

служебных характеристик хромистых сталей после оксидирования в контролируемой атмосфере // *Научно-технические технологии в машиностроении*. – 2013. – №9(27). – С. 3–11.

## REFERENCES

1. Lakhtin, Yu.M., Kogan, Ya.D. *Steel Nitride Hardening*. – M.: Mechanical Engineering, 1976. – pp. 256.
2. Lakhtin, Yu.M. *Oxy-nitride Hardening (Nitrooxynitride Hardening)* // *MiTOM*. – 1994. – No.9. – pp. 2-5.
3. Shestopalova, L.P. Regularities in *Interaction of Controlled Oxidative Media with Metals and Alloys and Their Impact upon Formation of Modified Layer at Nitride Hardening* // *MiTOM*. – 2010. – No.5. – pp-52.
4. Mirdel, G. *Electro-physics* / transl. from German. Under the editorship of V.I. Rakhovsky. – M.: Mir, 1972. – pp. 608.
5. Samsonov, G.V., Vinitsky, I.M. *Refractory Compounds: reference book*. – M.: Metallurgy, 1976 – pp. 556.

6. Lakhtin, Yu.M., Kogan, Ya.D. *Structure and Strength of Nitrided Alloys*. – M.: Metallurgy, 1982. – pp. 160.

7. Yakhmina, V.D., Nikitin, V.V. Hardness formation in nitrided layer // *Metallurgy and Thermal Treatment of Metals*. – 1975. – No.2. – pp. 28-32.

8. Edenhafer B. Einfluss der Nitrierdauern und der Stahlrussammensetzung auf die Hexte von Nitrierschichten / B. Edenhafer, H. Trenkler. // *Harter.- Nechnish. Mitt.*, 1980, v. 35, №5. pp. 220-229.

9. Kosolapov, G.F., Gerasimov, S.A. On structure of  $\alpha$ -phase of nitride layer of steel 38HMYuA and 1H13 // *Metallurgy and Thermal Treatment of Metals*. – 1973. – No.5 – pp. 71-72.

10. Shestopalova, L.P., Petrova, L.G. Exceeding operational characteristic of chromium steels after oxynitride hardening in controlled medium // *Science Intensive Technologies in Mechanical Engineering*. – 2013. – No.9(27). – pp. 3-11.

Рецензент д.т.н. Н.И. Баурова

УДК 621.9.047

DOI: 10.30987/article\_5ad8d290122ee0.34615800

Н.П. Гаар, к.т.н.

(Новосибирский государственный технический университет,  
Россия, 630073, г. Новосибирск, пр-т К.Маркса, 20)

E-mail: gaar@corp.nstu.ru

## Лазерно-электрохимическая обработка безвольфрамового твердого сплава КНТ16 в 10 %-ном водном растворе хлорида натрия

Представлены результаты по лазерно-электрохимической обработке безвольфрамового твердого сплава КНТ16 в 10 %-ном водном растворе хлорида натрия при использовании лазерного излучения с длиной волны 1,06 мкм. Установлено, что наложение лазерного излучения в зону обработки при электрохимическом растворении материала позволяет активировать процесс анодного растворения до 6 раз. Наибольшее значение плотности тока при анодном растворении безвольфрамового твердого сплава КНТ16 достигается при лазерной активации электрохимического растворения с использованием длины волны лазерного излучения 1,06 мкм с частотой следования импульсов 2,5 кГц.

**Ключевые слова:** безвольфрамовый твердый сплав; электрохимическое растворение; лазерно-электрохимическая обработка; хлорид натрия.

N.P. Gaar, Can. Eng.

(Novosibirsk State Technical University 20, K. Marx Avenue, Novosibirsk, 630073 Russia)

## Laser electro-chemical treatment tungsten free hard alloy KNT16 in 10% aqueous solution of sodium chloride

The results on laser electro-chemical treatment of tungsten free hard alloy KNT16 in 16% aqueous solution of sodium chloride at the use of laser emission with the wave length 1.06 mkm at different values of the frequency of pulse sequence in the range of potentials from 0 to 5V are presented. The investigations were carried out with the use of polarization methods: a potentiostatic method and potentiodynamic one on the special developed plant in the electro-chemical cell with the platinum electrode of comparison. It is defined that the application of laser emission for process activation of the electro-chemical dissolution of tungsten free hard alloy in aqueous solution of sodium chloride results in current density increase up to 6 times. The impact of pulse sequence frequency upon electro-chemical alloy dissolution at the process activation with the length of 1.06 mkm is emphasized.

