков значение микротвердости по Виккерсу вычисляли по теоретической формуле 1:

$$H = 1,854 \times P/dcp^2 \quad (1)$$

где  $P$  – нормальная нагрузка, приложенная к алмазному наконечнику, кг;

$dcp$  – среднее арифметическое значение длин обеих диагоналей отпечатка, мм.

Значения микротвердости по методу Виккерса получены при нагружении  $P = 50$  г и представлены в таблице 5.

После металлографического анализа и определения микротвердости покрытий для оценки коэффициента использования материала была определена площадь сечения напыленных покрытий с помощью весового метода. Изображенные на фотографиях структуры напыленных покрытий были вырезаны и взвешены на весах. В качестве эталонной единицы взяли чистый лист размером  $5 \times 2$  см и весом 0,0744 гр. Для оценки коэффициента использования материала (КИМ), при помощи составленной пропорции (см. формулу 2) определили площадь сечения напыленных покрытий. Рассчитанные данные представлены в таблице 5.

$$1 \text{ см}^2/x = 0,00744 \text{ гр}/m \quad (2)$$

Где  $m$  – вес одного покрытия, гр.

По полученным данным были построены гистограммы (см. рис. 18 – 19) зависимости микротвердости и условного коэффициента использования материала от различных технологических параметров напыления. Дистанция напыления и скорость напыления оставались постоянными ( $L = 10$  мм;  $V_{\text{нап}} = 50$  мм/с), в качестве изменяющихся параметров использовали режим расхода порошка и режим нагрева.

Таблица 5 - Рассчитанные экспериментальные данные микротвердости и условного КИМ

DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2023.130.20.22>

№ образца	Микротвердость, Hv, кг/мм	S, см <sup>2</sup>
1	107,67	21,97
2	102,00	28,55
3	95,52	21,18
4	101,21	24,97
5	84,17	28,95
6	79,84	32,19
7	85,07	38,98
8	77,87	32,02
9	70,96	29,61
10	78,27	25,85
11	75,13	39,00
12	81,33	44,00
13	89,76	21,50
14	93,42	15,07
15	83,63	13,92
16	92,17	11,10
17	76,21	25,64
18	90,44	21,99
19	90,09	11,78
20	96,49	10,62

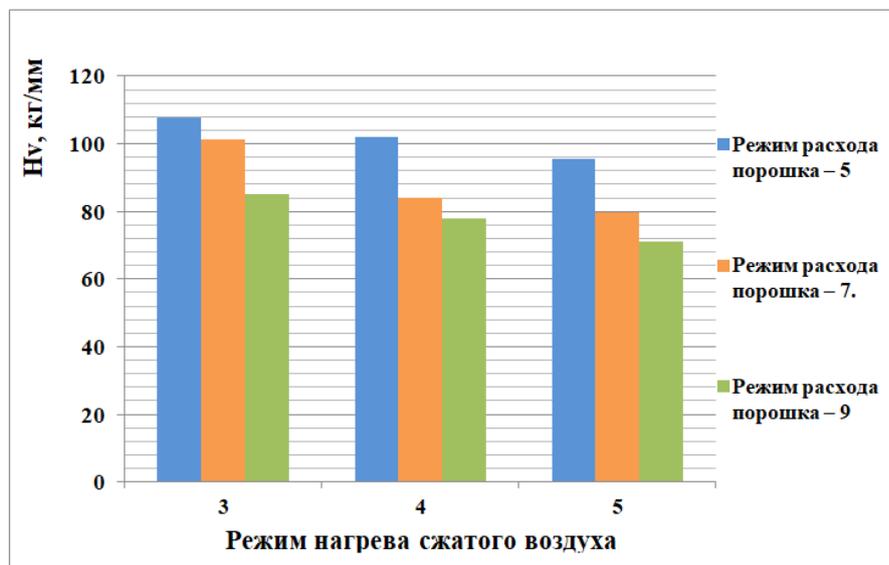


Рисунок 18 - Гистограмма зависимости микротвердости от режима нагрева сжатого воздуха для образцов 1-9  
DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2023.130.20.23>

Анализ полученных данных гистограмм показал зависимость изменения микротвердости от режима нагрева сжатого воздуха и расхода подачи порошка. С увеличением режима нагрева и режима подачи порошка уменьшается микротвердость и возрастает пластичность, но при этом, по-видимому, возможно увеличение внутренних напряжений за счет увеличения степени проплавления частиц.

