

И. А. Афанасьева, В. Л. Юрьев

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ РЕЖИМОВ ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОГО АЛМАЗНОГО ШЛИФОВАНИЯ НА КАЧЕСТВО РАБОЧИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ЩЕТОЧНЫХ УПЛОТНЕНИЙ

Рассмотрено влияние геометрических параметров щеточных уплотнений (ЩУ) и качества обработки рабочих поверхностей. Вопрос точности выполнения сопрягаемого внутреннего диаметра щеточных уплотнений связан с выбором режимов электрохимического алмазного шлифования, которые обеспечили бы необходимое качество обработанной поверхности. Знание закономерностей комплексного и раздельного влияния параметров поверхностного слоя после механической обработки на эксплуатационные свойства позволяет осуществлять оптимизацию технологических процессов. *Щеточные уплотнения; алмазное шлифование; шероховатость*

К качеству поверхности внутреннего диаметра щеточного уплотнения предъявляются высокие требования. Шероховатость поверхности Ra 0,2...1,6 мкм; идентичность химического состава и структуры поверхностного слоя и основы металла уплотнительных элементов; отсутствие заусенцев, острых кромок, растягивающих напряжений поверхностного слоя.

Перспективным методом чистовой обработки труднообрабатываемых материалов, из которых выполнены упругие элементы ЩУ, является метод электрохимического алмазного шлифования (ЭХАШ), в котором сьем металла происходит за счет механической и электрохимической составляющих. В работе [1] установлен предел, которого может достигнуть доля механического съема – 40 %. Это означает, что в процессе выполнения этой операции на деталь действуют меньшие силы резания, что благоприятно при обработке нежестких деталей или их элементов. Достоинство этого метода – быстрый сьем металла в сочетании с высокой точностью, отсутствием заусенцев, микротрещин, прижогов на обрабатываемой поверхности. Шероховатость поверхности деталей, обработанных электрохимическим алмазным шлифованием, определяемая в Ra, значительно меньше, чем при обычном алмазно-абразивном шлифовании и может быть равна при определенном сочетании технологических параметров и параметров характеризующих режим обработки, Ra 0,32–0,08 мм [2]. Электрохимическое алмазное шлифование позволяет вести обработку с меньшими силами резания, что является важ-

ным аспектом при обработке нежестких деталей.

По мере увеличения глубины резания рельеф формируется под действием деформации, вызываемой алмазными зернами. При электрохимическом алмазном шлифовании эффективная мощность резания ниже и уровень остаточных напряжений в поверхностном слое меньше.

Одним из параметров, влияющих на шероховатость после электрохимического алмазного шлифования, является характеристика круга.

Для электрохимической алмазной обработки применяют круги на металлической связке зернистостью 80/63–400/315, концентрацией 100 %. Износ кругов на металлической связке зависит от параметров шлифования, но, как правило, в несколько раз меньше износа кругов при обычном шлифовании абразивными кругами. Минимальные значения износа отмечены у кругов зернистостью 125/100 с концентрацией 100 %. Уменьшение зернистости приводит к росту величины износа [3].

Увеличение скорости шлифования ведет к уменьшению сечения стружки, снимаемой каждым зерном, что снижает нагрузку на каждое зерно. Чем меньше зернистость, тем ниже интенсивность снижения нагрузки на зерно и тем меньше должно быть влияние скорости круга на износостойкость.

Известно, что чем ниже скорость перемещения детали, тем меньше величина микронеровностей [4].

Параметрами, влияющими на интенсивность процесса электрохимического растворения металла обрабатываемой детали, являются плотность тока и время растворения  $t_{\text{э.х}}$ . На практике, для осуществления электрохимического раство-

рения в процессе электрохимического алмазного шлифования применяют рабочее напряжение технологического тока в пределах 6...10 вольт. При выборе величины рабочего напряжения учитывают ряд факторов. Очень важно исключить возможность интенсивного искрообразования. Электроэрозионные процессы увеличивают износ круга и ухудшают качество обработанной поверхности. Проведенные Е. К. Прониным исследования электроабразивного шлифования жаропрочных сплавов показали, что при работе на больших подачах обработку следует вести на малых глубинах резания ( $t = 0,01-0,05$  мм) с тем, чтобы обеспечить значительную долю электрохимического съема. Доля механического съема зависит от условий шлифования.

