УДК 621.7-4

https://doi.org/10.32634/0869-8155-2021-354-11-12-166-170

Оригинальное исследование/Original research

**Чавдаров А.В.,**
**Толкачев А.А.**

*ФГБНУ ФНАЦ ВИМ, Москва, 1-й Институтский проезд, д. 5, 109428*
*E-mail: info@firma-tom.ru*

***Ключевые слова:*** гидроцилиндры, газодинамическое напыление, адгезия и когезия, технологические режимы

***Для цитирования:*** Чавдаров А.В., Толкачев А.А. Новые технологические решения для восстановления внутренней поверхности гидроцилиндров. Аграрная наука. 2021; 354 (11–12): 166–170.

https://doi.org/10.32634/0869-8155-2021-354-11-12-166-170

***Конфликт интересов отсутствует***

# Новые технологические решения для восстановления внутренней поверхности гидроцилиндров

**РЕЗЮМЕ**

**Актуальность.** Сельскохозяйственные машины широко используют гидроцилиндры для различных вспомогательных и рабочих движений. Эксплуатация в тяжелых условиях полевых работ приводит к выходу из строя зеркала гидроцилиндра и, как следствие, к потере усилия на штоке цилиндра. Разработка технологических решений по восстановлению внутренней поверхности как более целесообразного решения в ремонтном производстве является актуальной.

**Методы.** Проведены исследования теплового потока с помощью тепловизора «Fluke Ti32» и влияния режимов газодинамического напыления (ГДН)на адгезионную и когезионную прочность при использовании новой конструкции сопловой части оборудования для ГДН.

**Результаты.** Установлена пригодность использованияновой конструкции сопла для ГДН с целью восстановления внутренней поверхности корпуса гидроцилиндра. Удлиненное и изогнутое сопло для установок типа «Димет» практически не меняет температурный режим напыления. Адгезионная и когезионная прочность получаемых покрытий при новой конструкции сопла достаточна для работы в условиях, характерных для внутренней поверхности корпуса гидроцилиндра.

**Anatoly V. Chavdarov,**
**Alexey A.Tolkachev**

*FGBNU FNAC VIM, Moscow, 1st Institutsky proezd, 5, 109428*
*E-mail: info@firma-tom.ru*

***Key words:*** hydraulic cylinders, gas dynamic spraying, adhesion and cohesion, technological modes

***For citation:*** 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

***There is no conflict of interests***

# New technological solutions for restoring the inner surface of hydraulic cylinders

**ABSTRACT**

**Relevance.** Agricultural machines widely use hydraulic cylinders for various auxiliary and working movements. Operation in harsh field conditions leads to the failure of the hydraulic cylinder mirror and, as a result, to the loss of force on the cylinder rod. The development of technological solutions for the restoration of the inner surface as a more appropriate solution in repair production is relevant.

**Methods.** Studies of the heat flow using the “Fluke Ti32” thermal imager and ofthe influence of gas-dynamic spraying (GDS) modes on the adhesive and cohesive strength when using a new design of the nozzle part of the GDS equipment were carried out.

**Results.** The suitability of usage of new nozzle design for GDS in order to restore the inner surface of the hydraulic cylinder body has been established. The elongated and curved nozzle for installations of the “Dimet” type practically does not change the temperature regime of spraying. The adhesive and cohesive strength of the coatings obtained with the new nozzle design is sufficient to operate under conditions characteristic of the inner surface of the hydraulic cylinder body.

Поступила: 14 сентября
После доработки: 22 сентября
Принята к публикации: 30 сентября

Received: 14 September
Revised: 22 September
Accepted: 30 september

**Введение**

Газотермическое напыление относится к группе классических ресурсо- и энергосберегающих технологий. Применять газотермические покрытия выгодно при любых масштабах производства. Сам процесс газотермического напыления включает в себя несколько видов: газопламенное напыление, в том числе и высокоскоростное, детонационное напыление, плазменное напыление с оплавлением и без, электродуговую металлизацию, газодинамическое напыление. Общими для всех методов является то, что материал покрытия нагревается, распыляется и ускоряется в высокотемпературном газовом потоке.

