

## ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ

УДК 621.793.79

<https://doi.org/10.26897/2687-1149-2024-6-63-70>

## Исследование адгезионной прочности напыленного покрытия для ремонта рабочей поверхности гильз цилиндров

**А.В. Чавдаров<sup>1</sup>, Ю.В. Катаев<sup>2✉</sup>, А.А. Мамедов<sup>3</sup>, Н.А. Попов<sup>4</sup>**

<sup>1,2,4</sup>Федеральный научный агротехнический центр ВИМ; г. Москва, Россия

<sup>3</sup>Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева; г. Москва, Россия

<sup>1</sup>info@firma-tom.ru; <https://orcid.org/0000-0002-9825-306X>

<sup>2</sup>ykataev@mail.ru✉; <https://orcid.org/0000-0003-0832-3608>

<sup>3</sup>aMamedov@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0003-3194-1930>

<sup>4</sup>mr.n.a.popov@gmail.com; <https://orcid.org/0009-0003-4148-7038>

**Аннотация.** Технология ремонта изношенных внутренних поверхностей гильз цилиндров с применением комбинированной технологии, включающей в себя холодное газодинамическое напыление алюминия с последующим микродуговым оксидированием, недостаточно изучена. С целью обоснования возможности применения холодного газодинамического напыления при ремонте гильз цилиндров исследован предел прочности на срез алюминиевого покрытия, нанесенного ХГДН на чугунный образец. Разработаны методика и оборудование для нанесения покрытия на внутреннюю поверхность цилиндра. В качестве образцов использовали цилиндры 10×30 из чугуна ВЧ40. Напыление порошка алюминия марки А-20-01 проводилось на установке ДИМЕТ-403 при режимах «2-2», «2-3», «3-2», «3-3». Предел прочности сцепления алюминиевого покрытия с чугуном при сдвиге определялся при продавливании образца (цилиндра с покрытием в виде напыленного пояска) через матрицу. Результаты испытаний на прочность показывают, что при режиме нагрева «2» (около 300°C) достигается наибольшая адгезионная прочность на срез по сравнению с другими режимами. Максимальная средняя прочность покрытия составила 11,99 МПа, что в 2,5 раза меньше, чем при нанесении порошка А-20-11 на сталь. Режим «2-3» позволяет напылить необходимый объем материала за меньшее время за счет большей скорости подачи порошка. Для обеспечения большей прочности и надежности покрытия рекомендованы режимы напыления «2-2» и «2-3» с расходом порошка, соответственно, 0,2 и 0,3 г/с. Разработанная технология позволяет наносить относительно прочные покрытия для восстановления гильз цилиндров. В результате исследований выявлены возможность восстановления цилиндров в номинальный размер и обеспечение высокой износостойкости их поверхности для любой модели двигателя.

**Ключевые слова:** двигатель, ресурс, холодное газодинамическое напыление, напыление, поверхность цилиндра, прочность покрытия, адгезионная прочность, предел прочности на срез, предел прочности сцепления

**Для цитирования:** Чавдаров А.В., Катаев Ю.В., Мамедов А.А., Попов Н.А. Исследование адгезионной прочности напыленного покрытия для ремонта рабочей поверхности гильз цилиндров // Агротехника. 2024. Т. 26, № 6. С. 63-70. <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2024-6-63-70>

## ORIGINAL PAPER

## Study of the adhesion strength of sprayed coating used to repair cylinder faces

**A.V. Chavdarov<sup>1</sup>, Yu.V. Kataev<sup>2✉</sup>, A.A. Mamedov<sup>3</sup>, N.A. Popov<sup>4</sup>**

<sup>1,2,4</sup>Federal Scientific Agroengineering Center VIM; Moscow, Russia

<sup>3</sup>Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy; Moscow, Russia

<sup>1</sup>info@firma-tom.ru; <https://orcid.org/0000-0002-9825-306X>

<sup>2</sup>ykataev@mail.ru✉; <https://orcid.org/0000-0003-0832-3608>

<sup>3</sup>aMamedov@rgau-msha.ru; <https://orcid.org/0000-0003-3194-1930>

<sup>4</sup>mr.n.a.popov@gmail.com; <https://orcid.org/0009-0003-4148-7038>

**Abstract.** Today, there is insufficient study on the technology of repair of worn cylinder faces with the use of combined technology, including cold gas dynamic spraying (CGDS) of aluminum followed by microarc oxidation. In order to justify the possibility of using cold gas dynamic spraying to repair cylinder liners, the authors

studied the shear strength of aluminum coating applied to cast iron sample by the CGDS method. The methodology and equipment for coating the cylinder face were developed. 10×30 cylinders made of BCh40 cast iron were used as samples. Aluminum powder of A-20-01 grade was sprayed on the DIMET-403 unit in modes “2-2”, “2-3”, “3-2”, “3-3”. The shear bond strength of the aluminum coating with cast iron was determined by pushing a sample (a cylinder with a sprayed belt coating) through a matrix. The results of strength tests have shown that heating mode “2” (about 300°C) achieves the highest shear adhesion strength compared to other modes. The maximum average strength of the coating was 11.99 MPa, which is 2.5 times less than when applying A-20-11 powder on steel. Under the “2-3” mode the required volume of material can be sprayed over less amount of time due to the higher powder feed rate. To ensure greater durability and reliability of the coating, the authors recommend spraying modes “2-2” and “2-3” with a powder flow rate of, respectively, 0.2 and 0.3 g/s. The developed technology produces relatively durable coatings for cylinder liner restoration. As a result, the study has revealed a possibility of restoring cylinders to nominal size and ensuring high wear resistance of their surface for any engine model.

