

УДК 621.92:621.45.034

## ОБЕСПЕЧЕНИЕ ТОЧНОСТНЫХ ПАРАМЕТРОВ И КАЧЕСТВА ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ ПРИ ПОЛУЧЕНИИ ГЛУБОКИХ ПАЗОВ В ДЕТАЛЯХ КАМЕРЫ СГОРАНИЯ ГТД МЕТОДОМ АБРАЗИВНОГО ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОГО ШЛИФОВАНИЯ

Л. А. ТАЙМАСОВА<sup>1</sup>, В. Э. ГАЛИЕВ<sup>2</sup>, В. В. АТРОЩЕНКО<sup>3</sup>

<sup>1</sup>lagalimova@yandex.ru, <sup>2</sup>true21@mail.ru, <sup>3</sup>acstsufa@mail.ru

<sup>1,2</sup> НПА «Технопарк АТ»

<sup>1,2,3</sup> ФГБОУ ВО «Уфимский государственный авиационный технический университет» (УГАТУ)

*Поступила в редакцию 23.10.2020*

**Аннотация.** В работе предложен перспективный способ абразивного электрохимического шлифования с периодической очисткой режущего инструмента при получении глубоких, узких, протяженных пазов в деталях «сегмент жаровой трубы» камеры сгорания ГТД из жаропрочного интерметаллидного сплава ВКНА-1В-ВИ. Вопросы обеспечения качества поверхностного слоя, повышения усталостной прочности и геометрической точности являются актуальными и тесно связаны с обеспечением режущих свойств рабочего инструмента – его засаленностью. Проведен сравнительный анализ образцов, полученных методом абразивного электрохимического шлифования без периодической очистки и с одновременной периодической очисткой абразивного круга.

**Ключевые слова:** абразивное шлифование; камера сгорания; жаропрочный интерметаллидный сплав; механическое резание; электрохимическое анодное растворение; электроэрозионная обработка; очистка и правка абразивного инструмента.

В современных и перспективных авиационных ГТД предполагается использование камер сгорания со сборно-разборной конструкцией жаровой трубы. В качестве конструкционного материала используется жаропрочный интерметаллидный сплав на основе никеля ВКНА-1В-ВИ. Сплав обладает высокими прочностными характеристиками, высокой стойкостью к температурной и химической коррозии, имеет рабочую температуру до 940 °С [1, 2].

Применение данного материала позволяет снизить расход воздуха на охлаждение жаровой трубы и повысить КПД двигателя на 3 % [3, 4], но материал труднообрабатываемый лезвийными методами обработки. Отмечена высокая трудоемкость лезвийных операций при низком качестве: ухудшение точности обработки, деформации деталей

под воздействием сил резания, повышение температуры в зоне обработки, как следствие – образование измененного слоя и трещин. Возможна обработка механическим абразивным шлифованием, но т. к. материал обладает высокими адгезионными свойствами, происходит наволакивание и быстрое засаливание абразивного инструмента, что также приводит к образованию измененного слоя и трещин. Для решения этих проблем целесообразно применение абразивного электрохимического шлифования (АЭХШ). Процесс заключается в одновременном протекании механического резания, электрохимического растворения и электроэрозионных явлений. За счет такой комбинированной обработки происходит снижение усилий резания, повышение производительности, улучшение качества поверх-

ностного слоя [8]. Тем не менее проблемы засаливания абразивного инструмента и, как следствие, увеличения сил резания, ухудшения качества поверхностного слоя являются актуальными.

Для решения этих проблем необходимо вовремя очищать и по мере износа править абразивный инструмент. В настоящее время существуют следующие методы очистки и правки абразивных кругов [5–7]:

1. *Электрохимический метод.* Электрохимическая очистка и правка алмазного круга осуществляется непосредственно на станке. При этом, изменив полярность тока, чтобы инструмент стал анодом, а металлический брусок – катодом, в межэлектродный зазор подают электролит.

2. *Электроэрозионный метод* эффективен в случае правки профильных инструментов. Круг является анодом, а катод изготавливают также в форме круга либо стержня (может быть вращающимся). В межэлектродный зазор подается электролит.

