УДК 621.92

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОГО ШЛИФОВАНИЯ ДЕТАЛЕЙ ИЗ ЖАРОПРОЧНЫХ СПЛАВОВ**© Р. Х. Ганцев¹, В. В. Атрощенко², Д. В. Гундеров^{2,3},
Л. А. Таймасова^{1,2*}, М. В. Ватуев¹, Г. И. Заманова⁴**¹ОАО «Инновационный научно-технологический центр «Искра»
Россия, Республика Башкортостан, 450008 г. Уфа, ул. Пушкина, 81.²Уфимский государственный авиационный технический университет
Россия, Республика Башкортостан, 450000 г. Уфа, ул. К. Маркса, 12.³Институт физики молекул и кристаллов УФИЦ РАН
Россия, Республика Башкортостан, 450054 г. Уфа, пр-т Октября, 71.⁴Башкирский государственный университет
Россия, Республика Башкортостан, 450076 г. Уфа, ул. Заки Валиди, 32.

*Email: lagalimova@yandex.ru

Предложен способ абразивного электрохимического шлифования деталей из жаропрочных сплавов с применением нового способа очистки режущего инструмента за счет оценки косвенного параметра оценки степени загрязнения абразивного круга. Проведены исследования, выявлено, что параметр, вычисляемый как отношение усилия резания и длительности электрохимической обработки за один оборот вращения шпинделя, не зависит от скорости рабочей подачи электрода-инструмента, глубины обработки, т.е. является универсальным.

Ключевые слова: абразивное электрохимическое шлифование; микрорезание; интерметаллидный никелевый сплав; электролит; электрохимическая обработка; фаза ЭХО; электроэрозионная обработка.

Введение

Повышение эффективности и получение принципиально новых, недостижимых ранее качеств и свойств газотурбинных двигателей нового поколения, конкурентоспособность изделий требуют новых конструкторских решений – к деталям предъявляют жесткие требования, включающие ужесточение допусков, повышения усталостной прочности, качеству поверхности. Повышение тяги двигателя осуществляется в основном за счет увеличения температуры горения топлива [5; 7]. В связи с этим возникла необходимость в разработке и применении новых материалов – титановых, жаропрочных и интерметаллидных сплавов [4]. Методики обработки материалов непрерывно развиваются [3]. Для титановых и интерметаллидных сплавов характерно низкое значение теплопроводности, что приводит к существенному повышению термомеханического воздействия в зоне обработки при лезвийной обработке. Это может приводить к появлению микротрещин, прижогов и заусенцев, которые являются концентраторами напряжений и снижают усталостную прочность деталей ГТД. По этой причине обработка традиционным лезвийным инструментом ведется на малых скоростях с низкой производительностью, что является сдерживающим фактором в условиях серийного производства.

Анализ современных способов решения этой проблемы показал, что наиболее перспективным является применение комбинированного электрического и механического воздействия, реализуемого в процессе абразивного электрохимического шлифования (АЭХШ). Это процесс характеризуется

ся съемом материала за счет одновременно протекающих процессов: анодного растворения, механического резания алмазными зёрнами и электроэрозионных явлений [6; 8–9].

Обрабатываемость жаропрочных сплавов характеризуется активной адгезией материала заготовки на абразивный круг [4]. Вследствие чего повышается термомеханическое воздействие в зоне резания. Процесс сопровождается появлением прижогов, микротрещин и заусенцев. Уменьшение глубины резания и увеличение количества проходов приводит к снижению производительности процесса. Применение высококачественного режущего инструмента, эффективное охлаждение и современное оборудование не всегда имеют возможность обеспечить необходимые требования, предъявляемые к качеству поверхностного слоя обрабатываемых деталей и производительности процесса. Для повышения производительности процесса, улучшения качества поверхностного слоя и увеличения усталостной прочности обрабатываемых деталей, необходимо своевременно очищать режущий инструмент от налипающего материала заготовки.

В настоящее время существуют следующие методы очистки и правки абразивных кругов [5–7]:

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 подается 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 C1-C4. Размер зерна и концентрацию зерен подбирают исходя из зернистости алмазного инструмента (табл. 1). Обработку ведут непрерывно с подачей большого количества охлаждающей жидкости.