**Keywords:** engine, service life, cold spray, spraying, cylinder surface, coating strength, adhesive strength, shear strength, ultimate adhesion strength

**For citation:** Chavdarov A.V., Kataev Yu.V., Mamedov A.A., Popov N.A. Study of the adhesion strength of sprayed coating used to repair cylinder faces. *Agricultural Engineering (Moscow)*. (In Russ.). 2024;26(6):63-70. <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2024-6-63-70>

## Введение

С поломкой двигателя связаны 36...52% всех отказов техники. Долговечность двигателя зависит от степени износа деталей цилиндропоршневой группы (ЦПГ), и особенно – от состояния гильз цилиндров. Ресурс ЦПГ при эксплуатации составляет не более 40% общего ресурса двигателя, что требует частой ее замены или восстановления [1-3]. Увеличить ресурс работы узла можно совмещением современных технологий диагностики остаточного ресурса ЦПГ с оптимальными технологиями ремонта [4].

Наиболее распространенные технологии ремонта гильз цилиндров: расточка под ремонтный размер, термообжатие и установка ремонтных деталей – имеют существенные недостатки. Термообжатие и расточка под ремонтный размер приводят к снижению износостойкости гильзы в связи с удалением с ее поверхности наиболее упрочненного слоя материала. Установка ремонтных деталей и термообжатие являются трудоемкими, требуют специфического прессового оборудования и применяются только в серийном производстве. Расточка под ремонтный размер требует закупки сменных поршневых колец ремонтного размера, что может вызвать некоторые трудности особенно для двигателей иностранного производства.

Современная технология ремонта цилиндров двигателей внутреннего сгорания (ДВС) должна обеспечивать наладку оборудования под любой типоразмер в единичном производстве, позволять восстановить цилиндр в номинальный размер и обеспечивать износостойкость не ниже, чем у новой детали.

Разработка новых способов восстановления гильз цилиндров ДВС обусловлена потребностью

промышленности в качественном ремонте и обеспечении лучших характеристик по сравнению с существующими методами.

Новый способ восстановления рабочей поверхности гильз цилиндров из любых материалов в номинальный размер предполагает нанесение покрытия по комбинированной технологии. Сначала на расточенную и предварительно подготовленную гильзу цилиндра с помощью холодного газодинамического напыления (ХГДН) наносится слой порошка алюминия, затем поверхность обрабатывается микродуговым оксидированием. После нанесения покрытия гильза механически обрабатывается в номинальный размер. Предполагается достижение долговечности работы гильзы цилиндров, не уступающей новой.

Применение технологии ХГДН с использованием мелкодисперсного порошка делает этот подход относительно экологичным благодаря высокой степени использования перерабатываемого сырья при производстве порошков [5] и возможности сбора и переработки не осевшего на поверхность порошка [6].

Комбинированное покрытие, полученное холодным газодинамическим напылением алюминия с последующим микродуговым оксидированием, – это способ нанесения защитного износостойкого покрытия на алюминиевые детали техники [7], способ антикоррозионной защиты и упрочнения стальной основы [8-10]. Для улучшения трибологических характеристик в пористую поверхность, полученную микродуговым оксидированием, предлагается внедрять твердые смазочные материалы [11], но нами не обнаружены данные по применению этого метода для ремонта ДВС. Поэтому авторы решили исследовать надежность работы ремонтного покрытия

в рамках ЦПГ по прочности покрытия на чугунной основе на срез. Износостойкость и теплопроводность данного ремонтного покрытия планируется рассмотреть в дальнейших исследованиях.

**Цель исследований:** определение предела прочности на срез покрытия, нанесенного ХГДН на основу из чугуна, с целью обоснования возможности применения данного способа при ремонте гильз цилиндров; разработка методики и оборудования для нанесения покрытия на внутреннюю поверхность цилиндра.

### Материалы и методы

При проведении испытаний руководствовались документом РД 10.003-2009<sup>1</sup>, предполагающим проплавление через матрицу образца – цилиндра с покрытием в виде напыленного пояска. В данном случае материал покрытия разрушается при действиях касательных напряжений, а сдвиг напряжения характеризует прочность соединения.