Среди многих технологических процессов восстановления гильз деталей типа «цилиндр» заслуживает внимания метод газодинамического напыления [1–5].

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 образования прочного металлического слоя при «набегании» двухфазного сверхзвукового потока на поверхность подложки за счет образования адгезионных связей между деформированной частицей и подложкой [6–9].

Применительно к рассматриваемой в данной работе проблеме восстановления внутренней поверхности корпуса гидроцилиндра следует прежде всего рассматривать линейные размеры обрабатываемой поверхности и, в связи с этим, возможность использования того или иного оборудования для напыления. В настоящее время важнейшим направлением исследований является разработка материалов для пар трения и технологий их применения. Основными материалами для получения металлических антифрикционных покрытий являются сплавы системы Al-Sn [10, 11].

Основными параметрами процесса напыления являются: скорость и температура гетерофазного потока, концентрация порошка в потоке (расход порошкового материала). Расчеты, проведенные производителем оборудования «Димет» для ХГДН, подтвердили достаточно высокую эффективность использования сопел с размером критического сечения 4 мм и длиной 120 мм для целей ускорения частиц алюминия размером 5–30 мкм. Скорость выхода воздушного потока достигает 600–800 м/с. Изменение геометрии и конструкции сопла для использования ХГДН при восстановлении внутренней поверхности корпуса гидроцилиндра требует проверки как температурных характеристик гетерофазного потока, так и анализа адгезионной и когезионной прочности получаемых покрытий.

**Методика**

Для проведения исследований использовался серийно выпускаемый аппарат для ХГДН «Димет-403», позволяющий ступенчатое регулирование количества подаваемого порошка и температуры нагрева воздуха. Измерение теплового потока проводилось с помощью тепловизора «Fluke Ti32». Для измерения адгезионной и когезионной прочности выполнялось напыление порошка марки А-20-11 на цилиндрический образец. После механической обработки на испытательной машине «Инстрон» определены значения усилия разрушения покрытия и вычислены значения адгезии и когезии на разных режимах напыления.

**Результаты**

Напыление оборудованием «Димет» внутренней поверхности цилиндра возможно только при удлинении сопловой части пистолета на 150–250 мм с поворотом потока на 900 (рис. 1).

Гетерофазный поток, который будет проходить дополнительный путь по насадке и поворачивать свою траекторию движения, по известным физическим причинам потеряет и скорость, и температуру. Для сохранения температурного режима насадка была обмотана слоем асбеста. Потерю в скорости потока решено компенсировать дополнительным соплом Лаваля.

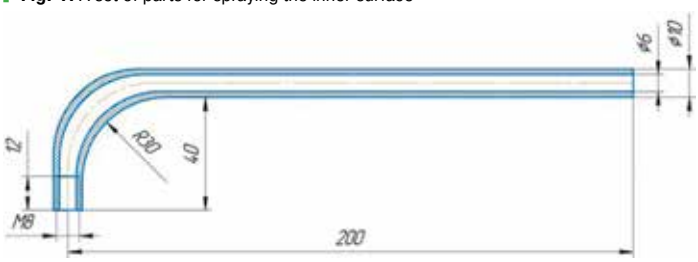
По рекомендациям производителя оборудования напыление порошка марки А-20-11 следует производить на режимах: нагрев при положении переключателя на корпусе «Димета» в положении 3, 4 и 5 и подача порошка при положении переключателя в положении 3 и 4 (количество подаваемого порошка). На подрисуночных надписях и в тексте далее фразу «режим 5–3» следует читать как «температурный режим 5 и подача порошка 3».

Основное внимание при сравнительном исследовании температурных полей было уделено зоне выхода гетерофазной смеси из сопла. При значительном понижении ее на выходе из изогнутого сопла микрочастицы алюминиевого порошка могут потерять пластичность, что приведет к значительному снижению как адгезии покрытия с основным материалом, так и когезии (сцеплении частиц между собой).