3. *Правка абразивным бруском* из зеленого карбида кремния с твердостью С1-С4. Размер зерна и концентрацию зерен подбирают исходя из зернистости алмазного инструмента. Обработку ведут непрерывно с подачей большого количества охлаждающей жидкости. Но нужно отметить, что очистка и правка кругов абразивным бруском сопровождается очень высоким расходом бруска и занимает много времени.

4. *Очистка свободным абразивом.* Очистку абразивного инструмента можно проводить путем подачи рабочей жидкости, которая содержит абразивный порошок.

5. *Обкатывание абразивным кругом.* Удаление стружки, алмазных зерен и металлической связки с поверхности круга осуществляется инструментом круглой формы, который получает вращение от алмазного круга. Этот метод применяют очень редко из-за низкой эффективности.

6. *Правка шлифованием.* Производится вращающимся правящим инструментом, который получает вращение от отдельного привода, а не от алмазного круга, как при

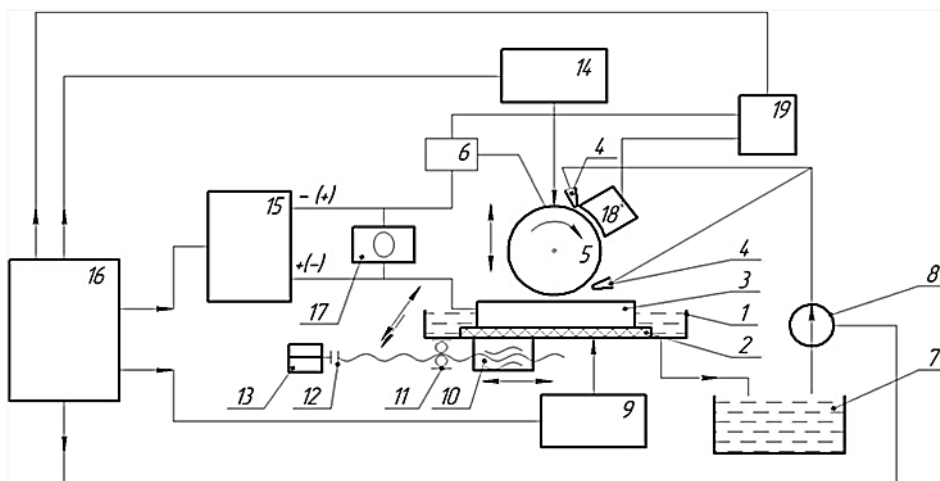
обкатывании абразивным кругом. Процесс характеризуется небольшой скоростью вращения правящегося круга, а правящий круг вращается с обычной рабочей скоростью. Недостаток данного метода заключается в применении дополнительного привода вращения правящего инструмента.

Очистка и правка абразивного инструмента – регламентированный процесс, и производится после обработки определенного количества деталей либо через определенное время обработки. В некоторых случаях засаливание абразивного круга происходит до окончания обработки одной детали. Для обеспечения качества обработки необходимо производить АЭХШ с адаптивным принятием решения процесса очистки инструмента.

Нами был разработан способ АЭХШ с возможностью периодической очистки инструмента при обеспечении оптимальных параметров и показателей обработки.

Для оценки загрязненности абразивного круга используется косвенный параметр, вычисляемый как отношение усилия резания к длительности фазы электрохимической обработки (ЭХО) за один оборот вращения шпинделя, который сравнивается с заданным значением, где фаза ЭХО – это отношение длительности короткого замыкания к периоду обращения шпинделя.

Структурная схема процесса АЭХШ с одновременной периодической очисткой абразивного круга представлена на рис. 1. По мере загрязнения режущего инструмента на систему управления 16 поступает сигнал о возрастании термомеханического воздействия в зоне обработки и сокращения фазы ЭХО, т. е. увеличении косвенного параметра очистки. После чего система управления 16 подает сигнал для включения системы очистки, состоящей из дополнительного источника питания 19 и очищающего электрода-инструмента 18. После очистки абразивного круга косвенный параметр оценки загрязненности круга снижается, система управления отключает систему очистки. Процесс повторяется по мере загрязнения инструмента.