В качестве образца применяли цилиндр диаметром 10 мм и длиной 30 мм (рис. 1). Образцы изготавливали из чугуна ВЧ 40 ГОСТ 7293-85 «Чугун с шаровидным графитом для отливок. Марки». Анализ материалов, используемых для изготовления гильз, показал, что наиболее критичным для адгезионной прочности является сочетание «Чугун-алюминиевый порошок» [7, 8, 11]. На центральную часть образца наносили покрытие ХГДН в виде пояска с применением изогнутого сопла. Ширина напыленного пояска после проточки составляла  $2\pm0,1$  мм.

До напыления алюминия выполнялась предварительная очистка и проводилась подготовка (активация) поверхности заготовки при помощи пескоструйной обработки на установке ДИМЕТ 403. Использовался порошок К-00-04-16 при отсутствии нагрева.

При напылении использовался порошок А-20-01, в составе которого 80% алюминия и 20% корунда. Рабочее давление при напылении составляло 0,6...0,7 МПа и обеспечивало стабильное протекание ХГДН [12]. Напыление производилось при режимах «2-2», «2-3», «3-2», «3-3» (первая цифра отвечает за режим нагрева, а вторая – за расход порошка). Температурный режим «2» соответствует нагреву порошка до 300°C, а режим «3» – нагреву до 400°C. Расход порошка 0,2 г/с соответствует режиму «2», а расход 0,3 г/с – режиму «3». Режимы выбраны на основании выполненных ранее экспериментов и рекомендаций производителя по применению данного порошка.

<sup>1</sup> РД 10.003-2009. Геометрические параметры и физико-механические свойства поверхностей, образованных при электроискровой обработке материалов в газовой среде / Ф.Х. Бурумкулов, П.В. Сенин, А.В. Мартынов и др. М.: ГОСНИТИ, 2009. 56 с.

Образцы напылялись до получения пояска диаметром 12,5 мм. Для всех режимов время напыления составило от 4 до 6 мин при расстоянии от сопла до заготовки 8...10 мм. Во время напыления образцы вращались вокруг своей оси со скоростью 20 об/мин.

На каждом режиме было изготовлено по 3 образца (рис. 2). Ширина напыленного пояска составляла около 6 мм, а его толщина имела максимальный размер по центру и линейно уменьшалась к краям заготовки, образуя конусную поверхность.

После чистовой проточки все образцы проверялись на соответствие размеров чертежу (рис. 1) и отсутствие излишнего сопротивления при проходе через матрицу. Соединение «Образец без покрытия-матрица» образует посадку  $\text{Ø}10\frac{H7}{f6}$ . Образец без покрытия должен входить в матрицу свободно, без заеданий, чтобы исключить погрешность измерения, вызванную трением образца о внутреннюю цилиндрическую поверхность матрицы.

Испытание материалов на растяжение и сжатие в режиме статического нагружения в пределах собственных технических возможностей проводилось на машине И1147М-50-01-1.

С целью обеспечения точности измерений испытание образцов, полученных на одних и тех же режимах, повторялось трехкратно.

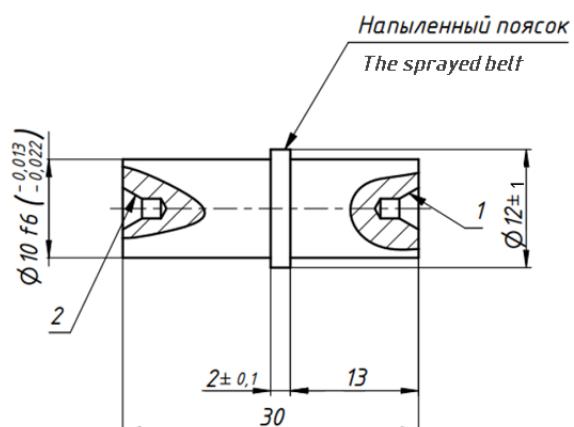


Рис. 1. Образец с покрытием

Fig. 1. Coated sample



Рис. 2. Заготовка образцов после напыления

Fig. 2. Sample preparation after spraying

Предел прочности сцепления покрытия с основным металлом при сдвиге ( $\tau$ , МПа) определяли по формуле:

$$\tau = \frac{P_p}{\pi \cdot D \cdot h}, \quad (1)$$

где  $P_p$  – максимальная нагрузка, предшествующая разрушению покрытия, Н;  $h$  – ширина пояска, мм;  $D$  – диаметр образца, мм.

Статистическая обработка результатов испытаний проводилась с помощью программы Microsoft Excel.

### Результаты и их обсуждение

Нанесение покрытия на внутреннюю цилиндрическую поверхность проводилось по методике, изложенной в работе [13]. Практически все гильзы цилиндров представляют собой тело вращения с относительно небольшим внутренним диаметром (60...120 мм). Стандартные сопла Лаваля для установок ХГДН являются неприменимыми для

напыления внутренней поверхности таких деталей, поэтому применяли специально изготовленное запатентованное изогнутое сопло (рис. 3), поворачивающее поток газа на 90° [14]. Сопло оснащено дополнительным соплом Лаваля 1, выполненном на базе стандартного наконечника сварочного полуавтомата, присоединенного к изогнутой трубке 2. Для подачи порошка сопло оснащено каналом порошкового питания 3. Сопло для ХГДН сконструировано таким образом, что подходит к любым пистолетам фирмы Димет 4.