В литературе [5] экспериментально был определен диапазон режимов резания: величина рабочей подачи (для внутреннего шлифования это окружная круговая подача)  $S = 200-400$  мм/мин, глубина резания  $t = 0,05$  мм при черновом проходе, глубина резания  $t = 0,02$  мм при чистовом проходе. Рекомендуется выполнять один выхаживающий проход без врезания. Шлифование жаропрочного сплава на таких режимах обеспечивает отсутствие прижогов и остаточных напряжений растяжений в шлифованной поверхности.

Процесс электрохимического алмазного шлифования успешно внедрен при обработке нежестких деталей типа сотовых панелей, при шлифовании нежестких лопаток ГТД из жаропрочных и титановых сплавов и др.

В ходе работы проведены исследования влияния зернистости токопроводящего круга на качество обработанной поверхности щеточного уплотнения: шероховатость и изменение химического состава.

В качестве образца для проведения исследований использовалось кольцо-имитатор ЩУ (рис. 1), представляющее собой пакет проволоки намотанной по определенной схеме (рис. 2), и зажатой между двумя кольцами. Материал проволоки – сплав на основе кобальта. Химический состав сплава представлен в табл. 1.

Эксперимент проводился на полуавтоматическом плоско-внутришлифовальном станке с ЧПУ для электрохимического алмазного шлифования модели ОШ-642ЭФ3.

В первой серии экспериментов использовался токопроводящий круг АС32 125/100 М2-01 100 %. Режимы обработки: скорость вращения круга  $V_{кр} = 11,5$  м/с, окружная скорость враще-

ния детали  $V_d = 2$  м/мин, глубина резания  $t = 0,05$  мм при черновом проходе, глубина резания  $t = 0,02$  мм при чистовом проходе, напряжение при обработке  $U = 8$  В, сила тока  $I = 21$  А.

Таблица 1  
Химический состав исходного материала ЩУ (%)

| Co   | Cr | Al   | W    | Mo  | Fe  | Ni | Mn  | Cu  |
|------|----|------|------|-----|-----|----|-----|-----|
| 44,7 | 20 | 0,85 | 19,2 | 1,2 | 2,2 | 10 | 1,4 | 0,2 |

Для повышения жесткости пакета ЩУ на время обработки кольцо-имитатор заливалось скрепляющим составом на основе нитроцеллюлозного лака.

Во время обработки на мониторе источника технологического тока наблюдалось изменение силы тока от 16 до 20,9 А и напряжения от 1,8 до 5,8 В.

Использовались токопроводящими кругами АС32 125/100 М2-01 100%, АС32 125/100+80/63 М2-01 100%, АС32 80/60 М2-01 100%.



а



б

Рис. 1. Кольцо-имитатор ЩУ до обработки: а – внешний вид кольца перед обработкой; б – сегмент кольца до механической обработки