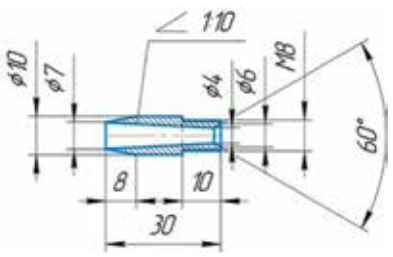
Некоторые результаты измерения температурных полей для различных режимов напыления представлены на рис. 2.

Для получения достоверных результатов измерение на одних и тех же режимах проводилось по 3 раза. Полученные данные по температуре были обработаны и сводные результаты представлены в виде графика зависимости температуры от места измерения и режимов напыления (рис. 3).

**Рис. 1.** Комплект деталей для напыления внутренней поверхности
**Fig. 1.** A set of parts for spraying the inner surface



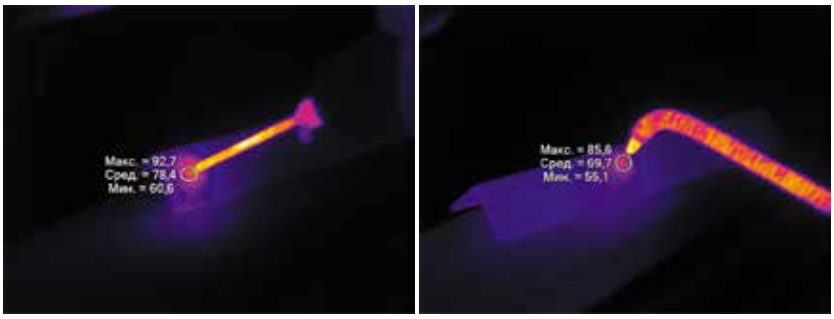

Насадка на оборудование «Димет»



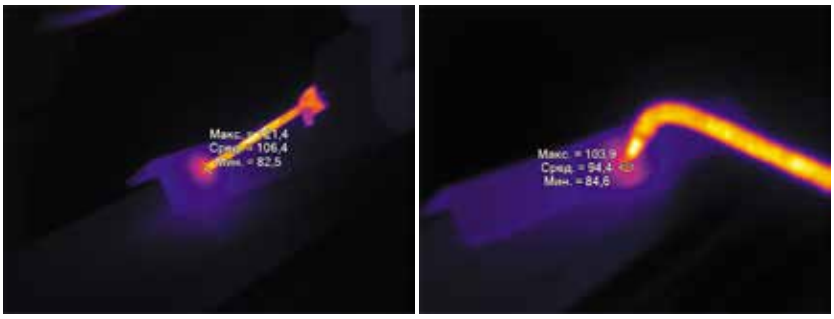

Дополнительное сопло Лаваля

**Рис. 2.** Результаты измерения температуры воздушного потока на выходе из сопла для различных режимов напыления

**Fig. 2.** Results of measuring the temperature of the air flow at the outlet of the nozzle for various spraying modes



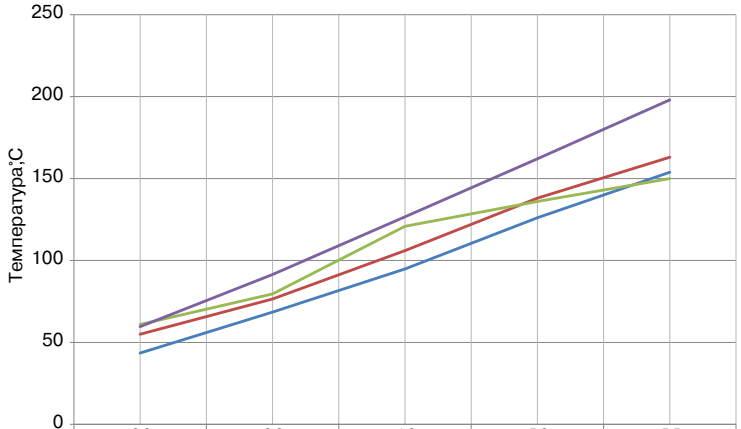

Режим 4-3




Режим 5-3

**Рис. 3.** Графики зависимости температуры порошка от конструкции сопла и режимов: ряд 1 — сопло стандартное — начало сопла; ряд 2 — сопло стандартное — конец сопла; ряд 3 — сопло изогнутое — начало сопла; ряд 4 — сопло изогнутое — конец сопла