Для достижения равномерного покрытия на рабочей поверхности гильзы рекомендуется использовать автоматизированные комплексы, позволяющие варьировать скорость вращения гильзы и обеспечивать равномерное перемещение сопла устройства вдоль поверхности детали с заданной скоростью. Пример такого комплекса представлен на рисунке 4. В автоматизированном комплексе вертикальная плоскость

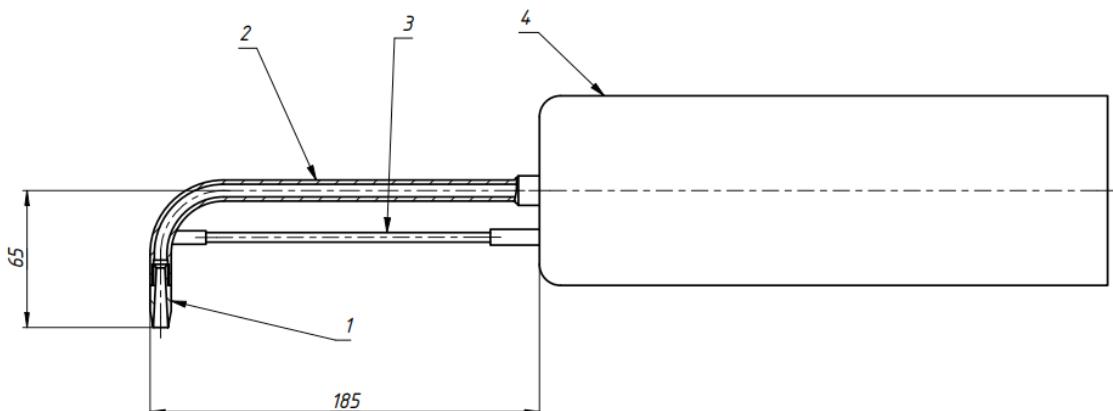


Рис. 3. Изогнутое сопло в сборе:

1 – дополнительное сопло Лаваля; 2 – изогнутая трубка; 3 – канал порошкового питания; 4 – напылитель

Fig. 3. Curved nozzle assembly

1 – additional Laval nozzle; 2 – curved tube; 3 – powder feed channel; 4 – sprayer

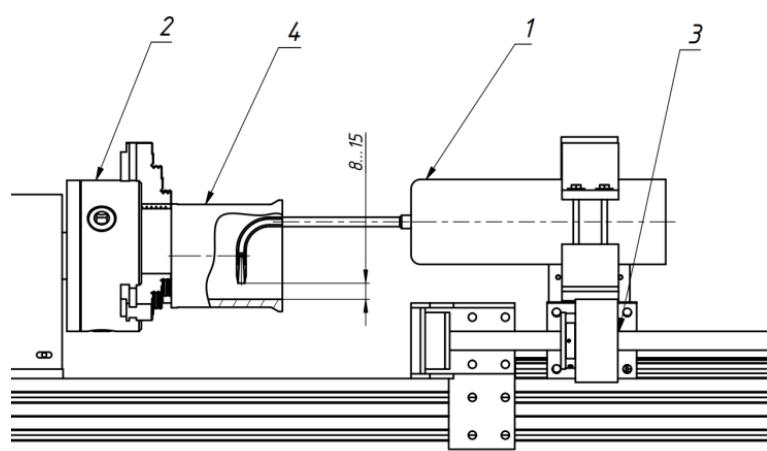


Рис. 4. Эскиз автоматизированного комплекса для ХГДН гильз цилиндров:

1 – напылитель; 2 – трехкулачковый патрон; 3 – шарико-винтовая передача; 4 – гильза цилиндра

Fig. 4. Diagram of an automated installation for CGDS of cylinder liners

1 – sprayer; 2 – three-jew chuck; 3 – ball screw; 4 – cylinder liner

симметрии напылителя с изогнутым соплом 1 совпадает с плоскостью вращателя с трехкулачковым патроном 2. Равномерное движение напылителя обеспечивается шарико-винтовой передачей 3, приводимой в движение шаговым двигателем. Гильза цилиндра 4 зажимается в патрон вращателя 2.

По результатам нагружения образцов по схеме, приведенной в описании эксперимента, были получены графики зависимости силы нагружения от времени (рис. 5). После разрушения напыленного пояска на графике отмечается спад усилия. Наибольшее зафиксированное усилие принималось за усилие разрушения. S-образная форма некоторых кривых нагружения объясняется особенностями работы прессового оборудования: сначала требовалось время для выхода на заданную скорость нагружения, в конце образец создавал сопротивление, замедляющее перемещение пуансона.

Для каждого образца были определены толщина напыленного пояска и сила его разрушения. По этим данным и формуле (1) определен предел прочности на срез покрытия (табл.).