The highest value of current density is achieved at the frequency of pulse sequence 2.5kHz.

**Keywords:** tungsten free hard alloy; electro-chemical dissolution; laser-electrochemical treatment; sodium chloride.

Безвольфрамовые твердые сплавы появились как альтернатива существующим твердым сплавам на основе карбида вольфрама. Необходимость появления такой разновидности твердого сплава была обусловлена экономией стратегически важного элемента – вольфрама. В данный момент они используются в производстве, как для изготовления режущего инструмента, так и для изготовления износостойких деталей в России и за рубежом.

Сплав КНТ16 является одним из представителей безвольфрамовых твердых сплавов, в химический состав которого входит карбонитрид титана (74 %), никель (19,5 %), молибден (6,5 %) [1]. Данный сплав плохо поддается традиционной лезвийной и абразивной обработке, по этой причине для изготовления изделий из такого рода материалов ведутся работы по использованию электрофизических методов формообразования, например, электроалмазного шлифования [2]. Одним из электрофизических методов обработки, доказывающих свою эффективность для изготовления изделий из труднообрабатываемых материалов, является лазерно-электрохимическая обработка (ЛЭХРО) [3–5].

Предварительные исследования по ЛЭХРО сплава КНТ16 в водном растворе нитрата натрия показали свою результативность (скорость электрохимического растворения повысилась в 5 раз (при использовании длины волны 0,53 мкм) по сравнению с электрохимическим растворением без наложения излучения [6]). Тем не менее, на данный момент нет литературных сведений по ЛЭХРО безвольфрамового сплава КНТ16 в других составах электролита, например, в хлориде натрия, который часто используется при электрохимической обработке твердых сплавов с высоким содержанием никеля в химическом составе. Данный состав электролита отвечает предъявляемым к ним требованиям для ЛЭХРО, описанным в работе [7].

**Методика экспериментального исследования.** Традиционно при изучении характера анодного растворения материала, на котором основана электрохимическая обработка, используют поляризационные исследования – потенциодинамические и потенциостатические. Потенциодинамические исследования позволяют выявить как области активного растворения, когда с ростом потенциала происходит увеличение плотности тока, так и области пассивного растворения, где рост потенциала сопровождается снижением плотнос-

ти тока или остается на прежнем уровне.

Потенциостатические исследования позволяют уточнить характер растворения материала при использовании конкретного значения потенциала, который может быть некорректно определен за счет инертности процессов электрохимического растворения при постоянной развертке потенциала.

Для проведения данных исследований используется электрохимическая ячейка с тремя электродами: катодом, анодом (образцом исследуемого материала) и электродом сравнения; потенциостат-гальваностат, при помощи которого производится задача потенциала и осуществляется регистрация установившегося значения тока. Определение эффективности наложения лазерного излучения в зону обработки производилось также при помощи поляризационных исследований.

Соблюдение идентичности результатов экспериментов обеспечивалось использованием специально разработанной установки [8] для всех видов активации электрохимического растворения, в состав которой входит специальная электрохимическая ячейка с платиновым электродом сравнения, подробно описанная в работе [9]. Данная установка была успешно использована и для исследования активации процесса электрохимического растворения материала в другом составе электролита [6].

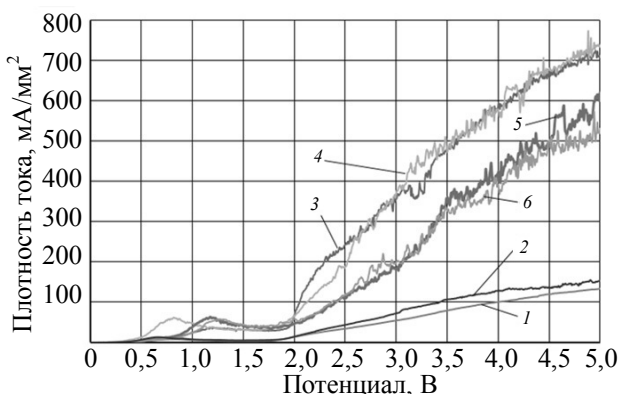
В качестве прибора, задающего развертку потенциала и регистрирующего установившееся значение тока в данной установке, использовался потенциостат IPC-Pro-M. Развертка потенциала при исследовании потенциодинамическим методом осуществлялась от 0 до 5 В со скоростью 0,2 В/с. При исследовании потенциостатическим методом время выдержки определенного потенциала на электродах составляло 30 с.