**Рис. 1.** Структурная схема рабочего процесса:

- 1 – рабочий стол-ванна; 2 – изолятор; 3 – заготовка; 4 – сопло для подачи электролита; 5 – абразивный круг; 6 – щеточный узел; 7 – гидростанция; 8 – насос для подачи электролита; 9 – привод подачи рабочего стола-ванны; 10 – передача винт-гайка; 11 – подшипниковая опора; 12 – муфта; 13 – электродвигатель; 14 – привод подачи абразивного круга; 15 – источник технологического тока; 16 – система управления; 17 – цифровой осциллограф; 18 – электрод для очистки; 19 – дополнительный источник питания

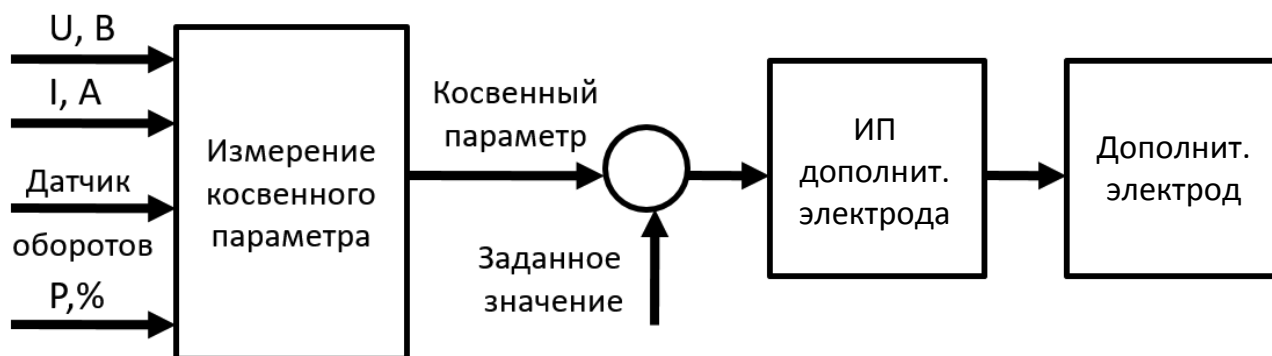
Предложенный алгоритм управления сигналом при очистке представлен на рис. 2.

Существует оптимальное значение усилия резания  $P_{\text{опт}}$ , определяемое как процентное соотношение от номинальной мощности на электродвигателе шпинделя, при котором происходит обработка детали с обеспечением оптимальных параметров и показателей обработки, при достижении этого показателя выше 50 %  $P_{\text{кр}}$  происходит засаливание режущего инструмента и ухудшение качества обработки.

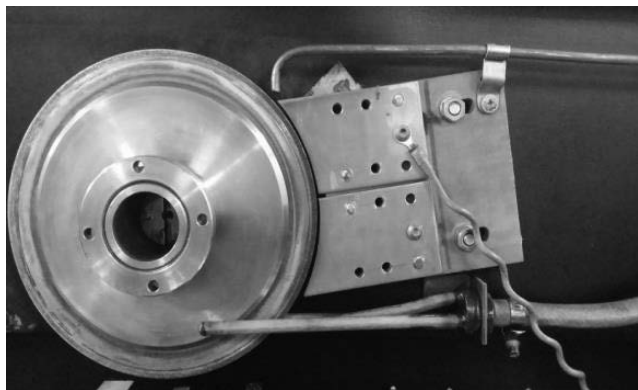
Для проведения исследований как объекты обработки использовались детали «сегмент жаровой трубы» камеры сгорания ГТД

из интерметаллидного сплава ВКНА-1В-ВИ, в которых необходимо получить продольные пазы длиной  $174,5 \pm 0,2$  мм, шириной  $1,75 \pm 0,15$  мм, глубиной  $5 \pm 0,2$  мм.