Отметим, что предел прочности покрытия при напылении на тепловом режиме «2» в среднем больше, чем при напылении в режиме «3» (при большем разогреве порошка). Предположительно это связано с меньшей глубиной внедрения частиц порошка при ударении о чугунную подложку ввиду большей пластичности при нагреве. При этом увеличение расхода порошка не обязательно приводит к уменьшению прочности, как можно было предположить.

В работе [15] представлены результаты по испытаниям адгезионной прочности напыленного по аналогичной технологии покрытия порошка А-20-11 на цилиндрические образцы из стали. По результатам исследования адгезионная прочность достигала 29 МПа. Исследование отмечает важность большего нагрева порошка при напылении изогнутым соплом по сравнению с обычным прямым.

В данном исследовании была получена меньшая адгезионная прочность покрытия и падение прочности при большем нагреве порошка. Это может быть связано с различными свойствами материалов образца и разным составом порошка. Можно предположить, что различный профиль шероховатости на стали и чугуне ВЧ 40 после схожей пескоструйной обработки приводит к разнице в прочности анкерного зацепления напыленного слоя. Также содержание в порошке А-20-11 цинка (обычно более мягкого по сравнению с алюминием) может положительно влиять на адгезионную прочность. Однако добавление цинка делает микродуговое

оксидирование покрытия из порошка А-20-11 более затруднительным, что является существенным недостатком в предлагаемой технологии ремонта гильз цилиндров. Наличие данных о большей адгезионной прочности покрытия по стали делает актуальным дальнейшие исследования по расширению области применения технологии восстановления гильзы цилиндров из стали.

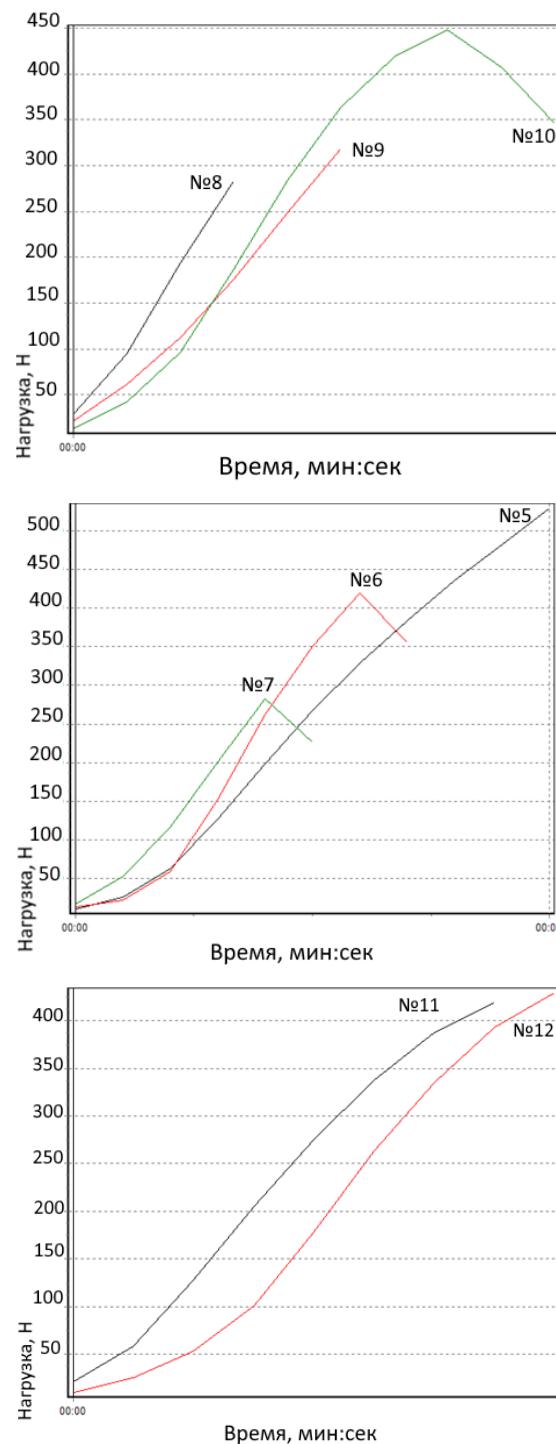


Рис. 5. Зависимость усилия нагружения образцов от времени

Fig. 5. Graph of the relationship between the loading force of samples and time

Таблица

## Результаты испытания на прочность покрытия на срез

Table

## Results of the shear strength test of coatings

№	Режим напыления Spraying mode	Толщина пояска, мм / Belt thickness, mm			Среднее Average	Сила разрушения, Н Force of destruction, N	Прочность покрытия, МПа Strength, MPa	Среднее значение прочности, МПа Average strength value, MPa				
		Измерение / Measurement										
		1	2	3								
1	2-2	2,02	2,01	2,02	2,02	760	12,00	11,99				
2	2-2	1,33	1,32	1,33	1,33	522	12,52					
3	2-2	1,38	1,39	1,39	1,39	499	11,45					
4	2-3	1,57	1,52	1,56	1,55	461	9,47	10,87				
5	2-3	1,42	1,4	1,41	1,41	529	11,94					
6	2-3	1,19	1,2	1,18	1,19	419	11,21					
7	3-2	1,14	1,17	1,16	1,16	283	7,79	7,14				
8	3-2	1,36	1,37	1,36	1,36	283	6,61					
9	3-2	1,47	1,44	1,42	1,44	318	7,01					
10	3-3	1,64	1,64	1,64	1,64	448	8,70	9,09				
11	3-3	1,36	1,37	1,38	1,37	419	9,74					
12	3-3	1,55	1,54	1,55	1,55	429	8,83					