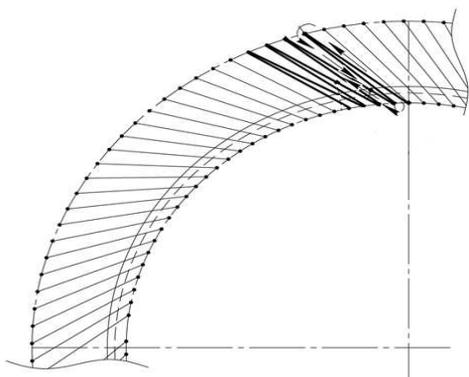


Рис. 2. Схема намотки проволоки

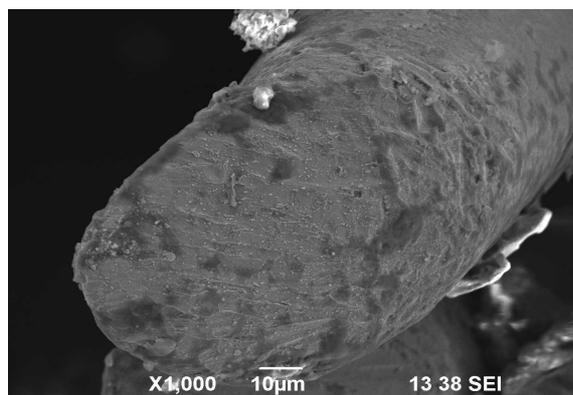


Рис. 3. Рабочая поверхность ЩУ, обработанная кругом АС32 125/100 М2-01 100% на режимах  $V_{кр} = 11,5$  м/с,  $V_{д} = 2$  м/мин,  $U = 8$  В

Полученная рабочая поверхность кольца-имитатора, обработанная алмазным токопроводящим кругом АС32 125/100 М2-01 100 %, представлена на рис. 3. Видно, что щетинки имеют округлую форму. Заусенцы, зоны пластической деформации, удлинение сечения среза, прижеги не наблюдаются. Получена однородная структура без следов эрозии. Проведен замер внутреннего диаметра кольца-имитатора на установке бесконтактного замера геометрических параметров щеточного уплотнения. Фактическая глубина резания составила 0,49 мм. Производительность процесса при этом составила 200 мм<sup>3</sup>/мин.

Производительность съема обрабатываемого материала определяется по формуле:

$$П = S \cdot t \cdot b \text{ мм}^3/\text{мин}, \quad (1)$$

где  $S$  – продольная подача, мм/мин;  $t$  – глубина резания, мм;  $b$  – ширина обрабатываемой поверхности, мм.

Для повышения производительности процесса была увеличена окружная скорость вращения детали до  $V_{д} = 4$  м/мин.

Результаты экспериментальных исследований электрохимического алмазного шлифования кольца-имитатора на станке с ЧПУ ОШ-642ЭФ3 представлены в табл. 2.

В результате проведенных экспериментов, как видно на рис. 4, прижеги, зоны пластической деформации, заусенцы на кончиках щетин окне наблюдаются. Производительность процесса при этом составила 400 мм<sup>3</sup>/мин.

Таблица 2

**Результаты экспериментов по электрохимическому алмазному шлифрованию кольца-имитатора ЩУ**

| № серии | Вид алмазного круга             | Режимы обработки |              |                 |         | Дефекты |   |   |    |    |   |
|---------|---------------------------------|------------------|--------------|-----------------|---------|---------|---|---|----|----|---|
|         |                                 | $V_{кр}$ , мм    | $t$ , мм     | $V_{д}$ , м/мин | $U$ , В | А       | Б | В | Г  | Д  | Е |
| 1       | АС32 125/100 М2-01 100%         | 11,5             | 0,05<br>0,02 | 4               | 8       | -       | - | - | -  | -  | - |
|         | -                               |                  |              |                 |         | -       | - | - | -  | -  |   |
|         | -                               |                  |              |                 |         | -       | - | - | -  | -  |   |
| 2       | АС32 125/100 + 80/63 М2-01 100% | 11,5             | 0,05<br>0,02 | 4               | 8       | -       | - | - | -  | -  | - |
|         | -                               |                  |              |                 |         | -       | - | - | -  | -  |   |
|         | -                               |                  |              |                 |         | -       | - | - | -  | -  |   |
| 3       | АС32 125/100 М2-01 100%         | 11,5             | 0,05<br>0,02 | 4               | 8       | -       | - | - | -  | ++ | - |
|         | -                               |                  |              |                 |         | -       | - | - | ++ | -  |   |
|         | -                               |                  |              |                 |         | -       | - | - | ++ | -  |   |

Примечание: 1. А, Б, В, Г, Д – выявленные дефекты:

- А – наличие оплавленных кончиков проволоки;
- Б – наличие зон пластической деформации;
- В – наличие заусенцев на кончиках щетин;
- Г – наличие отклонения от границ уплотнения;
- Д – удлинение сечения среза;
- Е – значительное отклонение от прямолинейности рабочей поверхности УЭ;

Число экспериментов в серии не менее трех.