Таблица 1

Характеристики абразивного инструмента

	Характеристика круга	Характеристика бруска
1	AC12 – AC25	K3 (16-25), (C1-C2) K5
2	AC8 – AC10	K3 (8-12), (CM1-CM2) K8
3	AC5	K3 (3-4), (M1-CM2) K9

Но нужно отметить, что очистка и правка кругов абразивным бруском сопровождается очень высоким расходом бруска и занимает большое количество времени.

4. *Правка свободным абразивом*. Очистку и правку 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 примене-

нии дополнительного привода вращения правящего инструмента.

При каждом цикле правки абразивного круга удаляется большой абразивный слой вместе со связкой, что резко снижает ресурс абразивного круга. В связи с этим предложен метод очистки режущего инструмента только по мере загрязнения.

Для эффективной обработки деталей из жаропрочных сплавов разработан способ периодической очистки режущего инструмента за счет введения дополнительного источника питания, для подачи импульсов обратной полярности и дополнительно очищающего электрода-инструмента (рис. 1).

Целью работы является проведение исследований предлагаемого метода очистки абразивного круга.

Материалы и методики исследований

Для проведения исследований использовались как объекты обработки образцы из интерметаллидного сплава ВКНА-1В ВИ, химический состав которого представлен в табл. 2 [1–2]. Обработка велась на станке для плоского шлифования Наромат RP 0200 M1, который был модернизирован с целью возможности АЭХШ. Станок укомплектован источником технологического тока «Пульсар СМАРТ 1000/12» с широким диапазоном технологических возможностей.

В качестве электролита для обработки был выбран водный раствор 6% NaNO_3 , 0.5% NaNO_2 , 0.5% Na_2CO_3 , 2% глицерина, плотность электролита составляла $\rho = 1.07\text{--}1.04 \text{ г/см}^3$ контролировалась ареометром. В качестве инструмента для электрохимического алмазного шлифования использовался абразивный круг на металлической связке, марка AC20 160/125 100 M2-02 575.

Запись электрических параметров производилась при помощи цифрового осциллографа RIGOL-DS 1104 Z, загрязненность абразивного круга контролировалась без снятия круга при помощи переносного цифрового микроскопа «Микмед-5.0».

Рис. 1. Фотография дополнительного очищающего электрода-инструмента, установленного непосредственно на станке.

Таблица 2

Химический состав интерметаллидного сплава ВКНА-1В

Сплав	Химический состав сплава, масс.%							
	Ni	Al	Ti	Cr	W	Mo	Hf	C
ВКНА-1В	Осн.	8...9	1...3	5...6	2...4	2.5...4.5	0.35	0.04

Рис. 2. Фотография образца для обработки.

Для обработки использовались образцы с длиной 60 мм, шириной 5 мм, высотой 20 мм. Фотография образца для проведения обработки представлена на *рис. 2*.

Для исследований результатов абразивного электрохимического шлифования из полученных заготовок нарезались образцы на электроэрозионном станке 4Г721. Для проведения оптической металлографии образцы шлифовались на шлифовально-полировальном станке РТ-232 и полировались алмазными пастами АСМ 10/7, 7/5, 5/3, 3/2, 2/1, 1/0 НОМГ ГОСТ 25593-83.

Для оценки загрязненности абразивного круга предлагается использовать 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. 3* и 4. По мере загрязнения режущего инструмента на систему управления 16 поступает сигнал о возрастании термомеханического воздействия в зоне обработки и сокращении фазы ЭХО, т.е. увеличении косвенного параметра очистки.

Рис. 3. 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.

Рис. 4. Алгоритм системы очистки режущего инструмента.

Предложенный алгоритм управления сигналом при очистке представлен на *рис. 4*.

После чего система управления 16, включает систему очистки, состоящую 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.

Результаты и обсуждения

На качество поверхностного слоя обрабатываемой детали и точности получения паза при АЭХШ влияет множество параметров, таких как марка материала, скорость рабочей подачи, глубина обработки и т.д., влияние которых также было исследовано в работе. При АЭХШ без периодической очистки круга на малых скоростях рабочей подачи (20 мм/мин), качество поверхностного слоя

(*рис. 5а*) удовлетворяет требованиям по обеспечению усталостной прочности, так как измененный слой удаляется за счет электрохимического растворения материала заготовки, при этом дополнительно снижается термомеханическое воздействие абразивных зерен, снижается износ круга (*рис. 6а*). Но за счет электрохимического растворения ухудшается точность обработки, размер паза по ширине составлял 1.33 мм (*рис. 7а*), при допустимом размере 1.25 мм.