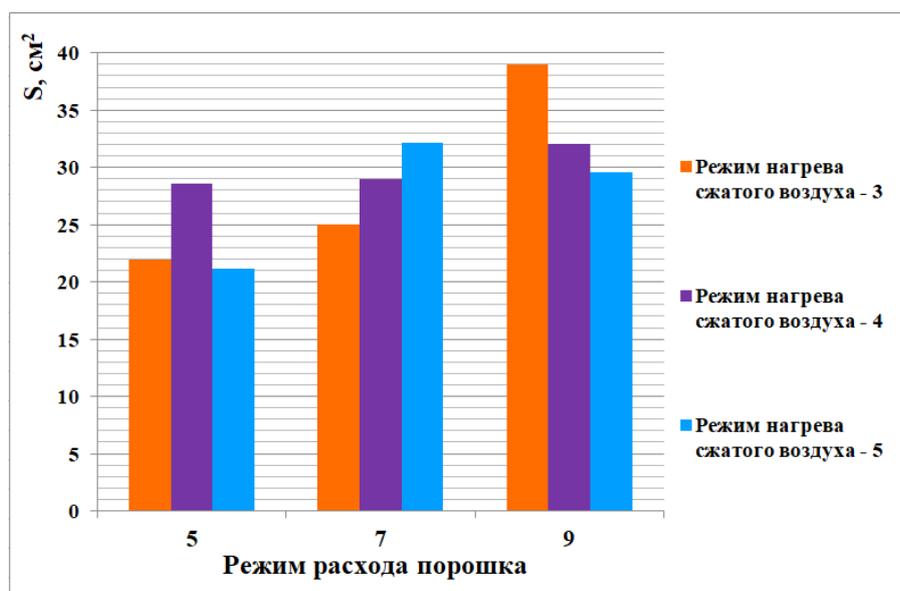


Рисунок 19 - Гистограмма зависимости условного коэффициента использования материала от режима расхода порошка для образцов 1-9  
DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2023.130.20.24>

Согласно гистограмме (см. рис. 20) видна зависимость условного коэффициента использования материала от технологических параметров напыления. С увеличением режима расхода порошка и режима нагрева сжатого воздуха увеличивается условный коэффициент использования материала. Однако для образца №9, при увеличении режима нагрева до 5, увеличивается пластичность. Согласно металлографическому анализу микроструктуры, установлено, что существенно увеличивается количество частиц электрокорунда в структуре и уменьшается условный коэффициент использования материала.

Исходя из рассчитанных значений КИМ и микротвердости (см. табл. 5) построены графики (см. рис. 20) зависимости условного коэффициента использования материала от различных технологических параметров напыления для серии образцов 13-16 и 17-20. Дистанция напыления, скорость напыления ( $L = 10$  мм;  $V_{\text{нап}} = 50$  мм/с) и режим расхода порошка оставались постоянными, а в качестве изменяющегося параметра использовался угол напыления и режим нагрева.

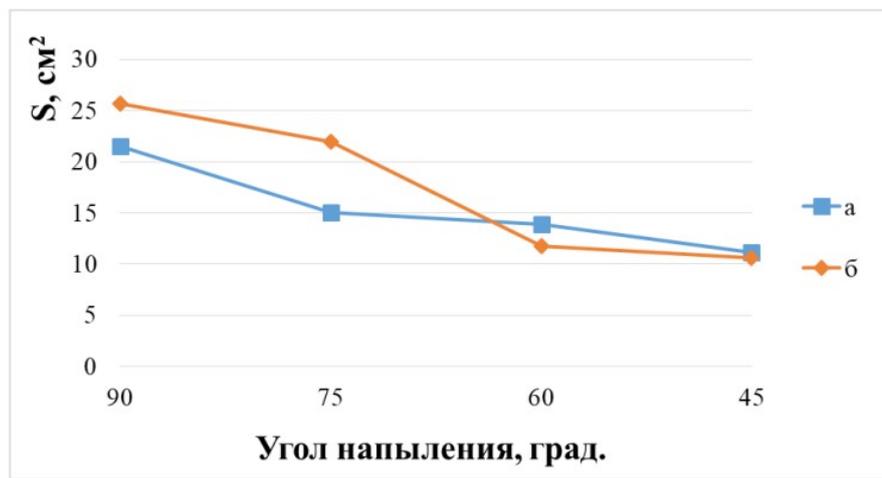


Рисунок 20 - График зависимости условного КИМ от угла напыления и режима нагрева:  
 а – Режим нагрева 3; б – Режим нагрева - 4  
 DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2023.130.20.25>

Согласно графику зависимости КИМ от угла напыления и режима нагрева (см. рис. 20) установлено, что с уменьшением угла напыления ухудшается условный коэффициент использования материала, а в микроструктуре образцов количество частиц электрокорунда уменьшается, но их размер становится более крупным.

#### Заключение

Метод холодного газодинамического напыления представляет большой интерес для ученых и предпринимателей в связи с колоссальным рядом задач, которые можно решить благодаря его использованию. Таких как, например, заполнение каверн, трещин, сколов, пробоин, восстановление геометрических форм и размеров деталей практически любой сложности.