Выбор длины волны лазерного излучения равной 1,06 мкм для активации процесса электрохимического растворения сплава КНТ16 обоснован эффективностью ЛЭХРО других материалов [4, 6]. Значение частот следования импульсов 2; 2,5; 5; 10 кГц также было выбрано на основании предварительных исследований по ЛЭХРО в данном электролите [5]. Среднее значение плотности мощности лазерного излучения, используемого при проведении исследований –  $1,06 \cdot 10^6$  Вт/м<sup>2</sup> было установлено из математического моделирования процесса с учетом теплофизических свойств электролита и материала, представленного в работе [11], с учетом ограничений, связанных с нагревом электролита. Морфология поверх-

ности образцов после лазерно-электрохимической обработки оценивалась при помощи растровой электронной микроскопии на микроскопе Carl Zeiss EVO 50 XVP при ускоряющем напряжении 20 кВ.

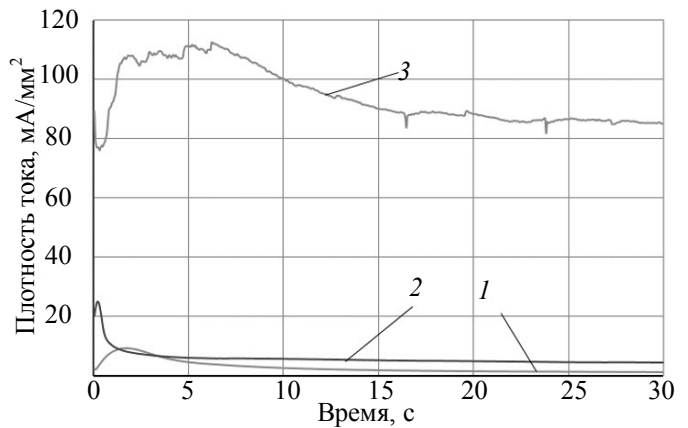
**Результаты и обсуждение.** Полученные при помощи потенциодинамического метода поляризационные кривые без наложения лазерного излучения в стационарных условиях, с использованием электролита с повышенной температурой и с наложением лазерного излучения с длиной волны 1,06 мкм для безвольфрамового твердого сплава КНТ16 представлены на рис. 1.

Анализ поляризационной кривой, полученной потенциодинамическим методом в 10 %-ном водном растворе хлорида натрия без наложения лазерного излучения (кривая 1, рис. 1), указывает на тот факт, что в диапазоне потенциалов от 0 до 1,7 В значение плотности тока равно нулю, а следовательно, процесс электрохимического растворения отсутствует. Это подтверждают и результаты потенциостатического исследования для потенциала 0,8 В (кривая 1, рис. 2), указывающие на падение плотности тока с течением времени. В диапазоне потенциалов свыше 1,7 В наблюдается рост плотности тока с увеличением потенциала до 133 мА/мм<sup>2</sup> (при потенциале 5 В). Данное увеличение плотности тока может быть связано с началом восстановления анионов хлора (потенциал восстановления хлора ~ 1,36 В), которые вступают в реакцию с никелем, входящим в состав связки данного материала, и тем самым активизирует его.