С увеличением скорости рабочей подачи точность обработки повышается, размер паза по ширине составлял 1.24 мм (*рис. 7б*), но материал заготовки не успевает удалиться с поверхности режущего инструмента, появляются короткие замыкания, увеличивается доля электроэрозионной составляющей (*рис. 6б*), что приводит к ухудшению качества поверхностного слоя обрабатываемой детали, появляется измененный слой 30...35 мкм (*рис. 5б*).

Рис. 5. Результаты структурных исследований образцов после АЭХШ:
а) на скорости рабочей подачи 20 мм/мин, увеличение $\times 100$,
б) на скорости 80 мм/мин, увеличение $\times 100$.

Рис. 6. Результаты исследований загрязнения абразивного круга при АЭХШ:
а) на скорости рабочей подачи 20 мм/мин, увеличение $\times 10$,
б) на скорости 80 мм/мин, увеличение $\times 10$.

Рис. 7. Фотографии разбивки паза после АЭХШ:
а) на скорости рабочей подачи 20 мм/мин, увеличение $\times 10$,
б) на скорости 80 мм/мин, увеличение $\times 10$.

Таким образом, проведенные обработки без периодической очистки круга не позволили получить одновременно необходимое качество поверхностного слоя и требуемую точность паза.

Для обеспечения оптимального значения термомеханического воздействия, зависящего от загрязненности режущего инструмента, была проведена обработка с периодической очистки круга.

Была исследована зависимость усилия резания от протяженности паза (длительности фазы электрохимической обработки (ЭХО)) и глубины шлифования (рис. 8). На этапе врезания в деталь усилия резания возрастают, по мере выхода абразивного круга из обрабатываемой заготовки усилия резания снижаются. Исследования показали, что по мере увеличения глубины шлифования (рис. 8), абразивный круг засаливается быстрее и не успевает очиститься за счет электрохимической составляющей, в результате дополнительно возрастает усилие резания.

Рис. 8. Зависимости усилия резания от протяженности паза при различной глубине шлифования (h_n).

При длительном шлифовании на одной глубине (5 мм), с каждым проходом абразивный круг засаливается, что также ведет к увеличению термо-

механического воздействия на обрабатываемый материал (рис. 9).

Рис. 9. Зависимости усилия резания от времени обработки, рез 1,2,3 последовательные проходы.

Исследования показали, что по мере загрязнения круга интенсивность электрохимического воздействия уменьшается и при больших скоростях и глубинах прекращается, а вклад термомеханического воздействия увеличивается. Это приводит к появлению прижогов.

На рис. 10а представлена осциллограмма процесса АЭХШ при обработке на чистом круге. Из рис. 10а видно, что процесс характеризуется закономерностью и стабильностью. По мере загрязнения абразивного круга неизбежно увеличивается интенсивность замыканий, имеет место активный электроэрозионный процесс, вследствие чего, как можно видеть на осциллограмме рис. 10б, процесс характеризуется нестабильностью. На рис. 10в представлена осциллограмма процесса АЭХШ с предложенным способом очистки режущего инструмента.

Рис. 10. Осциллограммы процесса АЭХШ, описывающая длительность фазы ЭХО от степени загрязненности круга: а) обработка на чистом абразивном круге, б) обработка на загрязненном абразивном круге, в) с очисткой.

Рис. 11. Фотографии поверхности абразивного круга: а) нового круга, б) загрязненного круга, в) после очистки электроэрозионным методом, г) после очистки предложенным методом.

Рис. 12. Результаты структурных исследований образцов после АЭХШ с очисткой на скорости 80 мм/мин, увеличение $\times 100$.

На *рис. 11* представлены результаты исследований загрязненности режущего инструмента.