**Fig. 3.** Graphs of the dependence of the powder temperature on the nozzle design and modes: row 1 — standard nozzle — the beginning of the nozzle; row 2 — standard nozzle — the end of the nozzle; row 3 — curved nozzle — the beginning of the nozzle; row 4 — curved nozzle — the end of the nozzle




| Режим | 2.3 | 3.3 | 4.3 | 5.3 | 5.5 |
|---|---|---|---|---|---|
| Ряд 1 | 43,5 | 68,5 | 94,8 | 126 | 153,8 |
| Ряд 2 | 55 | 76,5 | 106 | 138 | 163 |
| Ряд 3 | 61 | 79,6 | 120,8 | 136 | 150 |
| Ряд 4 | 59,6 | 91,4 | 126,6 | 162 | 198 |

Расстояние от среза сопла, мм

Анализ полученных данных по распределению температуры показывает правильность выбранного конструктивного решения изогнутого сопла. Незначительное (на 10%) уменьшение температуры гетерофазного потока на выходе из изогнутого сопла не должно сильно повлиять на качество напыляемого покрытия.

При напылении возникает взаимодействие между напыляемыми частицами и поверхностью основы (адгезия) и между напыляемыми частицами и частицами уже нанесенного слоя (когезия). Испытания на адгезионную и когезионную прочность покрытия проводились на цилиндрических образцах, подготовленных механической обработкой. После напыления образцы обрабатывались на токарном станке для получения цилиндрического пояска. Для испытаний на когезионную прочность на образце была выполнена канавка шириной 4 мм. На одинаковых режимах были выполнены по 3–4 эксперимента. Точность измерения усилия отрыва составляла 1 Н. Результаты сведены в общие таблицы.

Эксперименты по определению наиболее благоприятных режимов напыления по массе осажденного металла показали, что как для стандартного сопла, так и для изогнутого существуют режимы, при которых не рекомендуется вести процесс напыления. При увеличении температуры нагрева воздуха до максимального значения как для стандартного сопла, так и для изогнутого визуально наблюдалось «выдувание» частиц порошка из зоны напыления. На поверхности можно было наблюдать покрытие в виде кратеров. Это можно объяснить высокой температурой нагрева частиц и высокой скоростью их полета. Температурный режим 5 был исключен при дальнейших исследованиях. Увеличение количества подаваемой массы порошка при одних и тех же температурных режимах приводит к увеличению массы осажденного покрытия для обеих конструкций сопла. Однако визуально по качеству покрытия можно отметить, что для изогнутого сопла требуется более высокая температура нагрева.

Наиболее предпочтительными режимами для напыления стандартным соплом являются 3.3, 3.4, 4.3, 4.4. Для изогнутого сопла — 3.5, 4.4, 4.5. Данные режимы были использованы при напылении образцов для испытаний на адгезионную и когезионную прочность покрытия. Результаты испытаний приведены в таблицах 1 и 2.

Анализ результатов показывает, что полученные значения адгезионной прочности покрытий для стандартного сопла полностью соответствуют опубликованным данным из литературных источников для аналогичных условий испытаний. Для изогнутого сопла можно было предположить низкое значение адгезионной прочности при режимах 3.3 по результатам измерения температуры на выходе сопла и низким значениям напыляемой массы. На наиболее оптимальных для данного сопла режимах 4.3 и 4.4 значение адгезионной прочности на 10–15% ниже, чем у стандартного сопла. Это объясняется потерей кинетической энергии частиц алюминия при прохождении по

*Таблица 1.* **Сводная таблица результатов испытаний на адгезионную прочность (∅ образца – 9,97)**