**Рис. 1. Поляризационные кривые, полученные при помощи потенциодинамического метода для твердого сплава КНТ16 в 10 %-ном водном растворе хлорида натрия:**

1 – без наложения излучения; 2 – без наложения излучения с температурой электролита 40 °С; 3, 4, 5, 6 – при ЛЭХРО с  $\lambda = 1,06$  мкм с частотой следования импульсов: 3...2 кГц; 4...2,5 кГц; 5...5,5 кГц; 6...10 кГц соответственно



**Рис. 2. Поляризационные кривые, полученные при помощи потенциостатического метода для твердого сплава КНТ16 в 10 %-ном водном растворе хлорида натрия для потенциалов:**

1 – 0,8 В; 2 – 1,8 В; 3 – 4,0 В

Характер потенциостатической кривой для потенциала 1,8 В (кривая 2, рис. 2) подтверждает начало процесса электрохимического растворения, так плотность тока с течением времени остается практически одной и той же. Характер потенциостатической поляризационной кривой для потенциала 4 В также указывает на процесс анодного растворения. Осцилляции значения плотности тока связаны с процессами активного роста и образования пузырьков газа на образце, что подтверждается визуальным наблюдением за процессом обработки.

Изменение концентрации соли в составе электролита с 10 до 20 % не привели к существенному изменению характера анодного поведения или сдвигу участков потенциалов активного и пассивного растворения.

Увеличение температуры электролита (кривая 2, рис. 1) до 40 °С существенно не изменяет характер анодного растворения материала. Как и в предыдущем случае наблюдается два характерных участка от 0 до 1,7 В – пассивации и свыше 1,7 В – активного растворения материала, что подтверждается потенциостатическими исследованиями в указанных диапазонах потенциалов. Значение плотности тока повысилось незначительно с 133 до 149 мА/мм<sup>2</sup> (при  $\phi = 5$  В). Увеличение температуры электролита свыше 40 °С до 70 °С ни привели ни к изменению характера анодного растворения материала, ни к значительному увеличению плотности тока.

Использование лазерного излучения с длиной волны 1,06 мкм привело к активации процесса электрохимического растворения. На этот факт указывает повышение достигаемых значений плотности тока примерно в 6 раз с

133 мА/мм<sup>2</sup> (кривая 1, рис. 1) до 750 мА/мм<sup>2</sup> для  $f = 2,5$  кГц при  $\varphi = 5$  В (кривая 4, рис. 1).

Следует отметить, что потенциал начала процесса электрохимического растворения сдвинулся в область меньших значений с 1,7 В до 0,25 В для всех используемых частот следования импульсов (кривые 3 – 6, рис. 1). Анализ поляризационных кривых, полученных при помощи потенциостатического метода (рис. 3), подтверждает анодное растворение материала в указанном диапазоне потенциалов, о чем свидетельствуют постоянство плотности тока с течением времени. Осцилляции значений плотности тока при потенциалах 3 и 5 В (кривые 3 и 4, рис. 3, соответственно), как и в случае с электрохимическим растворением без наложения лазерного излучения (кривая 3, рис. 2), объясняются процессами образования и срывания пузырьков газа на образце.

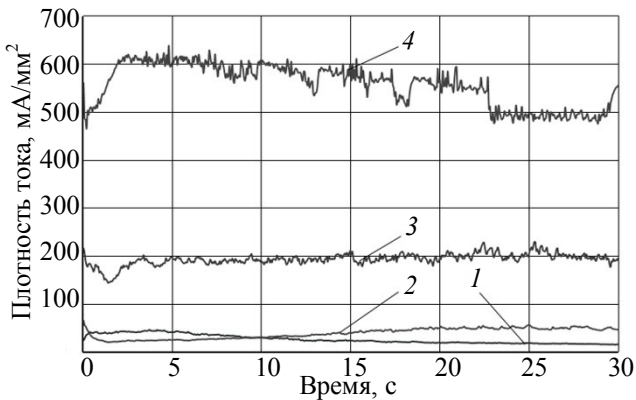


Рис. 3. Поляризационные кривые, полученные при помощи потенциостатического метода для твердого сплава КНТ16 в 10% водном растворе хлорида натрия при ЛЭХРО с  $\lambda = 1,06$  мкм,  $f = 2,5$  кГц для потенциалов:

1 – 1,0 В; 2 – 1,5 В; 3 – 3,0 В; 4 – 5,0 В

Анализ поляризационных кривых, полученных при активации процесса электрохимического растворения с разными частотами следования импульсов, указывает на тот факт, что наибольший эффект достигается при использовании частоты следования импульсов 2,5...2 кГц. Повышение значения частоты следования импульса с 2 кГц до 10 кГц приводит к снижению достигаемых значений плотности тока с 750 мА/мм<sup>2</sup> (для  $f = 2$  кГц) до 600...550 мА/мм<sup>2</sup> (для  $f = 5$  кГц и  $f = 10$  кГц, соответственно).