На *рис. 12* представлены результаты металлографических исследований поверхности образца после АЭХШ с предлагаемым методом очистки. Обработка происходила на рабочем напряжении $U = 8$ В, сила тока $I = 150$ А, скорость рабочей подачи составляла 80 мм/мин, глубина шлифования – 5 мм. На дополнительный электрод для очистки подавалось напряжение 15 В, средний ток 10 А, межэлектродный зазор составлял 0.05 мм. Происходила одновременная очистка алмазного круга. Длительность очистки составляла 2.5 мин. Шероховатость обработки составила $Ra\ 0.32$, измененный слой в поверхностном слое образца не наблюдался.

Исследования показали, что при использовании предложенного способа периодической очистки абразивного круга, качество поверхностного слоя и точностные параметры обработки удовлетворяют требованиям, размер паза по ширине составляет 1.25 мм.

Установлено, что для поддержания режущих свойств шлифовального круга и уменьшения его износа очистку в процессе обработки следует производить путем подачи импульсов обратной полярности через дополнительный электрод на время превышения значения параметра оценки загрязненности шлифовального круга заданной величины.

Выводы

Проведены исследования качества поверхностного слоя образцов из жаропрочного интерметаллидного сплава ВКНА-1В ВИ в зависимости от скорости рабочей подачи, которые показали, что с увеличением скорости рабочей подачи ухудшается качество поверхностного слоя образца, появляется дефектный слой 30–35 мкм, что недопустимо.

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.

Проведены исследования параметров точности в зависимости от скорости рабочей подачи. Установлено, что на скорости рабочей подачи 80 мм/мин ширина паза по глубине отвечает требованиям, но формируется измененный слой, что недопустимо. При малых скоростях рабочих подач 20 мм/мин за счет активного электрохимического растворения происходит разбивка паза по глубине.

Установлено, что для поддержания режущих свойств шлифовального круга и уменьшения его износа очистку в процессе обработки следует производить путем подачи импульсов обратной полярности через дополнительный электрод на время превышения значения параметра оценки загрязненности шлифовального круга заданной величины.

Разработан способ АЭХШ, обеспечивающий заданное значение термомеханического воздействия и позволяющий эффективно очищать поверхность инструмента.

ЛИТЕРАТУРА

1. Базылева О. А. Влияние высокотемпературного отжига на структуру и свойства сплавов на основе интерметаллида Ni_3Al . О. А. Базылева, Э. Г. Аргинбаева, М. В. Унчикова, Ю. В. Костенко // Вестник МГТУ им. Н. Э. Баумана. Сер. «Машиностроение». 2016. №1. С. 112–122.
2. Бунтушкин В. П. Новый литейный сплав ВКНА-1В. В. П. Бунтушкин, Е. Н. Каблов, О. А. Базылева. ВИАМ/1991 – 200868 // «Авиационная промышленность», №12. 1991.
3. Галимова Л. А., Атрощенко В. В., Смирнов В. В., Чуракова А. А., Гундеров Д. В., Заманова Г. И. Структура и механические свойства образцов из нержавеющей стали, полученных методом селективного спекания // Вестник БашГУ. 2016. Т. 21. №2, 258–262.
4. Захаров М. В. Жаропрочные сплавы. М. В. Захаров, А. М. Захаров. М.: Металлургия, 1972. С. 384.
5. Иноземцев А. А. Основы конструирования авиационных двигателей и энергетических установок: учеб. для студ. спец-ти «Авиационные двигатели и энергетические установки». А. А. Иноземцев, М. А. Нихамкин, В. Л. Сандрацкий. Сер.: «Газотурбинные двигатели». Т. 2. М.: Машиностроение, 2007. 396 с., ил.
6. Казаков В. Ф. Шлифование при повышенных скоростях резания. Киев: Техника, 1971. 172 с.
7. Кишалов А. Е. Анализ нагрузок, действующих на элементы конструкции ГТД. А. Е. Кишалов, В. М. Кудоярова, К. В. Маркина, О. И. Игнатьев // Молодой ученый. 2012. №11. С. 52–60.
8. Маслов Е. Н. Теория шлифования материалов. М.: Машиностроение, 1974. 320 с.
9. Хрульков В. А. Шлифование жаропрочных сплавов. М.: Машиностроение, 1964. 190 с.

Поступила в редакцию 11.01.2019 г.