Обработка производилась на станке для абразивного электрохимического шлифования 4СЭШ-1, который был модернизирован. Станок укомплектован источником технологического тока «Iskra 500-50» с широким диапазоном технологических возможностей, дополнительным источником питания для подачи импульсов обратной полярности и дополнительным очищающим электродом-инструментом (рис. 3).



**Рис. 2.** Алгоритм системы очистки режущего инструмента

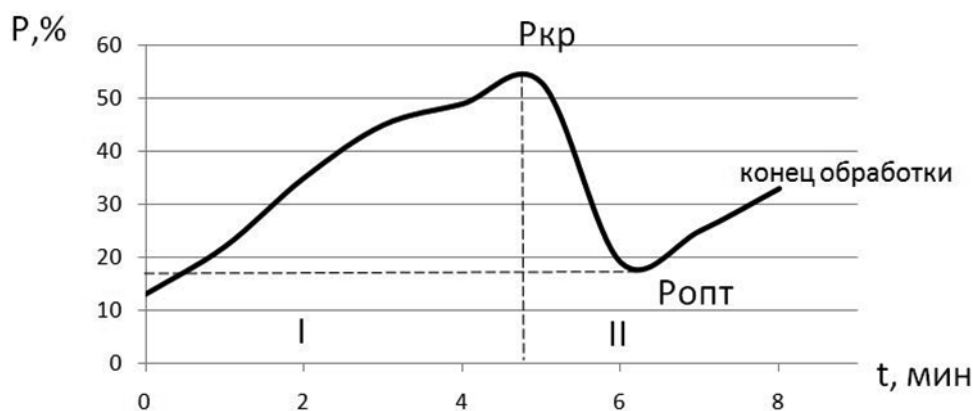


**Рис. 3.** Дополнительный очищающий электрод-инструмент, установленный непосредственно на станке

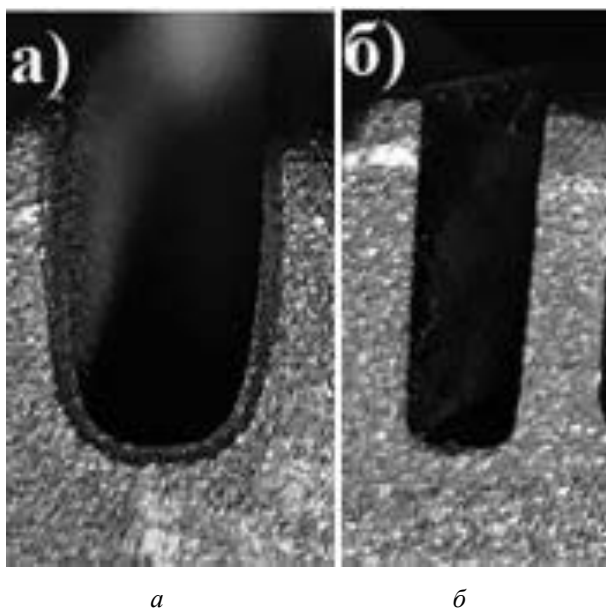
В качестве электролита для обработки был выбран водный раствор 6 %  $\text{NaNO}_3$ , 0,5 %  $\text{NaNO}_2$ , 0,5 %  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ , 2 % глицерина. Плотность электролита составляет  $\rho = 1,07\text{--}1,04 \text{ г/см}^3$ . В качестве инструмента для электрохимического алмазного шлифования использовался абразивный круг на металлической связке марки АС20  $150 \times 32 \times 1,7 \times 5$  160/125 100 М2-02 575.

Обработка велась без очистки и с периодической очисткой абразивного инструмента в соответствии с разработанным способом. Скорость рабочей подачи составляла 40 мм/мин, напряжение – 8 В, ограничение по току – 200 А, частота вращения круга – 2800 об/мин. На дополнительный электрод для очистки подавалось напряжение 15 В, средний ток составлял 10 А, межэлектродный зазор составлял 0,05 мм.