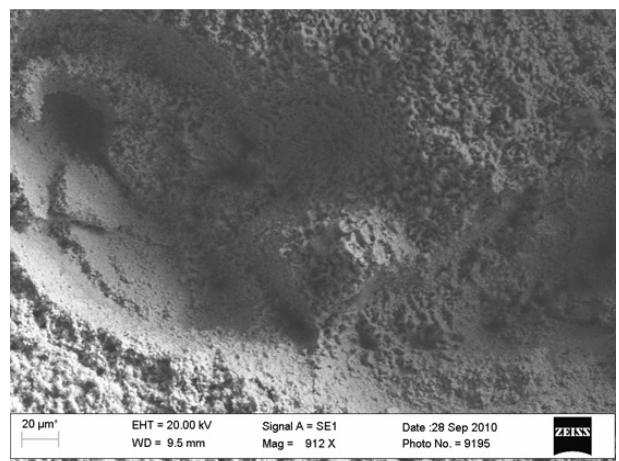
Анализ морфологии поверхности образца после активации электрохимического растворения лазерным излучением, представленной на рис. 4, а, указывает на наличие на поверх-

ности характерного углубления. Подобные углубления в месте наложения лазерного излучения наблюдались и для других материалов при активации электрохимического растворения [4, 6]. Это подтверждает предположение о локальном характере активации процесса электрохимического растворения материала.

Следует отметить, что форма углубления (рис. 4, а) схожа с формой пучка лазерного излучения, полученного при прожиге сажи на кварцевом стекле (рис. 5). Это позволяет предположить, что одним из дальнейших направлений развития ЛЭХРО может быть получение отверстий различной конфигурации при использовании пучков различной формы. Неоднородность углубления по глубине (рис. 4, б), вероятнее всего, связана с распределением интенсивности лазерного излучения внутри пучка.



а)



б)

Рис. 4. Морфология поверхности безвольфрамового твердого сплава КНТ16 после ЭХРО при  $\lambda = 1,06$  мкм в 10%-ном водном растворе хлорида натрия:

а – общий вид образца; б – морфология поверхности в месте наложения лазерного излучения



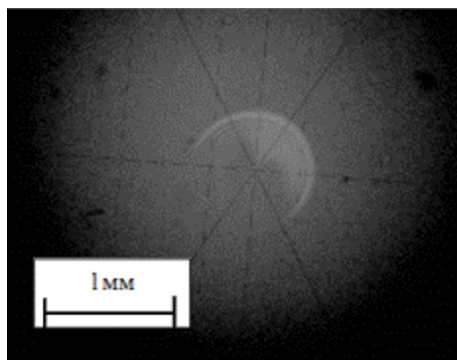


Рис. 5. Внешний вид пучка лазерного излучения, полученный при помощи прожига сажи на кварцевом стекле при использовании лазерного излучения с длиной волны 1,06 мкм

### Заключение

Использование лазерного излучения для активации электрохимического растворения безвольфрамового твердого сплава КНТ16 в водном растворе хлорида натрия является эффективным, так как значение плотности тока возросло в шесть раз по сравнению с традиционной электрохимической обработкой материала. При этом использование длины волны  $\lambda = 1,06$  мкм с частотой следования импульсов  $f = 2,5$  кГц оказалось наиболее перспективным. Наличие характерного углубления на поверхности образца материала после ЛЭХРО, схожего по своей форме с формой пучка используемого лазерного излучения, позволяет говорить о локальности активации процесса растворения материала и о перспективности использования различной конфигурации пучка для изготовления поверхностей различной формы.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. ГОСТ 26530-85. Сплавы твердые спеченные безвольфрамовые. Введен 01.01.86. – М.: Издательство стандартов, 1985 г. – 8 с.
2. Рахимьянов, Х.М., Красильников, Б.А., Янпольский, В.В., Красильников, Д.Б. Электрохимическая обработка безвольфрамовых твердых сплавов // *Обработка металлов: технология, оборудование, инструменты.* – 2010. – № 3(48). – С. 3–7.
3. Пат. Р. Ф. № 2451582. 2010. Рахимьянов, Х.М., Журавлев, А.И., Гаар, Н.П., Локтионов, А.А. Способ размерной обработки металлов и сплавов: Заявл. 07.07.2010 № 2010128204/02. Опубл. 27.05.2012, Бюл. № 15. 11 с.
4. Рахимьянов, Х.М., Гаар, Н.П., Журавлев, А.И., Локтионов, А.А. Особенности активации анодного растворения при лазерно-электрохимической обработке нержавеющей стали 12Х18Н9Т в 10% водном растворе хло-

рида натрия // *Механика XXI века.* – 2015. – № 14. – С. 116–119.