Установлено, что основными параметрами, оказывающими влияние на структуру, микротвердость и условный коэффициент использования материала являются режим нагрева сжатого воздуха, угол напыления и режим расхода порошка. Так с увеличением расхода порошка возрастает пластичность, а также размер частиц электрокорунда становится более крупным. При большом количестве порошка происходит перегрев. Выполненный металлографический анализ показал, что напыленные покрытия обладают двухфазной структурой, которая состоит из металлической матрицы и темной фазы. Темная фаза состоит из частиц электрокорунда и пор. Как правило, крупные темные фазы имеют грани и являются частицами электрокорунд. С увеличением режима нагрева размер частиц уменьшается и увеличивается пластичность. В структуре образцов с уменьшением угла напыления количество частиц электрокорунда уменьшается, но их размер становится более крупным. Напыление образцов при помощи специальной насадки (см. рис. 2), оказалось невозможным, так как происходит осаждение частиц на насадку с последующим заполнением сопла.

Если в качестве критерия оценки покрытия рассматривать микротвердость, КИМ и качество покрытия, то к оптимальным параметрам процесса напыления можно отнести: расстояние от среза сопла до поверхности подложки – 10 мм, скорость перемещения сопла – 50 мм/сек, режим нагрева сжатого воздуха на установке Димет – 405 – 3 (400°C) и режим подачи порошка 5, угол напыления 45°-90°. При данных технологических параметрах режима напыления достигается оптимальная структура покрытия с меньшим количеством темной фазы и частиц электрокорунда, а также оптимальный коэффициент использования материала. Образец №17 соответствует данным параметрам.

#### Конфликт интересов

Не указан.

#### Рецензия

Сообщество рецензентов Международного научно-исследовательского журнала  
 DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2023.130.20.26>

#### Conflict of Interest

None declared.

#### Review

International Research Journal Reviewers Community  
 DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2023.130.20.26>

#### Список литературы / References

1. Буткевич М.Н. Газотермические методы напыления для оборудования предприятий бытового обслуживания. / М.Н. Буткевич, А.Ф. Пузряков, В.Н. Белокуров // Сервис в России и за рубежом. — 2014. — 4(51). — с. 32-48. — DOI: 10.12737/4850
2. Овчинников В.В. Технология нанесения и свойства функциональных покрытий учебник / В.В. Овчинников, М.А. Гуреева, Н.А. Олефиренко — Вологда: Инфра-Инженерия, 2023. — 260 с.
3. Алхимов А.П. Холодное газодинамическое напыление. Теория и практика / А.П. Алхимов, С.В. Клинков, В.Ф. Косарев — М.: Физматлит, 2010. — 533 с.

4. Турдубаева К.В. Нанесение антифрикционных покрытий порошком Б-83, методом холодного газодинамического напыления [Электронный ресурс] / К.В. Турдубаева // Электронный архив ТПУ. — 2019. — URL: <https://earchive.tpu.ru/bitstream/11683/54736/1/TPU731462.pdf>. (дата обращения: 28.10.22)
5. Достоинства технологии холодного газодинамического напыления [Электронный ресурс] // Димет – технологии напыления металлов. — 2005. — URL: <https://dimet.info/tehnologiya/dostoinstva-tehnologii/>. (дата обращения: 19.10.22)
6. Козлов И.А. Холодное газодинамическое напыление покрытий (Обзор). / И.А. Козлов, К.А. Лещев, А.А. Никифоров и др. // Труды ВИАМ. — 2020. — 8 (90). — с. 7-93. — DOI: 10.18577/2307-6046-2020-0-8-77-93
7. Борисов Ю.С. Газотермические покрытия из порошковых материалов / Ю.С. Борисов — Киев: Наукова думка, 1987. — 543 с.
8. Клинков С.В. Нанесение методом холодного газодинамического напыления композиционных покрытий. / С.В. Клинков, В.Ф. Косарев, А.С. Желнина // Вестник ПНИПУ. Аэрокосмическая техника. — 2016. — 47. — с. 135-153. — DOI: 10.15593/2224-9982/2016.47.08
9. Koktsinskaya E.M. Aging Tests of the High Current Aluminum-copper Contact Connections in the Iiter Busbar Systems. / E.M. Koktsinskaya, A.G. Roshal, V.M. Karpyshyn et al. // IEEE Transactions on Plasma Science. — 2014. — 3. — p. 482-488. — DOI: 10.1109/TPS.2013.2290703
10. Листы из алюминия и алюминиевых сплавов.. — Введ. 1977-07-01. — М.: Стандартиформ, 2008. — 30 с.
11. ДИМЕТ-405 – портативное универсальное оборудование. Руководство [Электронный ресурс] // Металлический форум – все о работе с металлом. — 2012. — URL: <https://www.chipmaker.ru/files/file/7743/>. (дата обращения: 09.11.22)
12. Металлы и сплавы. Метод измерения твердости по Виккерсу. — Введ. 1976-07-01. — М.: Гос. комитет СССР по стандартам, 1987. — 30 с.