*Table 1.* **Summary table of adhesive strength test results (sample ∅ – 9.97)**

| Режим (температура, подача) | № обр. | Вид сопла | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | | сопло стандартное | | сопло изогнутое | |
| | | усилие разрыва *F*, Н | адгезия α, МПа | усилие разрыва *F*, Н | адгезия α, МПа |
| 3.3 | 1 | 2275 | 38 | 941 | 12 |
| | 2 | 3001 | 46,5 | - | - |
| | 3 | 2844 | 44 | - | - |
| 3.4 | 1 | 3040 | 48 | - | - |
| | 2 | 1804 | 35 | - | - |
| | 3 | 1706 | 35 | - | - |
| 4.3 | 1 | 716 | 17 | 1324 | 18 |
| | 2 | 981 | 19 | 1265 | 22 |
| | 3 | 3020 | 50,5 | - | - |
| 4.4 | 1 | 2344 | 43 | 2687 | 39 |
| | 2 | 775 | 14 | 1392,5 | 22 |
| | 3 | 1628 | 28 | 1414 | 27 |
| | 4 | 3177 | 51 | - | - |
| | 5 | 3521 | 60 | - | - |

*Таблица 2.* **Сводная таблица результатов испытаний на когезионную прочность (∅ образца – 9,97)**

*Table 2.* **Summary table cohesive strength test results (sample ∅ – 9.97)**

| Режим (температура, подача) | № обр. | Вид сопла | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | | сопло стандартное | | сопло изогнутое | |
| | | усилие разрыва *F*, Н | адгезия α, МПа | усилие разрыва *F*, Н | адгезия α, МПа |
| 3.3 | 1 | 3020 | 68 | - | - |
| | 2 | не раз. | | - | - |
| | 3 | 4040 | 69 | - | - |
| 3.4 | 1 | 4021 | 70 | - | - |
| | 2 | 3766 | 80 | - | - |
| | 3 | 4119 | 62 | - | - |
| 3.5 | 1 | 7688 | 122 | 2984 | 45 |
| | 2 | 7453 | 96 | 1804 | 38 |
| | 3 | 7453 | 102 | 2197 | 35 |
| 4.3 | 1 | не раз. | | - | - |
| | 2 | не раз. | | - | - |
| | 3 | не раз. | | - | - |
| 4.4 | 1 | не раз. | | 2295 | 34 |
| | 2 | 2903 | 65 | 2432 | 33 |
| | 3 | не раз. | | - | - |
| | 4 | 1706 | 39 | - | - |
| | 5 | 5001 | 112 | - | - |
| 4.5 | 1 | 3442 | 63 | 2197 | 41 |
| | 2 | 5884 | 78 | 2314 | 37,5 |
| | 3 | 1569 | 27 | 2667 | 44 |

длинному и изогнутому соплу. Однако полученные значения адгезионной прочности укладываются в интервал значений, пригодных для эксплуатации.

Когезионная прочность при напылении на стальную подложку алюминиевого порошка всегда выше адгезионной. Здесь имеют место не только зацепления так называемого «анкерного» типа, но и химическое взаимодействие между частицами. Это наглядно показывают и проведенные нами испытания.

Величина когезионной прочности для изогнутого сопла на 15–20% ниже, чем для стандартного сопла. Причиной является указанная выше потеря скорости при движении порошка по соплу. Полученные значения полностью удовлетворяют условиям эксплуатации изделий.

**Выводы**

1. Удлиненное и изогнутое сопло для установок типа «Димет» практически не меняет температурный режим напыления.

2. Удлинение пути прохождения гетерофазного потока через изогнутое сопло приводит к уменьшению скорости истечения потока, что обуславливает необходимость увеличения температуры нагрева воздушного потока.

3. Адгезионная и когезионная прочность получаемых покрытий при новой конструкции сопла достаточны для работы в условиях, характерных для гидроцилиндров.

4. Новая конструкция сопла позволяет выполнить восстановление внутренней поверхности корпуса гидроцилиндра диаметром от 80 мм.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES


1. Алхимов А.П., Клинков С.В., Косарев В.Ф., Фомин В.М. Холодное газодинамическое напыление. – Новосибирск: Физматлит, 2010. - 536 с. [Alkhimov A.P., Klinkov S.V., Kosarev V.F., Fomin V.M. Cold gas dynamic spraying. - Novosibirsk: Fizmatlit, 2010. – 536 (in Rus.)].