При общем времени обработки детали 8 мин происходила периодическая очистка инструмента. Длительность очистки составляла 1,5 мин (рис. 4). Начало включения дополнительного электрода-инструмента наступало на 5-й мин обработки. Исследования геометрических параметров паза после АЭХШ (рис. 5, а) выявили, что ширина паза составила 1,8...2,05 мм, наблюдается разница ширины паза по глубине. При использовании предложенного способа АЭХШ с периодической очисткой абразивного круга (рис. 5, б) ширина паза составила 1,73...1,78 мм по всей длине и глубине паза.



**Рис. 4.** График работоспособности режущего инструмента:  
зона I – увеличение засаленности режущего инструмента;  
зона II – очистка режущего инструмента



**Рис. 5.** Продольный паз в детали «сегмент жаровой трубы» камеры сгорания ГТД: *а* – после АЭХШ; *б* – после АЭХШ с периодической очисткой

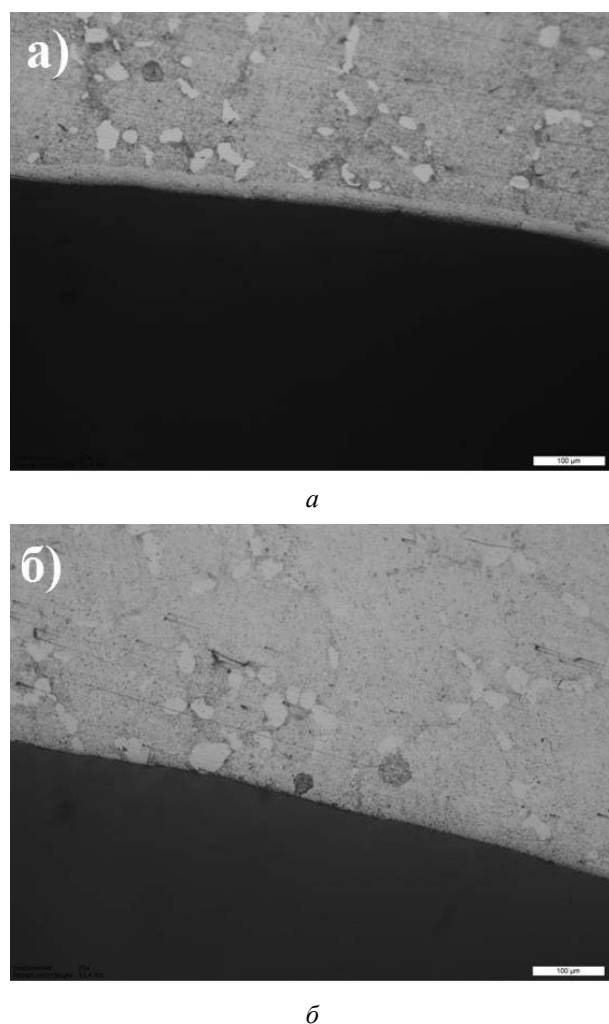
Исследования микроструктуры поверхностного слоя показали, что после АЭХШ (рис. 6, *а*) из-за увеличения термомеханического влияния на материал в поверхностном слое образуется измененный слой глубиной до 35 мкм. После обработки АЭХШ с периодической очисткой абразивного инструмента в поверхностном слое материала детали измененный слой, прижоги, трещины не наблюдаются (рис. 6, *б*).

Шероховатость поверхности после АЭХШ составила  $Ra = 1,84$  мкм. Шероховатость поверхности после обработки детали методом АЭХШ с периодической очисткой режущего инструмента составила  $Ra = 0,32$ .