Из соображений обеспечения большей прочности, а соответственно и надежности покрытия, рекомендуем режимы напыления «2-2» и «2-3» (табл.). Режим «2-3» может позволить напылить необходимый объем материала за меньшее время за счет большей скорости подачи порошка.

Полученные средние значения прочности покрытия на срез на всех режимах отвечают условиям работы цилиндропоршневой группы.

Исследования позволяют произвести расчет по возможности применения комбинированной технологии восстановления изношенной гильзы цилиндра для каждой модели отдельно.

## Выводы

Оптимальные режимы напыления алюминиевого порошка на чугунные образцы с использованием специального изогнутого сопла позволяют увеличивать предел прочности покрытия в 1,3...1,8 раза. Разработанная принципиальная схема оборудования позволяет восстанавливать геометрию внутренней поверхности гильзы цилиндров из любого металлического материала. Прочность покрытия на срез образцов на всех режимах отвечает условиям работы цилиндропоршневой группы.

## Список источников

1. Жачкин С.Ю., Живогин А.А. Гальваниконтактное желизнение как способ восстановления изношенной внутренней поверхности гильз цилиндров дизельных двигателей // Труды ГОСНИТИ. 2012. Т. 109, № 2. С. 72-76. EDN: PIBQFJ

2. Катаев Ю.В., Костомахин М.Н., Петрищев Н.А., Саяпин А.С., Молибоженко К.К. Повышение уровня технического обслуживания энергонасыщенной техники // Техника и обование для села. 2022. № 4 (298). С. 27-31. EDN: BMPALW

3. Черноиванов В.И., Денисов В.А., Соломашкин А.А. Способ определения остаточного ресурса деталей машин // Технический сервис машин. 2020. № 1 (138). С. 50-57. EDN: ZKSZUL

## References

1. Zhachkin S.Yu., Zhivogin A.A. Galvanic contact ironing as a way to restore the worn inner surface of diesel engine cylinder liners. *Trudy GOSNITI = Proceedings of GOSNITI*. 2012;109(2):72-76. (In Russ.)

2. Kataev Yu.V., Kostomakhin M.N., Petrishchev N.A., Sayapin A.S., Molibozhenko K.K. Increasing the level of maintenance of energy-saturated equipment. *Machinery and Equipment for Rural Area*. 2022;4:27-31. (In Russ.) <https://doi.org/10.33267/2072-9642-2022-4-27-31> (In Russ.)