5. Rakhimyanov K.M. Role of laser radiation in activating anodic dissolution under electrochemical machining of metals and alloys / K. M. Rakhimyanov, N. P. Gaar, A. A. Loktionov // *MATEC Web of Confer-ences.* - 2017. - Vol.129. - Art. 01070 (4 p.). - DOI: 10.1051/mateconf/201712901070.

6. Рахимьянов, Х.М., Гаар, Н.П., Локтионов, А.А. Особенности активации анодного растворения при лазерно-электрохимической обработке безвольфрамового твердого сплава КНТ-16 в 10%-ном водном растворе нитрата натрия // *Научные технологии в машиностроении.* – 2016. – № 11 (65). – С. 37–43.

7. Рахимьянов, Х.М., Красильников, Б.А., Гаар, Н.П., Журавлев, А.И., Локтионов, А.А. Методика выбора электролита для лазерно-электрохимической обработки // *Обработка металлов: (технология, оборудование, инструменты).* – 2012. – № 2(55). – С. 18–21.

8. Рахимьянов, Х.М., Красильников, Б.А., Гаар, Н.П., Журавлев, А.И., Локтионов, А.А. Установка для исследования материалов в условиях лазерно-электрохимической обработки комбинированным излучением // *Обработка металлов: технология, оборудование, инструменты.* – 2012. – № 3 (56). – С. 30–32.

9. Рахимьянов, Х.М., Гаар, Н.П. Электрохимическая ячейка для исследования интенсификации ЭХРО лазерным излучением // *Современные пути развития машиностроения и автотранспорта Кузбасса: Тр. 1-й всерос. науч.-техн. конф.* – Кемерово: КузГТУ, 2007. – С. 251–254.

10. Рахимьянов, Х.М., Гаар, Н.П. Математическое моделирование при лазерной термоактивации электрохимической размерной обработке // В книге: *Современные технологические системы в машиностроении. Тезисы докладов.* – Барнаул, 2006. – С. 45–47.

### REFERENCES

1. SSR 26530-85. *Tungsten Free Hard Sintered Alloys. Introduced 01.01.86.* – М.: Publishing House of Standards, 1985. – pp. 8.
2. Rakhimyanov, Kh.M., Krasilnikov, B.A., Yanpolsky, V.V., Krasilnikov, D.B. Electro-chemical treatment of tungsten free hard alloys // *Metal treatment: Technology, Equipment, Tools.* – 2010. – No.3(48). – pp. 3-7.
3. Pat. RF. No.2451582. 2010. Rakhimyanov, Kh.M., Zhuravlyov, A.I., Gaar, N.P., Loktionov, A.A. *Method for Dimension Treatment of Metals and Alloys:* Applied 07.07.2010 No.2010128204/02. Published 27.05.2012, Bull. No.15. pp. 11.
4. Rakhimyanov, Kh.M., Gaar, N.P., Zhuravlev, A.I., Loktionov, A.A. Peculiarities in anode dissolution activation at laser electro-chemical treatment of stainless steel 12H18N9T in 10% aqueous solution of sodium chloride // *Mechanics to XXI-th Century.* – 2015. – No.14. – pp. 116-119.
5. Rakhimyanov K.M. Role of laser radiation in activating anodic dissolution under electrochemical machining of metals and alloys / K. M. Rakhimyanov, N. P. Gaar, A. A. Loktionov // *MATEC Web of Confer-ences.* - 2017. - Vol.129. - Art. 01070 (4 p.). - DOI: 10.1051/mateconf/201712901070.
6. Rakhimyanov, Kh.M., Gaar, N.P., Loktionov, A.A. Peculiarities in anode dissolution activation at laser electro-

chemical treatment of tungsten free hard alloy KNT-16 in 16% aqueous solution of sodium chloride // *Science Intensive Technologies in Mechanical Engineering*. – 2016. – No.(65). – pp. 37-43.