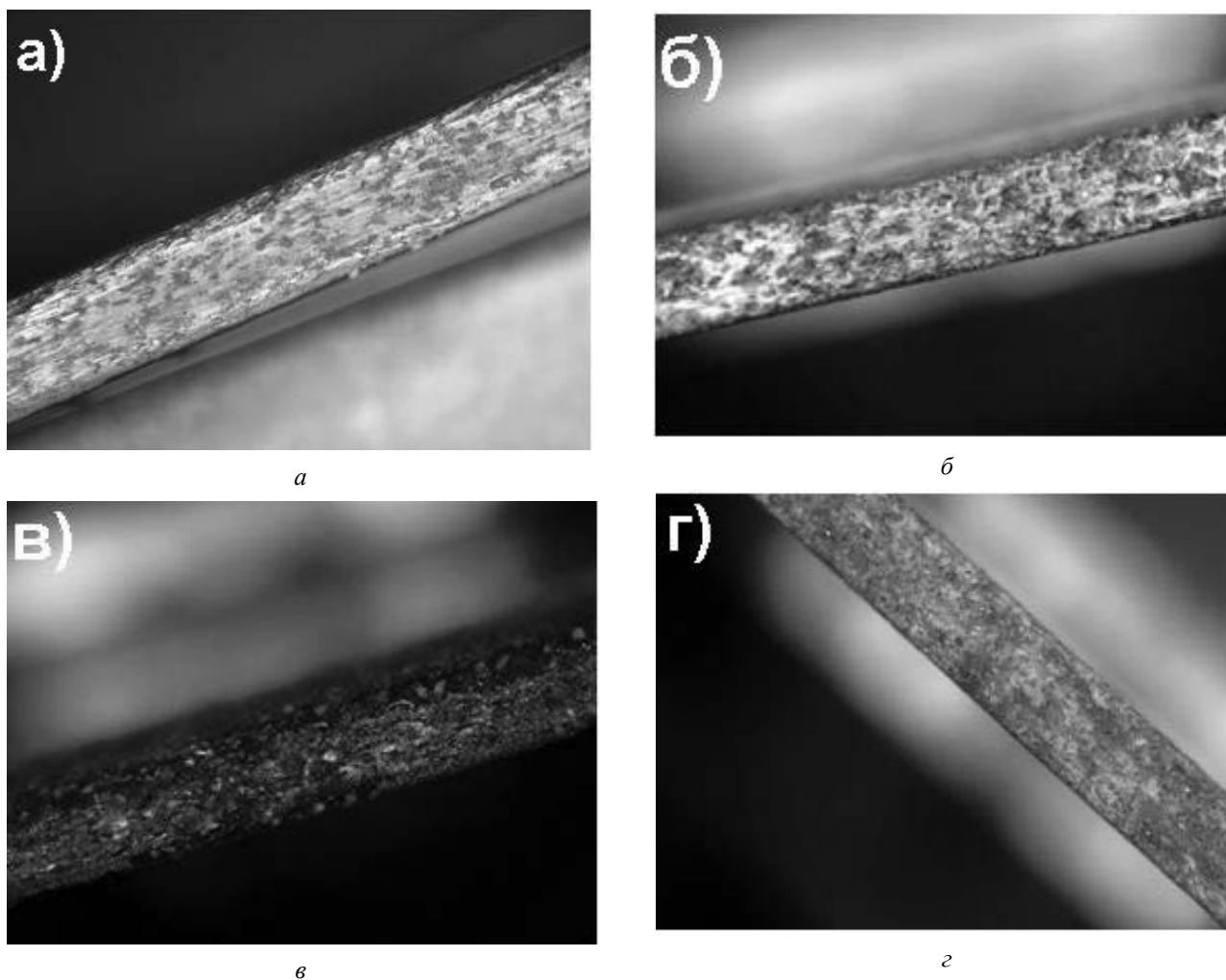
Проведены исследования степени загрязненности абразивного круга.

На рис. 7, *а* представлена фотография поверхности нового абразивного круга, наблюдается металлическая связка с вкраплениями абразивных зерен. На рис. 7, *б* на поверхности рабочего инструмента наблюдается наволоченный материал обрабатываемой заготовки. Установлено, что при скорости рабочей подачи 40 мм/мин абразивный круг не успевает очиститься за счет

электрохимического растворения. Увеличивается доля электроэрозионной составляющей, начинается электроэрозионная самоочистка абразивного инструмента. На поверхности инструмента (рис. 7, *в*) наблюдается нагар, характерный для электроэрозионной обработки, снижается качество поверхностного слоя обрабатываемой заготовки. На рис. 7, *г* представлена фотография абразивного круга после очистки предложенным методом, на поверхности наблюдается металлическая связка, абразивные зерна и участки с материалом обрабатываемой заготовки.