Количество знаков "+" обозначает величину дефектов;

Знак "-+" обозначает дефект в единичном количестве;

Знак "-" обозначает отсутствие дефектов.

Исследован химический состав проволоки с помощью системы энергодисперсионного (EDS) анализа на рентгено-энергодисперсионном микроскопе (РЭМ) «JEOLJSM-840», оснащенной приставкой фирмы «INCA Crystal». Результаты съемки автоматически обрабатывались в программе «INCA Energy 350» по полученным EDS распределениям (спектрам).

Таблица 3

**Химический состав сегментов кольца-имитатора после электрохимического алмазного шлифования**

| Al  | Cr    | Mn   | Fe   | Co    | Ni    | Cu   | Mo    | W     | Итого |
|---|-------|------|------|-------|-------|------|-------|-------|-------|
| Образец 1 обработанный кругом AC32 125/100 + 80/63 M2-01 100% |       |      |      |       |       |      |       |       |       |
| 0,02  | 20,55 | 1,94 | 4,51 | 41,95 | 10,19 | 2,07 | 1,01  | 11,77 | 100   |
| 0,41  | 20,75 | 1,73 | 3,35 | 47,03 | 9,55  | 0,78 | 0,94  | 13,31 | 100   |
| Образец 2 обработанный кругом AC32 80/63 M2-01 100%           |       |      |      |       |       |      |       |       |       |
| 0,17  | 20,92 | 2,42 | 2,76 | 48,22 | 10,87 | 0,8  | 0,71  | 10,75 | 100   |
| 0,21  | 21,81 | 1,91 | 2,87 | 50,45 | 10,01 | 0,26 | 0,77  | 12,74 | 100   |
| Образец 3 обработанный кругом AC32 125/100 M2-01 100%         |       |      |      |       |       |      |       |       |       |
| -0,01   | 20,02 | 2,02 | 3,88 | 42,9  | 10,14 | 1,1  | 1,21  | 15,9  | 100   |
| 0,76  | 21,05 | 2,01 | 4,13 | 45,48 | 12,17 | 1,14 | -0,03 | 9,39  | 100   |

Истинная концентрация искомого элемента определялась как

$$I = \frac{A_{\text{обр}}}{A_{\text{станд}}} \times wt, \quad (2)$$

где  $A_{\text{обр}}$  – интенсивность искомого элемента по полученным EDS спектрам;

$A_{\text{станд}}$  – интенсивность искомого элемента по стандартным табличным значениям;

$wt$  – масса искомого элемента по стандартным табличным значениям, вес. %.

Как видно из табл. 3, после электрохимического алмазного шлифования происходит изменение химического состава поверхностного слоя обрабатываемого материала.

При обработке токопроводящим кругом AC32 125/100 M2-01 100% изменение основного элемента кобальта (Co) составило 1,13 %, при обработке кругом AC32 125/100 + 80/63 M2-01 100% – 0,5 %, и при обработке AC32 80/63 M2-01 100% – 10,45 %.

Большой процент изменения химического состава поверхностного слоя при обработке кругом с меньшим размером зерна можно объяснить меньшей величиной межэлектродного зазора, вследствие чего происходит увеличение плотности тока, приходящейся на единичную щетинку, а значит и увеличение температуры в зоне обработки, что способствует диффузионным процессам.

Жаропрочные сплавы, к которым относится материал проволоки щеточного уплотнения, имеют структуру с весьма большими размерами зерен, этим можно объяснить неравномерность анодного растворения на различных участках поверхности. Поэтому, чем больше время воздействия электролита, границы между зёрнами растворяются более интенсивно, чем сами зёрна. Увеличение скорости продольной подачи уменьшает время контакта электролита с по-

верхностью, и растворение материала происходит на меньшую величину, а механическая составляющая съема увеличивается, тем самым величина микронеровностей также увеличивается.

С помощью лазерного сканирующего микроскопа «LSM-5-Exciter», который позволяет бесконтактно качественно и количественно определять 3D-параметры рельефа и шероховатости поверхности, исследована шероховатость поверхности щетинки, обработанной токопроводящими алмазными кругами разных характеристик.