3. Chernovivanov V.I., Denisov V.A., Solomashkin A.A. How to determine the remaining life of machine parts.

4. Черноиванов В.И., Денисов В.А., Катаев Ю.В., Соломашкин А.А. Новая стратегия технического обслуживания и ремонта машин // Техника и оборудование для села. 2021. № 9 (291). С. 33-36. <https://doi.org/10.33267/2072-9642-2021-9-33-36> EDN: DQBNRT
5. Зуевский В.А., Задорожный Р.Н., Романов И.В. Использование порошковых материалов в технологиях восстановления и упрочнения деталей сельскохозяйственной техники // Технический сервис машин. 2021. № 4 (145). С. 180-190. <https://doi.org/10.22314/2618-8287-2021-59-4-180-190> EDN: AYCNNA
6. Dorokhov A.S., Denisov V.A., Zadorozhny R.N., Romanov I.V., Zuevskiy V.A. The tribotechnical properties of electro-sparks with a secondary bronze coating. *Coatings*. 2022;12(3). <https://doi.org/10.3390/coatings12030312>
7. Кузнецов Ю.А., Марков М.А., Кравченко И.Н., Красиков А.В., Величко С.А., Чумаков П.В., Кулаков К.В. Технологические аспекты определения температуры в металле при формировании покрытий методом гетерофазного переноса и микродугового оксидирования // Электронная обработка металлов. 2021. Т. 57, № 1. С. 70-74. <https://doi.org/10.5281/zenodo.4455849>
8. Кузнецов Ю.А., Марков М.А., Красиков А.В., Быстров Р.Ю., Беляков А.Н., Быкова А.Д., Макаров А.М., Фадин Ю.А. Формирование износостойких и коррозионностойких керамических покрытий комбинированными технологиями напыления и микродугового оксидирования // Журнал прикладной химии. 2019. Т. 92, № 7. С. 819-826. EDN: QNDAIM
9. Ипатов А.Г., Ерохин М.Н., Казанцев С.П., Дородов П.В., Малинин А.В. Физико-механические свойства керамических покрытий, получаемых короткоимпульсной лазерной наплавкой порошковой смеси на основе бора // Агронженерия. 2023. Т. 25, № 1. С. 71-76. <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2023-1-71-76>
10. Кравченко И.Н., Закарчевский О.В., Катаев Ю.В., Коломейченко А.А. Оценка остаточных напряжений и прочности покрытий повышенной толщины при послойном их формировании // Труды ГОСНИТИ. 2017. Т. 127. С. 171-175. EDN: YRTQUD
11. Быкова А.Д., Марков М.А. Повышение износостойкости деталей машин методом микродугового оксидирования // Нанофизика и наноматериалы: Сборник научных трудов Международного симпозиума, посвященного 110-летию В.Б. Александровского и 115-летию Л.А. Сена, Санкт-Петербург, 23-24 ноября 2022 г. Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский горный университет, 2022. С. 73-80. EDN: VDCBHQ
12. Чавдаров А.В., Толкачев А.А. Восстановление внутренних поверхностей цилиндрических деталей малых диаметров холодным газодинамическим напылением // Технический сервис машин. 2020. № 3 (140). С. 128-136. EDN: YISKJJ
13. Чавдаров А.В., Денисов В.А. Кинетика роста МДО-покрытия при вневанном процессе // Агронженерия. 2021. № 4 (104). С. 33-40. <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2021-4-33-40>
14. Устройство для газодинамического нанесения покрытий на внутренние поверхности цилиндрических деталей: Патент RU2714002 С1, МПК C23C24/04(2006.01), C23C4/12(2006.01), B05B7/14(2006.01) / А.В. Чавдаров, А.В. Валяйчиков, А.А. Толкачев; заявл. 02.09.2019; опубл. 11.02.2020, Бюл. № 5. EDN: RESTBS
15. Чавдаров А.В., Толкачев А.А. Новые технологические решения для восстановления внутренней поверхности гидроцилиндров // Аграрная наука. 2021. № 354 (11-12). С. 166-170. <https://doi.org/10.32634/0869-8155-2021-354-11-12-166-170>
- Machinery Technical Service. 2020;1(138):50-57. (In Russ.) <https://doi.org/10.22314/2618-8287-2020-58-1-50-57>
4. Chernoivanov VI., Denisov V.A., Kataev Yu.V., Solomashkin A.A. A new strategy for maintenance and repair of machines. *Machinery and Equipment for Rural Area*. 2021;9:33-36. (In Russ.) <https://doi.org/10.33267/2072-9642-2021-9-33-36>
5. Zuevskiy V.A., Zadorozhniy R.N., Romanov I.V. The use of powder materials in technologies of restoration and hardening of agricultural machinery parts. *Machinery Technical Service*. 2021;4:180-190. (In Russ.) <https://doi.org/10.22314/2618-8287-2021-59-4-180-190>
6. Dorokhov A.S., Denisov V.A., Zadorozhny R.N., Romanov I.V., Zuevskiy V.A. The tribotechnical properties of electro-sparks with a secondary bronze coating. *Coatings*. 2022;12(3). <https://doi.org/10.3390/coatings12030312>
7. Kuznetsov Yu.A., Markov M.A., Kravchenko I.N., Krasikov A.V., Velichko S.A., Chumakov P.V., Kulakov K.V. Technological aspects of estimation of temperature in metals when forming coatings by heterophase transfer and microarc oxidation. *EOM = Elektronnaya Obrabotka Materialov*. 2021;57(1):70-74. (In Russ.) <https://doi.org/10.5281/zenodo.4455849>
8. Kuznetsov Yu.A., Markov M.A., Krasikov A.V., Bystrov R. Yu., Belyakov A.N., Bykova A.D., Makarov A.M., Fadin Yu.A. Formation of wear-and corrosion-resistant ceramic coatings by combined technologies of spraying and micro-arc oxidation. *Russian Journal of Applied Chemistry*. 2019;92(7):819-826. (In Russ.) <https://doi.org/10.1134/S0044461819070016>
9. Ipatov A.G., Erokhin M.N., Kazantsev S.P., Dorodov P.V., Malinin A.V. Physico-mechanical properties of ceramic coatings obtained by short-pulse laser surfacing of a boron-based powder mixture. *Agricultural Engineering (Moscow)*. 2023;25(1):71-76. (In Russ.). <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2023-1-71-76>
10. Kravchenko I.N., Zakarchevskiy O.V., Kataev Yu.V., Kolomeichenko A.A. Assessment of residual stresses and strength of coatings with increased thickness during their layer-by-layer depositing. *Trudy GOSNITI = Proceedings of GOSNITI*. 2017;127:171-175. (In Russ.)
11. Bykova A.D., Markov M.A. Increasing the wear resistance of machine parts by microarc oxidation. *Nanophysics and Nanomaterials: Proceedings of the International Symposium dedicated to the 110th anniversary of V.B. Aleskovsky and the 115th anniversary of L.A. Sena* St. Petersburg, November 23-24, 2022. St. Petersburg: St. Petersburg Mining University, 2022. Pp. 73-80. (In Russ.)
12. Chavdarov A.V., Tolkachev A.A. Restoration of internal surfaces of cylindrical parts of small diameters by cold gas-dynamic spraying. *Machinery Technical Service*. 2020;3:128-136. <https://doi.org/10.22314/2618-8287-2020-58-3-128-136> (In Russ.)
13. Chavdarov A.V., Denisov V.A. Kinetics of the microarc oxidation coating growth in the no-bath process. *Agricultural Engineering*. 2021;4:33-40. (In Russ.). <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2021-4-33-40>
14. Chavdarov A.V., Valyaichikov A.V., Tolkachev A.A. Device for gas-dynamic application of coatings on cylindrical parts inner surfaces: patent No. 2714002 Russian Federation, IPC C23C24/04 (2006.01), C23C4/12 (2006.01), B05B7/14 (2006.01); 2020. (In Russ.)
15. Chavdarov A.V., Tolkachev A.A. New technological solutions for restoring the inner surface of hydraulic cylinders. *Agrarian Science*. 2021;354(11-12):166-170. (In Russ.) <https://doi.org/10.32634/0869-8155-2021-354-11-12-166-170>