2. 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 [Лю З.К., Цзэн М.К., Гао Ю., Чжу М. Значительное улучшение износостойких свойств за счет создания микро/нанодуальной структуры в сплавах Al–SN // Износ. - 2012. - С. 469–478 (in Eng.)].

3. Клюев О. Ф., Каширин А. И., Шкодкин А.В. Технология газодинамического нанесения металлических покрытий // Сварщик. - 2003. - Т. 4. - № 32. - С. 25–27 [Klyuev O. F., Kashirin A. I., Shkodkin A.V. Technology of gas-dynamic application of metal coatings // Welder. - 2003. - Vol. 4. - No. 32. - pp. 25-27 (in Rus.)].

4. Каширин А.И. и др. Способ создания слоистых изделий объемной прерывистой формы. Патент № 2038399, 1993 [Kashirin A.I. et al. A method for creating layered products of volumetric discontinuous shape. Patent No. 2038399, 1993 (in Rus.)].

5. Коровин А.Я., Хромов В.Н. Оборудование для сверхзвукового газопламенного напыления покрытий // Сборник научных трудов РГАЗУ. - 2000. - С. 183–186. [Korovin A.YA., Khromov V.N. Equipment for supersonic flame spraying of coatings // Collection of scientific papers of RGAZU. - 2000. - pp. 183-186 (in Rus.)].

6. 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. [Tushinsky L.I., Alkhimov A.P., Kosarev V.F., Plokhov A.V., Mochalina N.S. Structure and properties of aluminum coatings applied by cold gas dynamic spraying // Thermophysics and aeromechanics. - 2006. - Vol. 13. - No. 1. - pp. 141-145 (in Rus.)].

7. Геращенков 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. [Gerashchenkov D.A., Sholkin S.E., Yurkov M.A. Technologies for obtaining dispersed materials using the shock-disintegrator method and functional gradient coatings by supersonic cold gas-dynamic spraying and microplasma spraying // Materials of the 10th International scientific and practical conference "Technologies of repair, restoration and hardening of machine parts, mechanisms, equipment, tools and technological equipment". - 2008. - pp. 567-574 (in Rus.)].

8. Геращенков Д.А., Сомкова Е.А. Способ получения композитного порошка системы Al–Zn–Sn–Al2O3. Патент № 2434713, 2011. [Gerashchenkov D.A., Somkova E.A. Method of obtaining composite powder of the Al–ZN–SN–Al2O3 system. Patent No. 2434713, 2011 (in Rus.)].

9. Орыщенко А.С., Геращенков 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. [Oryshchenko A.S., Gerashchenkov D.A. Aluminum matrix functional coatings with high microhardness obtained from composite powders of the Al-SN+Al2O3 system by cold gas dynamic spraying // Questions of materials science. - 2015. - № 3(83). - Pp. 100-107 (in Rus.)].

10. 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. [Panin S.V., Alkhimov A.P., Klimenov V.A. Investigation of the effect of adhesive strength on the nature of the development of plastic deformation at the meso-level of compositions with gas-dynamically sprayed coatings // Physical mesomechanics. - 2000. - Vol. 3. - No. 4. - pp. 97-106 (in Rus.)].

11. Геращенков Д.А., Фармаковский Б.В. Износо-коррозионно-стойкий сплав на основе алюминия для наноструктурированных покрытий // Патент № 2413024. - 2011. [Gerashchenkov D.A., Farmakovsky B.V. Wear-corrosion-resistant aluminum-based alloy for nanostructured coatings // Patent No. 2413024. – 2011 (in Rus.)].


## ОБ АВТОРАХ:


**Чавдаров Анатолий Валентинович,** кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник

**Толкачев Алексей Александрович,** младший научный сотрудник


## ABOUT THE AUTHORS:


**Chavdarov Anatoly Valentinovich,** Candidate of Technical Sciences, Leading Researcher

**Tolkachev Alexey Alexandrovich,** Junior Researcher