### Список литературы на английском языке / References in English

1. Butkevich M.N. Gazotermicheskie metody' napy'leniya dlya oborudovaniya predpriyatij by'tovogo obsluzhivaniya [Gas-thermal Methods of Dusting for the Equipment of Public Service Establishments]. / M.N. Butkevich, A.F. Puzryakov, V.N. Belokurov // Servis v Rossii i za rubezhom [Services in Russia and Abroad]. — 2014. — 4(51). — p. 32-48. — DOI: 10.12737/4850 [in Russian]
2. Ovchinnikov V.V. Tekhnologiya naneseniya i svoystva funkcional'ny'x pokry'tij uchebnik [Technology of Application and Properties of Functional Coatings Textbook] / V.V. Ovchinnikov, M.A. Gureeva, N.A. Olefirenko — Vologda: Infra-Inzheneriya, 2023. — 260 p. [in Russian]
3. Alximov A.P. Xolodnoe gazodinamicheskoe napy'lenie. Teoriya i praktika [Cold Gas Dynamic Spraying. Theory and Practice] / A.P. Alximov, S.V. Klinkov, V.F. Kosarev — М.: Fizmatlit, 2010. — 533 p. [in Russian]
4. Turdubaeva K.V. Nanesenie antifrikcionny'x pokry'tij poroshkom B-83, metodom xolodnogo gazodinamicheskogo napy'leniya [Application of Antifriction Coatings with B-83 Powder, by Cold Gas Dynamic Spraying] [Electronic source] / K.V. Turdubaeva // Electronic Archive of TPU. — 2019. — URL: <https://earchive.tpu.ru/bitstream/11683/54736/1/TPU731462.pdf>. (accessed: 28.10.22) [in Russian]
5. Dostoinstva texnologii xolodnogo gazodinamicheskogo napy'leniya [Advantages of Cold Gas Dynamic Spraying Technology] [Electronic source] // Dimet – Technologies of Metal Spraying. — 2005. — URL: <https://dimet.info/tehnologiya/dostoinstva-tehnologii/>. (accessed: 19.10.22) [in Russian]
6. Kozlov I.A. Xolodnoe gazodinamicheskoe napy'lenie pokry'tij (Obzor) [Cold Spray Coatings (review)]. / I.A. Kozlov, K.A. Leshhev, A.A. Nikiforov et al. // Trudy' VIAM [Proceedings of VIAM]. — 2020. — 8 (90). — p. 7-93. — DOI: 10.18577/2307-6046-2020-0-8-77-93 [in Russian]
7. Borisov Yu.S. Gazotermicheskie pokry'tiya iz poroshkovy'x materialov [Gas-thermal Coatings Made of Powder Materials] / Yu.S. Borisov — Kiev: Naukova dumka, 1987. — 543 p. [in Russian]
8. Klinkov S.V. Nanesenie metodom xolodnogo gazodinamicheskogo napy'leniya kompozicionny'x pokry'tij [Cold Spraying of Composite Coatings]. / S.V. Klinkov, V.F. Kosarev, A.S. Zhelnina // Vestnik PNIPIU. Ae'rokosmicheskaya texnika [PNRPU Aerospace Engineering Bulletin]. — 2016. — 47. — p. 135-153. — DOI: 10.15593/2224-9982/2016.47.08 [in Russian]
9. Koktsinskaya E.M. Aging Tests of the High Current Aluminum-copper Contact Connections in the Iiter Busbar Systems. / E.M. Koktsinskaya, A.G. Roshal, V.M. Karpyshyn et al. // IEEE Transactions on Plasma Science. — 2014. — 3. — p. 482-488. — DOI: 10.1109/TPS.2013.2290703
10. Listy' iz alyuminiya i alyuminiev'y'x splavov. [Sheets Made of Aluminum and Aluminum Alloys.]. — Introduced 1977-07-01. — М.: Standartinform, 2008. — 30 p. [in Russian]
11. ДИМЕТ-405 – портативное универсальное оборудование. Руководство [DIMET-405 Is a Portable Universal Equipment. Manual] [Electronic source] // Metal Forum – All about Working with Metal. — 2012. — URL: <https://www.chipmaker.ru/files/file/7743/>. (accessed: 09.11.22) [in Russian]
12. Metally' i splavy'. Metod izmereniya tverdosti po Vikkersu [Metals and Alloys. Vickers Hardness Test by Diamond Pyramid]. — Introduced 1976-07-01. — М.: Gos. komitet SSSR po standartam, 1987. — 30 p. [in Russian]