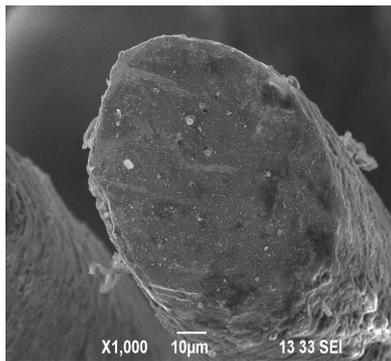
Получено 3D-изображение торцевой поверхности щетинки после обработки (рис. 5). Ось  $Y$  – длина исследуемого участка в мкм.

На рис. 6 изображен график изменения величины неровностей. Ось  $Z$  – высота неровностей в мкм, ось «distance» – длина участка исследуемой поверхности в мкм.

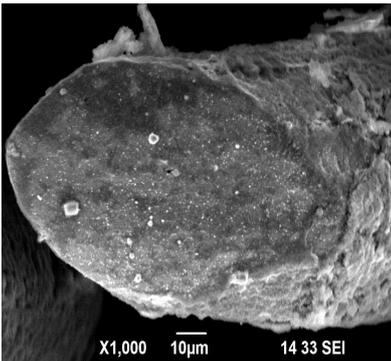
Исследования показали, что полученная шероховатость поверхности щетинок после электрохимического алмазного шлифования токопроводящим кругом AC32 125/100 + 80/63 M2-01 100 % составила в  $R_z$  – 27,396 мкм и в  $R_a$  – 0,440 мкм. Данные результаты не превышают заданного параметра шероховатости ( $R_a$  – 1,6 мкм).

В результате исследования второго образца полученная шероховатость поверхности щетинок после электрохимического алмазного шлифования на тех же режимах токопроводящим кругом AC32 125/100 M2-01 100% составила в  $R_z$  – 35,652 мкм и в  $R_a$  – 1,086 мкм (рис. 7).

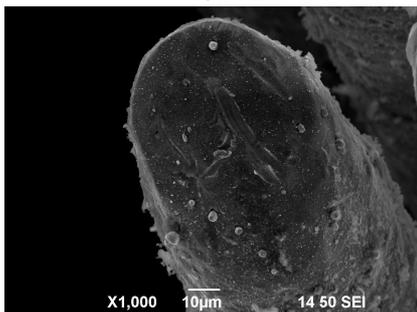
В результате исследования третьего образца полученная шероховатость поверхности щетинок после электрохимического алмазного шлифования (рис. 8) на тех же режимах токопроводящим кругом AC32 80/63 M2-01 100 % составила  $R_z$  30,304 мкм и  $R_a$  2,065 мкм.



a



b

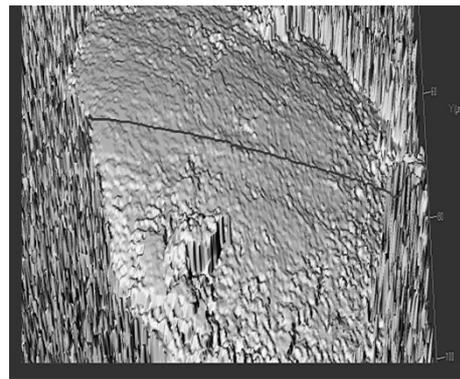


c

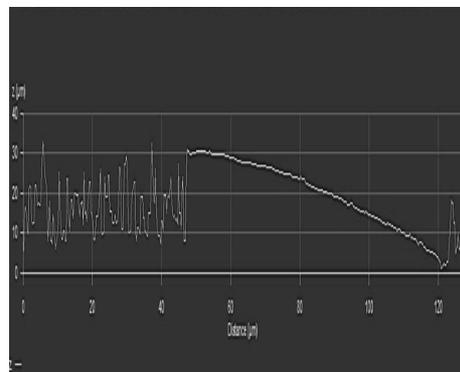
**Рис. 4.** Торцевая поверхность ЩУ после электрохимического алмазного шлифования: *a* – обработано токопроводящим кругом AC32 125/100 M2-01 100 %; *b* – обработано токопроводящим кругом AC32 125/100 + 80/63 M2-01 100 %; *c* – обработано токопроводящим кругом AC32 80/63 M2-01 100 %

Меньшая величина шероховатости получена при обработке токопроводящим кругом AC32 125/100 + 80/63 M2-01 100%, поэтому круг данной характеристики можно рекомендовать для использования при реализации процесса электрохимического алмазного шлифования.