STUDY OF ELECTROCHEMICAL GRINDING PROCESSES OF DETAILS PRODUCED FROM REFRACTORY ALLOYS

© R. Kh. Gantsev¹, V. V. Atroschenko², D. V. Gunderov^{2,3},
L. A. Taymasova^{1,2*}, M. V. Vatiev¹, G. I. Zamanova⁴

¹ISTC "ISKRA"

81 Pushkin Street, 450008 Ufa, Republic of Bashkortostan, Russia.

²Ufa State Aviation Technical University

12 Karl Marx Street, Ufa 450000, Republic of Bashkortostan, Russia.

³Institute of Molecule and Crystal Physics, RAS

151 Oktyabrya Avenue, Ufa 450075, Republic of Bashkortostan, Russia.

⁴Bashkir State University

32 Zaki Validi Street, 450076 Ufa, Republic of Bashkortostan, Russia.

*Email: lagalimova@yandex.ru

A method for abrasive electrochemical grinding of parts produced from heat-resistant alloys is proposed with the use of a new method for cleaning the cutting tool by estimating the indirect parameter for assessing the degree of contamination of the abrasive wheel. The dependence of the quality of the surface layer of samples produced from the high-temperature intermetallic alloy VKNA-1B on the speed of the cutting feed rate was studied. The study showed that the quality of the surface layer of the sample deteriorated with the increase of cutting feed rate. At the certain rate, a defective layer with thickness of 30–35 μm appeared, which is unacceptable. The study of the degree of contamination of the abrasive wheel depends on the speed of the cutting feed rate. It was established that with the increase in the speed of the cutting feed rate, the rate of cleaning the abrasive wheel by electrochemical dissolution became insufficient, the share of the electroerosive component increases, which reduces the quality surface layer of the processed sample. Studies were conducted considering the dependence of the accuracy parameters on the cutting feed rate. It was established that at the cutting feed rate of 80 mm/min, the width of the groove meets the necessary requirements, but an altered layer is formed, which is unacceptable. At low cutting feed rate of 20 mm/min, the groove became too wide due to active electrochemical dissolution. Studies were carried out, which revealed that the parameter calculated as the ratio of the cutting force and the duration of the ECP phase per rotation of the spindle is independent on the working speed of the tool electrode; i.e. the processing depth is universal parameter.

Keywords: abrasive electrochemical grinding, microcutting, intermetallic nickel alloy, electrolyte, electrochemical treatment, ECP phase, electroerosion.

Published in Russian. Do not hesitate to contact us at bulletin_bsu@mail.ru if you need translation of the article.

REFERENCES

1. Bazyleva O. A. Vestnik MGTU im. N. E. Bauman. Ser. «Mashinostroenie». 2016. No. 1. Pp. 112–122.
2. Buntushkin V. P. «Aviatsionnaya promyshlennost'», No. 12. 1991.
3. Galimova L. A., Atroschenko V. V., Smirnov V. V., Churakova A. A., Gunderov D. V., Zamanova G. I. Vestnik BashGU. 2016. Vol. 21. No. 2, 258–262.
4. Zakharov M. V. Zharoprochnye splavy. M. V. Zakharov, A. M. Zakharov. Moscow: Metallurgiya, 1972. Pp. 384.
5. Inozemtsev A. A. Osnovy konstruirovaniya aviatsionnykh dvigatelei i energeticheskikh ustanovok: ucheb. dlya stud. spets-ti «Aviatsionnye dvigateli i energeticheskie ustanovki». A. A. Inozemtsev, M. A. Nikhamkin, V. L. Sandratskii. Ser.: «Gazoturbinnye dvigateli». Vol. 2. Moscow: Mashinostroenie, 2007. 396 pp., il.
6. Kazakov V. F. Shlifovanie pri povyshennykh skorostyakh rezaniya. Kiev: Tekhnika, 1971.
7. Kishalov A. E. Molodoi uchenyi. 2012. No. 11. Pp. 52–60.
8. Maslov E. N. Teoriya shlifovaniya materialov. Moscow: Mashinostroenie, 1974.
9. Khrul'kov V. A. Shlifovanie zharoprochnykh splavov. Moscow: Mashinostroenie, 1964.

Received 11.01.2019.