

## Исследование адгезии при электроконтактной обработке

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

Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнева  
просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31, Красноярск, Россия

<sup>а</sup> timofeew1800@gmail.com, <sup>б</sup> yakovlevish@mail.ru

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

Статья поступила 02.12.2024, принята 03.02.2025

*Для обработки высокопрочных металлов и сплавов применяются электрофизические и электрохимические методы, в том числе электроконтактный. К основным дефектам электроконтактной обработки, связанным с нагревом заготовки, относятся: адгезия, трещины, образование окалины, внутренние напряжения. Однако процесс адгезии изучен в меньшей степени. Результатом адгезионного воздействия на заготовку и инструмент является снижение точности обработки и повышение износа инструмента, что связано как с отделением налипших на инструмент частиц расплавленного металла с частью поверхности инструмента и образованием кратеров, так и с изменением топологии поверхности инструмента. Подбор сочетания материалов электрод-инструмента и заготовки с минимальной силой адгезии позволит устранить возникновение этих дефектов. В большинстве существующих методик характеристики адгезии рассчитываются через поверхностное натяжение и краевой угол смачивания, определяемые путем проведения натуральных экспериментов. Однако ввиду большой разности в температуре плавления металлов определение этих параметров возможно только для небольшого количества контактных пар. Для выявления сочетания металлов с наименьшими силами адгезии достаточным будет сравнение числовых значений работы адгезии контактных пар, рассчитанных с учетом допущений при сравнении их с литературными данными. По результатам работы определены минимальные значения адгезионной прочности для контактных пар металлов Fe – Fe, Fe – Al. Было установлено, что для этих контактных пар адгезионная прочность больше когезионной прочности самих металлов. Это дало представление о том, как происходит процесс отрывания налипших на поверхность диска частиц заготовки. Было оценено качество поверхности инструмента при электроконтактной резке. Получены значения удельной поверхностной энергии и изменения свободной поверхностной энергии контактных пар, что дало представление о том, как изменяется их поверхностная энергия.*

**Ключевые слова:** адгезия; электроконтактная обработка; электроды; работа адгезии; поверхностная энергия.

## Study of adhesion during electrical contact processing

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

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology; 31, Krasnoyarsky Rabochoy Pros., Krasnoyarsk, Russia

<sup>а</sup> timofeew1800@gmail.com, <sup>б</sup> yakovlevish@mail.ru

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

Received 02.12.2024, accepted 03.02.2025

*To process high-strength metals and alloys, electrophysical, electrochemical and electrical contact methods are used. The main defects in electrical contact machining are associated with heating the workpiece include adhesion, cracks, scale formation, and internal stresses. However, the adhesion process has been studied to a lesser extent. The result of the adhesive effect on the workpiece and the tool is a decrease in processing accuracy and an increase in tool wear, which is associated both with the separation of molten metal particles adhering to the tool from part of the tool surface and the formation of craters, and with a change in the topology of the tool surface. Selecting a combination of electrode-tool and workpiece materials with minimal adhesion force eliminates the occurrence of these defects. In most existing methods, adhesion characteristics are calculated through surface tension and contact angle, determined by conducting natural experiments. However, due to the large difference in the melting temperature of metals, determination of these parameters is possible only for a small number of contact pairs. To determine the combination of metals with the lowest adhesion forces, it is sufficient to compare the numerical values of the work of adhesion of contact pairs, calculated taking into account assumptions and their comparison with theoretical data. Based on the results of the work, the minimum values of adhesive strength for contact pairs of metals Fe – Fe, Fe – Al are determined. It is established that for these contact pairs the adhesive strength is greater than the cohesive strength of the metals themselves. This gave an idea of how the process of tearing off workpiece particles adhering to the surface of the disk occurs. The quality of the tool surface during electric contact cutting is assessed. The values of the specific surface energy and changes in the free surface energy of contact pairs are obtained, which give an idea of how their surface energy changes.*

**Keywords:** adhesion; electrical contact processing; electrodes; adhesion work; surface energy.

**Введение.** При производстве деталей машин и механизмов важнейшим параметром является качество деталей. Для производства деталей, подверженных высоким нагрузкам, применяются труднообрабатываемые материалы, при обработке которых материалов используются методы электрофизической и электрохимической обработки.

В данной работе рассматривается электроконтактная обработка как наиболее перспективный метод, сочетающий в себе высокую скорость съема металла и меньший, по сравнению с другими методами, удельный расход энергии.

Электрофизические и электрохимические методы предполагают тонкую настройку режимов резания для каждого определенного случая обработки материалов. В противном случае на поверхности заготовки могут возникать такие дефекты как наводороживание, прижоги, кратеры, термические и водородные трещины, обезуглероживание.

Электроконтактная обработка заключается в нагреве обрабатываемой поверхности с помощью импульсных дуговых разрядов и последующем удалении слоя размягченного материала вращающимся дисковым электродом, при этом дефекты, вызываемые механическим и электрическим воздействием на заготовку и инструмент, оказывают минимальное влияние.

Поэтому в данной работе рассматриваются только те явления, которые вызваны тепловыми процессами.

К основным дефектам электроконтактной обработки, связанным с нагревом заготовки, относятся: адгезия, трещины, образование окалины, внутренние напряжения [1, 2].

Все эти факторы влияют как на снижение качества детали, так и на повышение износа инструмента. В тоже время среди них процесс адгезии изучен в меньшей степени. Поэтому в данной работе рассматривается именно этот процесс.

При электроконтактной обработке адгезия происходит в результате: взаимодействия расплавленного металла заготовки с боковой поверхностью инструмента и при контакте между инструментом и заготовкой, возникающем непосредственно при механическом удалении металла заготовки.

Результатом адгезионного воздействия на заготовку и инструмент является снижение точности обработки и повышение износа инструмента, что связано как с удалением налипших на инструмент частиц расплавленного металла с части поверхности инструмента и образованием кратеров, так и с изменением ее топологии.

В тоже время, применительно к электроконтактной обработке, одним из наиболее весомых последствий адгезии является износ торцевой поверхности инструмента.

Теоретически адгезия оценивается через ее работу – работу, затраченную на формирование адгезионной связи, что приводит к изменению поверхностной энергии.

Использование этого параметра позволяет напрямую определять потенциальную адгезионную активность контактирующих тел.

Однако на практике эти процессы исследуют через характеристики, определяемые путем проведения натуральных экспериментов [3–6].

Для металлов это связано с большой разницей в их температуре плавления.

Основной характеристикой, которую на практике используют для исследования процессов адгезии, является краевой угол смачивания. Однако из-за большой разницы в температуре плавления металлов его определение возможно только для небольшого количества контактных пар.

По этой причине на практике адгезия определяется через адгезионную прочность [4–6], которая представляет собой работу, затраченную на разрушение адгезионной связи.

Поэтому адгезия в данной работе будет оцениваться как через работу адгезии, так и через адгезионную прочность.

Цель работы – подобрать сочетание материалов электрод-инструмента и заготовки с минимальной силой адгезии.

**Методика проведения исследования.** Исследование проводится для следующего ряда контактных пар: Fe – Fe, Mo – Fe, