

## Электрохимические особенности взаимодействия сталей Р6М5К5 и Р18 с медной связкой шлифовального круга

Е.Н. Тимофеев<sup>а</sup>, И.Я. Шестаков<sup>б</sup>, В.И. Шестаков<sup>с</sup>

Сибирский государственный университет науки и технологий им. М.Ф. Решетнёва, пр. «Красноярский рабочий», 31, Красноярск, Россия

<sup>а</sup> timofeev1800@gmail.com, <sup>б</sup> yakovlevish@mail.ru, <sup>с</sup> pn3vm4t@gmail.com

<sup>а</sup> <https://orcid.org/0009-0002-8482-704X>, <sup>б</sup> <https://orcid.org/0000-0002-7759-5159>, <sup>с</sup> <https://orcid.org/0009-0002-8564-0551>

Статья поступила 01.04.2024, принята 23.04.2024

*Для отделочных операций применяются комбинированные методы обработки, в том числе электроалмазная обработка. Этот метод имеет следующие недостатки: засаливание электрода-инструмента, скругление режущей кромки, изменение микротвердости, микрорастворивание, отклонение формы обрабатываемой поверхности. В ранее проведенных исследованиях электроалмазной обработки основное внимание уделено вопросам засаливания алмазного шлифовального круга, удельному расходу круга и состоянию поверхности. Для выявления причин появления недостатков (микрорастворивание поверхности детали) проведен анализ источников тока в электрохимической системе. Результаты исследований показали, что плотности токов от гальванических элементов, образованных между катодом-инструментом и анодом-заготовкой и между фазами обрабатываемой заготовки, на порядок меньше плотности технологического тока. Такие токи за время обработки не более 3 мин не могут привести к микрораствориванию. Этот дефект может возникнуть при длительном хранении деталей во влажной среде. По результатам работы были определены размеры моделируемой системы, в частности, максимальный рекомендуемый межэлектродный зазор 0,1 мм и область влияния разнородности контактов на электрохимический процесс в пределах 5–6 мм. При электроалмазной обработке в зазоре между инструментом и деталью образуется металлическая стружка, которая способствует увеличению напряженности электрического поля выше критического значения, что приводит к пробое межэлектродного зазора и появлению электрической эрозии. Кроме того, стружка может создать металлический мостик, в результате чего появляется локальный электроконтактный процесс. Эти явления приводят к образованию жидкого металла. Проведенные исследования показали, что причиной засаливания является образование жидкого металла и его налипание на медную поверхность.*

**Ключевые слова:** электроалмазная обработка; качество поверхности; плотность тока; фазовый состав.

## Electrochemical features of the interaction of steels R6M5K5 and R18 with the copper bond of the grinding wheel

E.N. Timofeev<sup>а</sup>, I.Ya. Shestakov<sup>б</sup>, V.I. Shestakov<sup>с</sup>

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology; 31, Krasnoyarsky Rabochy Ave., Krasnoyarsk, Russia

<sup>а</sup> timofeev1800@gmail.com, <sup>б</sup> yakovlevish@mail.ru, <sup>с</sup> pn3vm4t@gmail.com

<sup>а</sup> <https://orcid.org/0009-0002-8482-704X>, <sup>б</sup> <https://orcid.org/0000-0002-7759-5159>, <sup>с</sup> <https://orcid.org/0009-0002-8564-0551>

Received 01.04.2024, accepted 23.04.2024

*Combined processing methods, including electro-diamond, are used for finishing operations. This method has the following disadvantages: salting of the tool electrode, rounding of the cutting edge, changes in hardness, micro-etching, deviations in the shape of the treated surface. In the previous studies of electro-diamond processing, the main attention was paid to the issues of salting of the diamond grinding wheel, the specific consumption of the circle and the surface condition. To identify the causes of defects (micro-etching of the surface of the part), an analysis of current sources in the electrochemical system has been carried out. The results of the research show that the current densities from galvanic elements formed between the cathode-tool and the workpiece and between the phases of the workpiece are an order of magnitude or more less than the density of the process current. Such currents during the processing time of no more than 3 minutes cannot lead to micro-etching. This defect can occur if the parts are stored in a humid environment for a long time. Based on the results of the work, the dimensions of the simulated system are determined, in particular, the maximum recommended interelectrode gap of 0.1 mm and the area of influence of contact heterogeneity on the electrochemical process in the range of 5-6 mm. During electro-diamond processing, metal chips are formed in the gap between the tool and the part, which contributes to an increase in the electric field strength above the critical value, which leads to a breakdown of the interelectrode gap and the appearance of electrical erosion. In addition, the chips can create a metal bridge, resulting in a local electrical contact process. These phenomena lead to the formation of liquid metal. The conducted studies have shown that the cause of salting is the formation of liquid metal and its adhesion to the copper surface.*

**Keywords:** electro-diamond treatment; surface quality; current density; phase composition.

**Введение.** Высокое качество поверхности изделия на финишных операциях является важной задачей современного машиностроения.

Анализ литературы показал, что для отделочных операций наиболее перспективными являются комбинированные методы обработки [1–4; 7–9].

Несмотря на большое число работ, посвященных исследованию этих методов обработки, единых рекомендаций по выбору видов и режимов комбинированных методов обработки материалов не указывается [1–9].

В исследованиях комбинированной электроалмазной обработки (КЭАО) основное внимание уделено вопросам засаливания алмазного шлифовального круга, удельному расходу круга и состоянию поверхности [1–4; 7].

В работах, посвященных исследованию КЭАО, указывается, что при правильном подборе механических и электрических режимов обработки возможно минимизировать величину дефектов на поверхности изделия [1–3].

Электроалмазная обработка является сложным процессом, который сопровождается электрохимическим, механическим и, как следствие, тепловым воздействием на заготовку и инструмент, однако на данный момент точно не установлена степень влияния каждого типа воздействия на формирование дефектов поверхностного слоя заготовки.

Установлено, что, в зависимости от режимов обработки, доля анодного растворения может составлять от 25 до 90 % [4].

Однако, несмотря на большое количество работ, в которых рассматривается влияние электрохимической составляющей на качество обрабатываемой поверхности, закономерности формирования дефектов не определены [5–7].

В связи с этим значительный интерес представляет исследование особенностей влияния электрохимического воздействия электроалмазной обработки на качество шлифования поверхности изделий.

Предмет исследования представляют пластины из быстрорежущей стали. Объектом исследования является электроалмазная обработка.

*Целью данной работы является* изучение особенностей электроалмазной обработки и их влияние на нее.

Сущность метода электроалмазной обработки заключается в анодном растворении поверхности заготовки и механическом съеме металла алмазным шлифовальным кругом на металлической связке [1–4].

Согласно исследованиям, проведенным в работах А.С. Янюшкина и А.И. Болдырева, к дефектам затачивания, которые возникают в результате электрохимического воздействия на поверхность заготовки, можно отнести скругление режущей кромки, изменение микротвердости, микроастравливания, отклонения формы поверхности [1; 7].

Основным параметром, влияющим на величину дефектного слоя, является плотность тока анодного растворения, которая определяется, в первую очередь, напряжением на инструменте и обрабатываемой

заготовке [1].

В рассматриваемой электрохимической системе имеются три источника напряжения. Первый — это источник технологического напряжения, подаваемый на катод — инструмент (алмазный шлифовальный круг на металлической связке) и на анод (обрабатываемая заготовка). Второй — электродвижущая сила (ЭДС) гальванического элемента, образующаяся между катодом и анодом при наличии между ними электролита. Третий — напряжение между фазами обрабатываемой заготовки.

Далее представлена оценка этих составляющих электроалмазной обработки быстрорежущей стали.

Из литературных данных [1–4; 7–9] следует, что напряжение, подаваемое в зону обработки, не превышает 10 В.

Для оценки ЭДС гальванического элемента были проведены опыты. Исследования проводились для сталей Р6М5К5 и Р18. Опыты проводились в стеклянной емкости объемом 0,5 л при комнатной температуре.

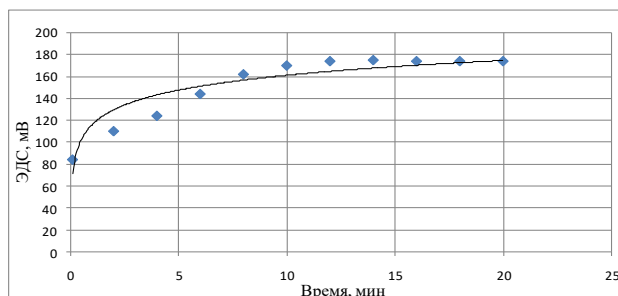
Напряжение измерялось мультиметром FLUKE179.

Медь подключалась к плюсовой клемме мультиметра.

В качестве электролита использовался водный раствор 5%NaNO<sub>3</sub> + 1%Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>.

Измерения проводились без активации и с механической активацией поверхности меди.

Графики зависимости ЭДС от времени нахождения электродов в среде электролита представлены на рис. 1–4.



**Рис. 1.** Зависимость ЭДС между сталью Р6М5К5 и механически активированной поверхностью меди от времени нахождения в электролите

По результатам исследования взаимодействия стали Р6М5К5 с механической активацией поверхности меди зависимость ЭДС от времени имеет следующий вид:

$$E = 19.53 \ln(t) + 116.3. \quad (1)$$

Величина достоверности аппроксимации R<sup>2</sup> составляет 0.878.

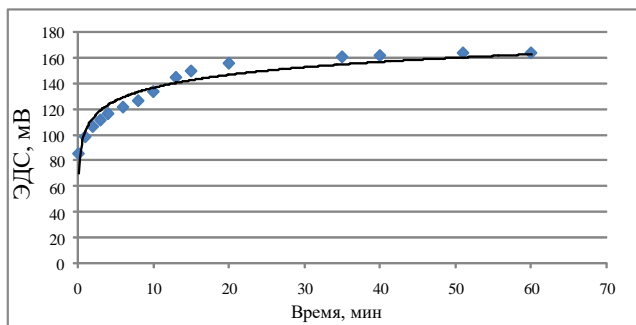


Рис. 2. Зависимость ЭДС между сталью Р6М5К5 и не активированной поверхностью меди от времени нахождения в электролите

По результатам исследования взаимодействия стали Р6М5К5 с механически не активированной поверхностью меди зависимость ЭДС от времени имеет следующий вид:

$$E = 14.57\ln(t) + 103. \quad (2)$$

Величина достоверности аппроксимации  $R^2$  составляет 0.920.

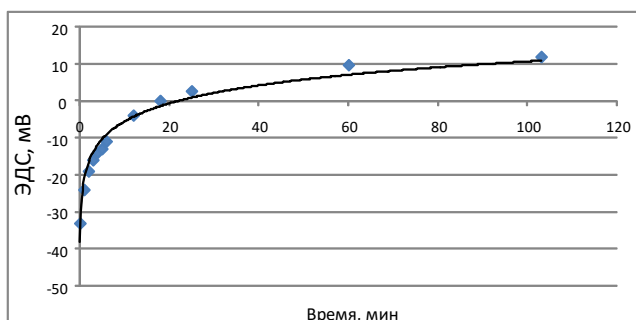


Рис. 3. Зависимость ЭДС между сталью Р18 и механически активированной поверхностью меди от времени нахождения в электролите

По результатам исследования взаимодействия стали Р18 с механической активацией поверхности меди зависимость ЭДС от времени имеет следующий вид:

$$E = 7.053\ln(t) - 21.89. \quad (3)$$

Величина достоверности аппроксимации  $R^2$  составляет 0.968.

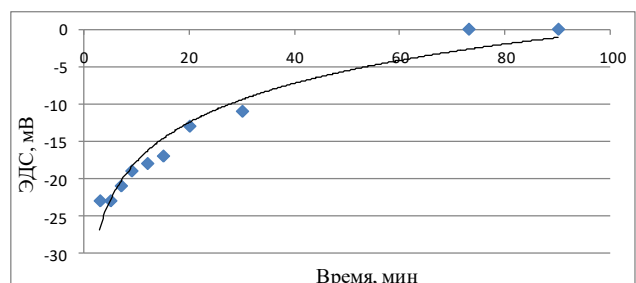


Рис. 4. Зависимость ЭДС между сталью Р18 и не активированной поверхностью меди от времени нахождения в электролите

По результатам исследования взаимодействия стали Р18 с механически не активированной поверхностью меди зависимость ЭДС от времени имеет следующий вид:

$$E = 7.555 * \ln(t) - 35.07. \quad (4)$$

Величина достоверности аппроксимации  $R^2$  составляет 0.081.

На графиках видно, что время установления равновесия электрохимических реакций для пары «медь – сталь» Р6М5К5 при активированной поверхности меди составляет 10 мин, при не активированной поверхности равняется 20 мин. При этом ЭДС гальванического элемента равно 0,16 В. Если учесть, что этот гальванический элемент начинает работать при замкнутой электрохимической системе, а замыкается эта система на выходную цепь источника постоянного тока, которая имеет сопротивление не менее 1 000 Ом, то ток от вышеупомянутого гальванического элемента составит миллиамперы. ЭДС пары «медь – сталь» Р18 на порядок меньше, поэтому ток будет составлять микроамперы.

Таким образом, токи, генерируемые гальваническими элементами, очень малы и не будут оказывать влияние на качество обрабатываемой поверхности.

Ввиду многокомпонентности фазового состава сталей Р18 и Р6М5К5 актуально исследование степени влияния плотности тока, возникающей в результате образования гальванических пар.

Для определения плотности тока на участках, вступающих в непосредственный контакт, используем метод, описанный в работе [12].

Так, сила тока между электродами определяется по формуле [11]:

$$I = \frac{\varphi_k^0 - \varphi_A^0}{\beta \frac{(l_1 + l_2)\rho}{2n\delta} + \frac{n}{l_2}K_1 + \frac{n}{l_1}K_2}, \quad (5)$$

где  $\varphi_k^0, \varphi_A^0$  — стандартный электродный потенциал катода и анода, В;  $\beta$  — коэффициент, определяемый удаленностью пары от места контакта (для первой пары электродов  $\beta = 1$ , для второго  $\beta = 3$  и т. д.);  $l_1$  — длина анода, см;  $l_2$  — длина катода, см;  $\rho$  — удельное сопротивление электролита, Ом·см;  $\delta$  — толщина слоя электролита, равная 0,02 см;  $K$  — поляризационная характеристика элемента, В·см<sup>2</sup>/А;  $n$  — число участков.

Необходимо учитывать, что в работе И.Л. Розенфельда рассматривается одномерная задача, требующая соблюдения толщины слоя электролита в пределах от 30 до 200 мкм, а также не учитывающая ширину электродов [11].

Однако расчет электрохимических характеристик контактной пары, состоящей из разных металлов, требует учета площади поверхностей катодных и анодных участков.

В работе И.Л. Розенфельда указывается, что максимальная плотность тока в элементах с электродами, лежащими в одной плоскости, достигается на участках, непосредственно прилегающих к месту контакта [11].

В то же время, электрохимическое воздействие, оказываемое на обрабатываемую поверхность, сопровождается процессом межкристаллитной коррозии, возникающей как в результате содержания избыточных

фаз по границам зерен, так и в результате наличия примесей [13].

Кроме того, И.Л. Розенфельд указывает, что влияние разнородности контактов на анодный процесс сказывается в пределах 5–6 мм от места контакта [11].

Поэтому рассматривается случай возникновения контактных пар между зернами обрабатываемого материала в пределах участка быстрорежущей стали в 5 мм.

Анализ литературы позволил определить, что α-фазы и карбидные фазы являются основными составляющими быстрорежущей стали, объемная доля которых составляет 70 и 30 % соответственно [14].

Поскольку α-фаза в стали Р6М5 представляет практически чистое железо, а основная карбидная фаза М<sub>6</sub>С состоит из атомов вольфрама, молибдена, железа, суммарный объем которых может достигать 2/3 общего объема материала, а также хрома и ванадия, которые замещают атомы железа, то для рассмотрения случая контактной коррозии, возникающей между однофазными зернами и между отдельными фазами внутри зерна, возможно использование в качестве свойств зерен и фаз свойств основного компонента рассматриваемой фазы или зерна [14].

В связи со сложностью учета геометрии зерен и их расположения друг относительно друга расчет проводится с использованием упрощенной модели, рассматривающей систему по линии средней площади сечения зерен и предполагающей усреднение размеров зерен на рассматриваемом участке.

Согласно исследованию по сравнительному анализу структуры порошковой быстрорежущей стали, средний размер зерен может достигать порядка 30 мкм, а диаметр большей части карбидных фаз — 1,5 мкм [15].

Согласно ГОСТ 5639-82, средняя площадь сечения зерна длиной 0,03 мм составляет 0,00195 мм<sup>2</sup> [16].

Стандартные электродные потенциалы W, Мо равняются –0,09 В и –0,2 В соответственно.

Согласно И.Л. Розенфельду, поляризационная характеристика элемента определяется как отношение потенциала электрода к плотности тока.

Поскольку α-фаза, занимающая 70 % от общего объема стали, состоит из практически чистого железа, поляризационная характеристика определяется из потенциодинамических кривых для АRМСО-железа в водном растворе NaNO<sub>3</sub> при концентрации соли до 10 %.

Поляризационная характеристика Fe равна 0,5 В·см<sup>2</sup>/А [17]. Поляризационная характеристика W, Мо составляет 0 В см<sup>2</sup>/А и 1 В см<sup>2</sup>/А соответственно [10; 18].

Использование поляризационной характеристики элемента позволит учитывать плотность тока контактной пары, отдельные элементы которой подвергнуты поляризации.

Схема, с помощью которой рассчитывается значение плотности тока в месте контакта зерен и ее влияние на соседние зерна, представлена на рис. 5.

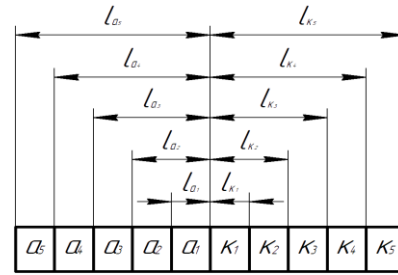


Рис. 5. Схема контакта зерен быстрорежущей стали

Учитывая вышесказанное, формула (5) примет вид:

$$I = \frac{\varphi_k^0 - \varphi_A^0}{\beta \frac{(l_{a_n} + l_{k_n})\rho}{2nS_{\Sigma n}} + \frac{n}{S_{a_n}}K_1 + \frac{n}{S_{k_n}}K_2}, \quad (6)$$

где  $l_{a_n}, l_{k_n}$  — длины  $n$ -х участков анода и катода, см;  $S_{a_n}, S_{k_n}$  — общая площадь  $n$ -х катода и анода, покрытых электролитом, равная сумме средних площадей сечений зерен, см<sup>2</sup>;  $S_{\Sigma n}$  — суммарная площадь  $n$ -х электродов, покрытых электролитом, см<sup>2</sup>.

Для определения плотности тока для каждого участка используем формулу:

$$i_{a_n} = \frac{I}{S_n}, \quad (7)$$

где  $I$  — сила тока, А;  $i_{a_n}$  — плотность тока анодного растворения  $n$ -го участка анода, м;  $S_n$  — площадь  $n$ -го участка анода, см.

Рассчитав величину силы и плотности тока, возникающих между однофазными зернами и фазами внутри карбидных фаз, получим следующие значения, представленные в табл. 1 и 2 соответственно.

Таблица 1. Результаты расчета силы тока

Номер участка	Сила тока I, А					
	Однофазные зерна			Карбидные фазы		
	Контактные пары					
	Fe-W	Fe-Mo	Mo-W	Fe-W	Fe-Mo	Mo-W
1	1·10 <sup>-5</sup>	3·10 <sup>-6</sup>	2·10 <sup>-6</sup>	1·10 <sup>-8</sup>	2,8·10 <sup>-9</sup>	1,9·10 <sup>-9</sup>
2	6,8·10 <sup>-6</sup>	1,5·10 <sup>-6</sup>	1·10 <sup>-6</sup>	6·10 <sup>-9</sup>	1,4·10 <sup>-9</sup>	9,7·10 <sup>-10</sup>
3	4,5·10 <sup>-6</sup>	1·10 <sup>-6</sup>	7·10 <sup>-7</sup>	4·10 <sup>-9</sup>	9,4·10 <sup>-10</sup>	6·10 <sup>-10</sup>
4	3,4·10 <sup>-6</sup>	7,8·10 <sup>-7</sup>	5·10 <sup>-7</sup>	3·10 <sup>-9</sup>	7·10 <sup>-10</sup>	4,8·10 <sup>-10</sup>
5	2,7·10 <sup>-6</sup>	6·10 <sup>-7</sup>	4·10 <sup>-7</sup>	2,4·10 <sup>-9</sup>	5,6·10 <sup>-10</sup>	3,8·10 <sup>-10</sup>

Таблица 2. Результаты расчета плотности тока

Номер участка	Плотность тока $i, А/см^2$		
	Контактные пары		
	Fe-W	Fe-Mo	Mo-W
1	0,7	0,16	0,11
2	0,35	0,08	0,055
3	0,23	0,05	0,03
4	0,17	0,04	0,02
5	0,14	0,032	0,02

Таким образом, было определено теоретическое значение плотности тока, возникающей между контактными парами, в качестве которых выступают

как зерна, так и карбидные фазы.

Полученные величины плотности тока показывают, что токи, возникающие между фазами и зёрнами обрабатываемой поверхности, не оказывают значительного влияния на электрохимический процесс, так как они на порядок меньше тока анодного растворения обрабатываемой детали.

Однако ввиду отсутствия точных числовых значений поляризационных характеристик элементов в работе была отражена только качественная характеристика поведения контактирующих элементов в условиях электроалмазной обработки быстрорежущей стали чашечным алмазным шлифовальным кругом.

Недостатком приведенного выше метода является необходимость проведения расчета для каждого химического элемента в каждой фазе, однако использование современного программного обеспечения позволяет ускорить этот процесс.

Для этого предлагается использование плоской модели, состоящей из отдельных фаз, для каждой из которых назначаются свойства химических элементов этих фаз, а также граничные условия между фазами.

Представленная методика позволяет значительно сократить время, необходимое на технологическую подготовку производства, выявить рациональные режимы электроалмазной обработки при известных условиях и может быть применена для оценки шероховатости высокопрочных и труднообрабатываемых материалов.

Дальнейшая работа по данной тематике будет направлена на создание предлагаемой модели.

Однако при создании модели необходимо учитывать не только процентное содержание химических элементов в фазах зёрен, но и расположение фаз в объеме материала, а также геометрию зёрен.

Поэтому необходимо проведение исследований в

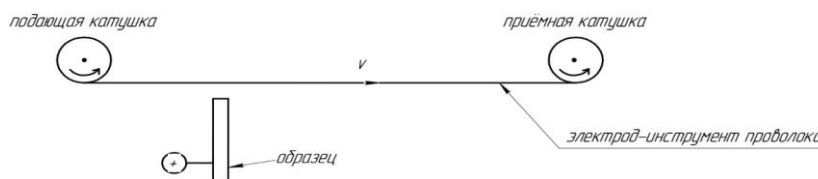


Рис. 7. Схема эксперимента

Для опытов была изготовлена установка, состоящая из двух катушек — подающей и приемной, привода вращения приемной катушки, источника постоянного тока. Средняя скорость движения проволочного инструмента составляла 5 см/с.

Подающая катушка подключалась к минусу источника тока, образец — к плюсу источника тока. В качестве образцов использовалась металлическая фольга, установленная перпендикулярно натянутому проволочному электроду.

Стальная проволока диаметром 0,5 мм, напряжение холостого хода 6 В, образец из фольги нержавеющей стали толщиной 0,1 мм. Происходит электроконтактная резка, при напряжении холостого хода 12 В фольга режется быстро, но нужен подбор скорости движения проволочного электрода, чтобы не происходили его перегрев и порыв.

этой области.

Ранее отмечалось, что электрохимикомеханические методы обработки сопровождаются засаливанием электрода-инструмента. Для устранения этого явления на электроде-инструменте организуют анодное растворение осажденного слоя обрабатываемого металла путем подключения дополнительного источника тока.

Как известно, КЭАО совмещает механическую (шлифование) и электрохимическую обработку (рис. 6).

В результате механической обработки в межэлектродном зазоре образуются мелкодисперсные частицы обрабатываемого металла, которые уменьшают этот зазор.

Уменьшение зазора приводит к локальному пробую зазора (электроэрозионный процесс), что вызывает прямой локальный контакт инструмента с обрабатываемой деталью. В результате этих процессов металл обрабатываемой детали расплавляется, и в случае краевого угла смачивания менее  $90^\circ$  происходит процесс засаливания.

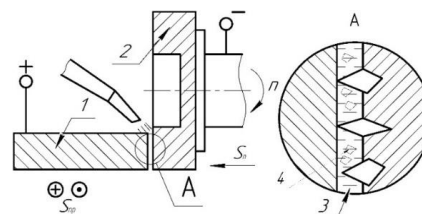


Рис. 6. Схема электроалмазной обработки: 1 — заготовка; 2 — связка круга; 3 — электролит в межэлектродном зазоре; 4 — стружка

Для подтверждения этого предположения был проведен эксперимент. Схема проведения эксперимента представлена на рис. 7.

Медная проволока диаметром 0,43 мм. На проволоке образуются выступы (бугорки), вытянутые вдоль проволочного инструмента. Эти выступы состоят из материала образца (нержавеющая сталь).

Латунная проволока диаметром 0,29 мм рвется сразу, независимо от скорости движения и усилия натяжения.

При использовании образца из алюминия медная проволока рвется, поскольку медь переносится на образец.

Эти опыты показывают, что причиной засаливания при электроалмазной обработке кругом на медной основе является электроконтактный перенос железа на медь.

Таким образом, замена медной связки круга позволит снизить интенсивность засаливания при электроалмазной обработке.

## Литература

1. Яношкин А.С. Контактное взаимодействие при комбинированном электроалмазном затачивании твердосплавных инструментов: автореф. дис. ... д-ра техн. наук. Иркутск, 2004. 44 с.
2. Сурьев А.А. Повышение качества поверхностного слоя деталей за счет совершенствования процесса комбинированного электроалмазного шлифования: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Братск, 2005. 20 с.
3. Попов В.Ю., Большаков И.М., Гуглин Г.С., Распутин Е.В. Исследование процесса засаливания алмазных шлифовальных кругов на металлической связке при обработке быстрорежущей стали Р6М5 // Механика XXI века. 2010. № 9. С. 101-104.
4. Попов В.Ю., Рычков Д.А., Архипов П.В., Кузнецов А.М., Лосев Е.Д., Селин Н.В. Исследование качества поверхности инструмента из быстрорежущей стали после комбинированной электроалмазной обработки // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). 2019. Т. 21, № 1. С. 6-15.
5. Яношкин А.С., Лобанов Д.В., Архипов П.В. Исследование влияния электрических режимов комбинированной электроалмазной обработки на качество шлифования твердых сплавов // Актуальные проблемы современного машиностроения: сб. тр. Междунар. науч.-практической конф. (11-12 дек. 2014 г.). Юрга, 2014. С. 323-327.
6. Медведева О.И., Яношкин А.С., Попов В.Ю. Влияние параметров электроалмазного шлифования твердых сплавов на величину растворенного слоя // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). 2014. № 3 (64). С. 68-75.
7. Болдырев А.И. Экспериментальные исследования состояния поверхностного слоя после электрохимикомеханической обработки // Вестн. Воронежского гос. технического ун-та. 2010. № 10. С. 15-20.
8. Лобанов Д.В., Яношкин А.С. Перспективы развития электрохимического шлифования деталей машин и инструмента // Проблемы механики современных машин: материалы V Междунар. конф. (25-30 июня 2012 г.). Улан-Удэ, 2012. С. 167-171.
9. Попов В.Ю., Хлыстов А.Н., Бондин А.В. Атомная визуализация алмазного резания // Компьютерные исследования и моделирование. 2016. Т. 8, № 1. С. 161-172.
10. Справочник по электрохимии / под ред. А.М. Сухотина. Л.: Химия, 1981. 448 с.
11. Розенфельд И.Л. Коррозия и защита металлов. М.: Metallurgiya, 1969. С. 93-104.
12. Павлюк С.К., Лупачёв А.В. Исследование гальванических токов пар электродов, покрытых тонким слоем электролита, и их влияние на коррозионные процессы // Вестн. Белорусско - Российского ун-та. 2009. № 1. С. 63-71.
13. Каспарова О.В. Межкристаллитная коррозия нержавеющей сталей // Технология легких сплавов. 2011. № 3. С. 85-91.
14. Хараев Ю.П., Гурьев А.М., Попова Н.А., Сизоненко Н.Р., Козлов Э.В. Сопоставление фазового состава сталей Р18 и Р6М5 в отожженном состоянии // Ползуновский вестн. 2005. № 2. С. 184-188.
15. Цеменко В.Н., Гиршов В.Л., Мазуров С.А. Сравнительный анализ структуры порошковой быстрорежущей стали // Металлообработка. 2011. № 5. С. 38-40.
16. ГОСТ 5639-82. Стали и сплавы. Методы выявления и определения величины зерна. Введ. 01.01.1983. М.: ИПК Изд-во стандартов, 2003. С. 5.
17. Гаар Н.П., Локтионов А.А., Давыдова С.А., Иванова Ю.С. Анодное поведение ARMCO-железа и титанового сплава OT-4 в условиях электрохимической обработки // Вестн. Кузбасского гос. технического ун-та. 2018. № 2. С. 93-100.
18. Рахимьянов Х.М., Красильников Б.А., Янпольский В.В., Никитенко М.И., Моисеенко А.Н. Электрохимическое растворение покрытий из порошковых материалов // Обработка

металлов (технология, оборудование, инструменты). 2011. № 2. С. 3-5.

## References

1. Yanyushkin A.S. Contact interaction during combined electric diamond sharpening of carbide tools: avtoref. dis. ... d-ra tekhn. nauk. Irkutsk, 2004. 44 p.
2. Sur'ev A.A. Improving the quality of the surface layer of parts by improving the process of combined electric diamond grinding: avtoref. dis. ... kand. tekhn. nauk. Bratsk, 2005. 20 p.
3. Popov V.Yu., Bol'shakov I.M., Guglin G.S., Rasputin E.V. Study of the process of clogging of metal-bonded diamond grinding wheels when processing high-speed steel R6M5 // Mekhanika XXI veku. 2010. № 9. P. 101-104.
4. Popov V.Yu., Rychkov D.A., Arhipov P.V., Kuznecov A.M., Losev E.D., Selin N.V. Study of the surface quality of high-speed steel tools after combined electric diamond processing // Obrabotka Metallov (Metal Working and Material Science). 2019. V. 21, № 1. P. 6-15.
5. Yanyushkin A.S., Lobanov D.V., Arhipov P.V. Study of the influence of electrical modes of combined electric diamond processing on the quality of grinding of hard alloys // Aktual'nye problemy sovremen-nogo mashinostroeniya: sb. tr. Mezhdunar. nauch.-prakticheskoy konf. (11-12 dek. 2014 g.). Yurga, 2014. P. 323-327.
6. Medvedeva O.I., Yanyushkin A.S., Popov V.Yu. Influence of parameters of electric diamond grinding of hard alloys on the size of the dissolved layer // Obrabotka Metallov (Metal Working and Material Science). 2014. № 3 (64). P. 68-75.
7. Boldyrev A.I. Experimental studies of the state of the surface layer after electrochemical-mechanical treatment // The Bulletin of Voronezh State Technical University. 2010. № 10. P. 15-20.
8. Lobanov D.V., Yanyushkin A.S. Prospects for the development of electrochemical grinding of machine parts and tools // Problemy mekhaniki sovremennyh mashin: materialy V Mezhdunar. konf. (25-30 iyunya 2012 g.). Ulan-Ude, 2012. P. 167-171.
9. Popov V.Yu., Hlystov A.N., Bondin A.V. Atomic visualization of diamond cutting // Computer Research and Modeling. 2016. V. 8, № 1. P. 161-172.
10. Handbook of electrochemistry / pod red. A.M. Suhotina. L.: Himiya, 1981. 448 p.
11. Rozenfel'd I.L. Corrosion and protection of metals. M.: Metallurgiya, 1969. P. 93-104.
12. Pavlyuk S.K., Lupachyov A.V. Study of galvanic currents of pairs of electrodes coated with a thin layer of electrolyte, and their influence on corrosion processes // Belarussian-Russian University. 2009. № 1. P. 63-71.
13. Kasparova O.V. Intergranular corrosion of stainless steels // Technology of light alloys. 2011. № 3. P. 85-91.
14. Haraev Yu.P., Gur'ev A.M., Popova N.A., Sizonenko N.R., Kozlov E.V. Comparison of the phase composition of steel r18 and r6m5 in annealed condition // Polzunovskiy vestnik. 2005. № 2. P. 184-188.
15. Cemenko V.N., Girshov V.L., Mazurov S.A. Comparative analysis of the structure of powder high-speed steel // Metalloobrabotka. 2011. № 5. P. 38-40.
16. GOST 5639-82. Steels and alloys. Methods for identifying and determining grain size. Vved. 01.01.1983. M.: IPK Izd-vo standartov, 2003. P. 5.
17. Gaar N.P., Loktionov A.A., Davydova S.A., Ivanova Yu.S. Anodic behavior of ARMCO-iron and titanium alloy OT-4 under conditions of electrochemical processing // Vestnik of Kuzbass State Technical University. 2018. № 2. P. 93-100.
18. Rahimyanov H.M., Krasil'nikov B.A., Yanpol'skij V.V., Nikitenko M.I., Moiseenko A.N. Electrochemical dissolution of coatings from powder materials // Obrabotka Metallov (Metal Working and Material Science). 2011. № 2. P. 3-5.