**Рис. 6.** Поверхность образца после АЭХШ без периодической очистки: *а* – после АЭХ; *б* – после АЭХШ с периодической очисткой (увеличение 100х)



**Рис. 7.** Поверхность абразивного круга: *а* – нового круга; *б* – загрязненного круга; *в* – после очистки электроэрозионным методом; *г* – после очистки предложенным методом

### ВЫВОДЫ

1. Предложен новый способ АЭХШ с оценкой загрязненности абразивного круга при помощи косвенного параметра, вычисляемого как отношение усилия резания к длительности фазы электрохимической обработки (ЭХО) за один оборот вращения шпинделя.

2. Проведены исследования степени загрязненности абразивного круга от скорости рабочей подачи. Установлено, что с увеличением скорости рабочей подачи абразивный круг не успевает очиститься за счет электрохимического растворения, увеличивается доля электроэрозионной составляющей, что снижает качество поверхностного слоя обрабатываемой заготовки.

3. Проведено экспериментальное подтверждение, что для поддержания режущих свойств шлифовального круга и уменьшения его износа очистку в процессе обработ-

ки следует производить путем подачи импульсов обратной полярности через дополнительный электрод на время превышения значения параметра оценки загрязнения шлифовального круга заданной величины.

4. Исследования показали, что метод АЭХШ с периодической очисткой режущего инструмента позволяет повысить геометрическую точность обрабатываемых деталей и обеспечить оптимальные параметры качества их поверхностного слоя.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Влияние** высокотемпературного отжига на структуру и свойства сплавов на основе интерметаллида Ni<sub>3</sub>Al / О. А. Базылева [и др.] // Вестник МГТУ им. Н. Э. Баумана. Сер. "Машиностроение". 2016. № 1 (106). С. 112–122. [O. A. Bazyleva, et al., "Effect of high-temperature annealing on structure and properties of Ni<sub>3</sub>Al intermetallic compound in alloys", (in Russian), in *Vestnik MGTU im. N. E. Bauman*, no. 1 (106), pp. 112-122, 2016. ]

2. **Бунтушкин В. П., Каблов Е. Н., Базылева О. А.** Новый литейный сплав ВКНА-1В // Авиационная промышлен-

ность. 1991. № 12. С. 39–40. [ V. P. Buntushkin, E. N. Kablov, O. A. Bazyleva, "New casting alloy VKNA-1V", (in Russian), in *Aviacionnaya promy`shlennost*, no. 12, pp. 39-40, 1991. ]

3. **Иноземцев А. А., Нихамкин М. А., Сандрацкий В. Л.** Основы конструирования авиационных двигателей и энергетических установок: учебник. М.: Машиностроение, 2007. Т. 2. 396 с. ил. [ A. A. Inozemtsev, M. A. Nikhamkin, V. L. Sandratskiy, *Fundamentals of designing aircraft engines and power plants: A textbook*, (in Russian). Vol. 2. Moscow: Mashinostroenie, 2007. ]

4. **Анализ** нагрузок, действующих на элементы конструкции ГТД / А. Е. Кишалов [и др.] // Молодой ученый. 2012. № 11. С. 52–60. [ A. E. Kishalov, *et al.*, "Analysis of Loads Acting on GTE Structural Elements", (in Russian), in *Molodoy uchenyj*, no. 11, pp. 52-60, 2012. ]

5. **Маслов Е. Н.** Теория шлифования материалов. М.: Машиностроение, 1974. 320 с. [ E. N. Maslov, *Theory of grinding material*, (in Russian). Moscow: Mashinostroenie, 1974. ]

6. **Хрульков В. А.** Шлифование жаропрочных сплавов. М.: Машиностроение, 1964. 190 с. [ V. A. Khruikov, *Grinding of heat-resistant alloys*, (in Russian). Moscow: Mashinostroenie, 1964. ]

7. **Казakov В. Ф.** Шлифование при повышенных скоростях резания. Киев: Техника, 1971. 172 с. [ V. F. Kazakov, *Grinding at high cutting speeds*, (in Russian). Kiev: Technika, 1971. ]