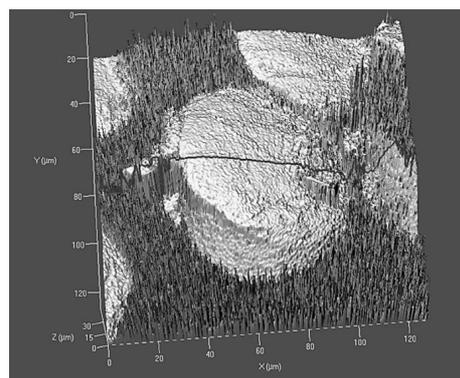
Анализ исследования качества поверхности показал, что при электрохимическом алмазном шлифовании на вышеуказанных режимах обеспечиваются заданные требования по шероховатости поверхности щетки (Ra 1,6 мкм).



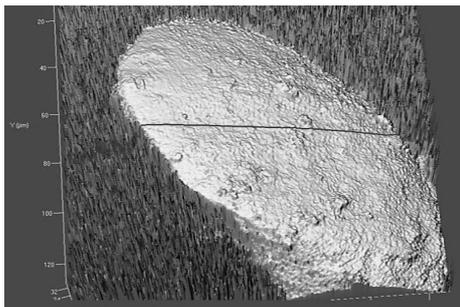
**Рис. 5.** 3D-изображение щетки после обработки токопроводящим кругом AC32 125/100 + 80/63 M2-01 100 %



**Рис. 6.** График изменения величины шероховатости после обработки токопроводящим кругом AC32 125/100 + 80/63 M2-01 100 %



**Рис. 7.** 3D-изображение щетки после обработки токопроводящим кругом AC32 125/100 M2-01 100%



**Рис. 8.** 3D-изображение щетинки после обработки токопроводящим кругом AC32 80/63 M2-01 100 %

В результате электрохимического алмазного шлифования происходит изменение химического состава поверхностного слоя в зависимости от зернистости обрабатывающего токопроводящего круга. Меньшее изменение химического состава наблюдалось при обработке кругом AC32 125/100 + 80/63 M2-01 100%.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Interhati. Mach. Tool Desing and Res. 1966. Vol. 6, № 1. P. 9–13.
2. **Стекольников Ю. А., Стекольников Н. М.** Физико-химические процессы в технологии машино-

строения: учеб. пособие. Елец: Изд-во Елецк. гос. ун-та, 2008.

3. **Вайнберг Р. Р., Васильев В. Г.** Электрохимическое шлифование токопроводящими абразивными и алмазными кругами. М.: Машиностроение 1976. 32 с.

4. Электрофизические и электрохимические методы обработки: учеб. пособие / З. И. Поляков [и др.]. Челябинск: ЮУрГУ, 2006. 89 с.

5. **Попов Л. М.** Физико-химические методы обработки: компьютерный текст лекций. Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2006. 97 с.

#### ОБ АВТОРАХ

**Афанасьева Ирина Александровна**, соиск. каф. технологии машиностроения (УГАТУ, 2010). Дипл. инженер по технологии машиностроения (УГАТУ, 2004). Иссл. в обл. электрохимическ. алмазн. шлифования рабочих поверхностей щеточных уплотнений газотурбинных двигателей.

**Юрьев Виктор Леонидович**, проф. той же каф., ген. дир. ОАО НИИТ. Дипл. инженер-механик (УАИ, 1973). Д-р техн. наук по тепловым двигателям (УГАТУ, 2000). Иссл. в обл. технологии нестационарной механической обработки.