7. Rakhimyanov, Kh.M., Krasilnikov, B.A., Gaar, N.P., Zhyravlyov, A.I., Loktionov, A.A. Procedure of electrolyte choice for laser electro-chemical treatment // *Metal Treatment (Technology, Equipment, Tools)*. – 2012. No.2(55). – pp. 18-21.

8. Rakhimyanov, Kh.M., Krasilnikov, B.A., Gaar, N.P., Zhuravlyov, A.I., Loktionov, A.A. Plant for material research under conditions of laser electro-chemical treatment with com-

bined emission // *Metal Treatment: Technology, Equipment, Tools*. – 2012. – No.3(56). – pp. 30-32.

9. Rakhimyanov, Kh.M., Gaar, N.P., Electro-chemical cell for research of ECRT with laser emission // *Current Ways for Development of Mechanical Engineering and Motor Transport of Kuzbass: Proceedings of the 1-st All-Russian Scientific. Tech. Conf.* – Kemerovo: KuzSTU, 2007. – pp. 251-254.

10. Rakhimyanov, Kh.M., Gaar, N.P. Mathematical modeling at laser thermo-activation of electro-chemical dimension treatment // *Current Technological Systems in Mechanical Engineering. Proceedings*. – Barnaul, 2006. – pp. 45-47.

Рецензент д.т.н. В.Г. Буров

УДК 621.794.6

DOI: 10.30987/article\_5ad8d290551210.41386001

М.Л. Скрябин, к.т.н.

(ФГБОУ ВО «Вятская государственная сельскохозяйственная академия», 610017, г. Киров, ул. Октябрьский проспект, 133)

E-mail: max.dvs@mail.ru

## Получение стойких оксидных пленок на поверхности поршневых алюминиевых сплавов при микродуговом оксидировании

*Рассмотрено получение тонких оксидных пленок на поршневых алюминиевых сплавах методом микродугового оксидирования. Описан механизм формирования кристаллических включений и высокотемпературных структур в зависимости от плотности ионного тока во времени. Описан и проанализирован один из методов поверхностного упрочнения поршневых алюминиевых сплавов – микродуговое оксидирование. Рассмотрены механизмы формирования оксидных слоев с учетом влияния легирующих элементов поршневых алюминиевых сплавов. Проведен анализ пористых чешек, исследованы основные свойства покрытий.*

**Ключевые слова:** поршневые сплавы; микродуговое оксидирование; пленочные покрытия; пористость.

M.L. Skryabin, Can. Eng.

(FSBEI HE "Vyatka State Agricultural Academy", 133, Ochyabrsky Avenue, Kirov, 610017)

## Steady oxide film obtaining on surface of piston aluminum alloys at micro-arc oxidation

*The formation of thin oxide films on piston aluminum alloys through the method of micro-arc oxidation is considered. The mechanism of the formation crystal inclusions and high-temperature structures depending on ion current density in time is described. One of the methods of surface strengthening piston aluminum alloys – micro-arc oxidation is described and analyzed. The mechanisms of oxide layers formation taking into account the impact of alloy elements of piston aluminum alloys are considered. The analysis of porous cells is carried out, basic properties of coatings are investigated.*

**Keywords:** piston alloys; micro-arc oxidation; film coatings; porosity.

В настоящее время поршневая группа современных дизельных и бензиновых двигателей внутреннего сгорания (ДВС) испытывает нагрузки, близкие к максимально допустимым. А если для питания двигателя используются альтернативные топлива, то температура и давление в камере сгорания увеличиваются на 15...20 %, что приводит к увеличению термической напряженности деталей всей цилиндропоршневой группы [1].

Применение сплавов на основе алюминия для изготовления поршневой группы ДВС дает возможность уменьшить общий вес двигателя и снизить удельный расход топлива. Современные поршневые сплавы достаточно технологичны, имеют относительно высокую прочность и пластичность, отличаются сложным химическим составом, так как для повышения жаропрочности их легируют медью, хромом, марганцем, никелем, кобальтом и