8. **Афанасьева И. А., Юрьев В. Л.** Исследование влияния режимов электрохимического алмазного шлифования на качество рабочих поверхностей щеточных уплотнений // Вестник УГАТУ. 2012. Т. 16, № 4 (49). С. 30–35. [ I. A. Afanasyeva, V. L. Yur'ev, "Investigation of the influence of modes of electrochemical diamond grinding on the quality of working surfaces of brush seals", (in Russian), in *Vestnik UGATU*, vol. 16, no. 4 (49), pp. 30-35, 2012. ]

#### ОБ АВТОРАХ

**ТАЙМАСОВА** Лилия Альбертовна, вед. инж.-техн. НПА «Технопарк АТ». Дипл. спец. тех. маш. (УГАТУ, 2012). Иссл. в обл. электрофизико-хим. мет. обр.

**ГАЛИЕВ** Владимир Энгелевич, доц. каф. тех. маш., начальник отдела электротехнологий НПА «Технопарк АТ». Дипл. инж.-мех. (УАИ, 1985). Канд. техн. наук (МГТУ им. Баумана, 1990). Иссл. в обл. технол. и оборуд. электрофизико-технич. мет. обр.

**АТРОШЕНКО** Валерий Владимирович, проф. каф. СЛАТ. Дипл. инж.-электромех. (УАИ, 1974). Д-р. техн. наук по автоматизации техн. процессов пр-ва (Ленинградск. электро-техн. ин-т, 1991). Иссл. в обл. сварочн. произв. и электрофизико-технич. мет. обр.

#### METADATA

**Title:** Confidence of accuracy parameters and quality of the surface layer at receipt of deep groove in details of the combustion chamber of a gas turbine engines by method of abrasive electrochemical grinding.

**Authors:** L. A. Taymasova<sup>1</sup>, V. E. Galiev<sup>2</sup>, V. V. Atroshenko<sup>3</sup>

#### Affiliation:

<sup>1,2</sup> JSC Innovative Science and Technology Center "Iskra" (JSC ISTC "Iskra"), Russia.

<sup>1,2,3</sup> Ufa State Aviation Technical University (UGATU), Russia.

**Email:** <sup>1</sup>lagalimova@yandex.ru, <sup>2</sup>true21@mail.ru, <sup>3</sup>acstsufa@mail.ru

**Language** Russian.

**Source:** Vestnik UGATU (scientific journal of Ufa State Aviation Technical University), vol. 24, no. 4 (90), pp. 10-16, 2020. ISSN 2225-2789 (Online), ISSN 1992-6502 (Print).

**Abstract:** The work proposes a promising method of abrasive electrochemical grinding with periodic cleaning of the cutting tool when receiving deep, narrow, extended grooves in the parts the segment of the combustion chamber of a gas turbine engine from a heat-resistant intermetallic alloy. Issues of ensuring the quality of the surface layer, increasing fatigue strength and geometric accuracy are relevant and are closely related to ensuring the cutting properties of the working tool. A comparative analysis of the samples obtained by the method of abrasive electrochemical grinding without periodic cleaning and with simultaneous periodic cleaning of the abrasive wheel was carried out.

**Key words:** abrasive grinding; combustion chamber; heat-resistant intermetallic alloy; mechanical cutting; electrochemical anodic dissolution; electroerosive processing; cleaning and dressing of an abrasive tool.

#### About authors:

**TAYMASOVA, Lilia Albertovna**, leading engineer-technologist of SPA "Technopark AT". Dipl. eng. techn. of mechanical engineering (UGATU, 2012).

**GALIEV, Vladimir Engelevich**, Assoc. prof., Dept. of mechanical engineering. Chief. technologist of SPA "Technopark AT". Dipl. eng.-mech. (UAI, 1985). Cand. of Tech. Sci. (MSTU Bauman, 1990).

**ATROSHENKO, Valeriy Vladimirovich**, Prof., Dept. of Welding Engineering. Dipl. Eng. (UAI, 1974). Dr. of Tech. Sci. (Leningrad Electrotech. Institute, 1991).