**Информация об авторах**

- Анатолий Валентинович Чавдаров<sup>1</sup>,** канд. техн. наук, ведущий научный сотрудник; [info@firma-tom.ru](mailto:info@firma-tom.ru); <https://orcid.org/0000-0002-9825-306X>
- Юрий Владимирович Катаев<sup>2</sup>**, канд. техн. наук, доцент, ведущий научный сотрудник; [ykataev@mail.ru](mailto:ykataev@mail.ru); <https://orcid.org/0000-0003-0832-3608>
- Азер Агабала Оглы Мамедов<sup>3</sup>,** д-р филос. наук, доцент; [aMamedov@rgau-msha.ru](mailto:aMamedov@rgau-msha.ru), <https://orcid.org/0000-0003-3194-1930>
- Никита Александрович Попов<sup>4</sup>,** аспирант, инженер; [mr.n.a.popov@gmail.com](mailto:mr.n.a.popov@gmail.com); <https://orcid.org/0009-0003-4148-7038>
- <sup>1,2,4</sup> Федеральный научный агротехнологический центр ВИМ; 109428, Российская Федерация, г. Москва, 1-й Институтский проезд, д. 5
- <sup>3</sup> РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева; 127434, Российская Федерация, г. Москва, Тимирязевская, д. 49

**Вклад авторов**

А.В. Чавдаров – руководство исследованием, создание окончательной версии (доработка) рукописи и ее редактирование, ресурсы;

Ю.В. Катаев – концептуализация, методология;

А.А.О. Мамедов – табличное и графическое представление результатов;

Н.А. Попов – создание черновика рукописи, проведение исследования, визуализация.

**Конфликт интересов**

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов и несут ответственность за plagiat

**Статья поступила в редакцию 15.04.2024; поступила после рецензирования и доработки 16.10.2024; принята к публикации 30.10.2024**

**Author Information**

- Anatoly V. Chavdarov<sup>1</sup>,** CSc (Eng), Lead Research Engineer; [info@firma-tom.ru](mailto:info@firma-tom.ru); <https://orcid.org/0000-0002-9825-306X>
- Yuri V. Kataev<sup>2</sup>**, CSc (Eng), Lead Research Engineer; [ykataev@mail.ru](mailto:ykataev@mail.ru); <https://orcid.org/0000-0003-0832-3608>
- Azer A. Mamedov<sup>3</sup>,** DSc (Philosophy); [aMamedov@rgau-msha.ru](mailto:aMamedov@rgau-msha.ru), <https://orcid.org/0000-0003-3194-1930>
- Nikita A. Popov<sup>4</sup>,** postgraduate student, engineer; [mr.n.a.popov@gmail.com](mailto:mr.n.a.popov@gmail.com); <https://orcid.org/0009-0003-4148-7038>
- <sup>1,2,4</sup> Federal Scientific Agroengineering Center VIM; 1st Institutsky Proezd Str., 5, Moscow, 109428, Russian Federation
- <sup>3</sup> Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy, Timiryazevskaya Str., 49, Moscow, 127434, Russian Federation

**Author Contribution**

A.V. Chavdarov – research supervision, writing – finalizing (revising and editing) of the manuscript, resources.

Yu.V. Kataev – conceptualization, methodology.

A.A.O. Mamedov – tabular and graphical visualization of results.

N.A. Popov – writing – original draft preparation, research, visualization.

**Conflict of interests**

The authors declare that there is no conflict of interest and are responsible for plagiarism

**Received 15.04.2024; Revised 16.10.2024; Accepted 30.10.2024.**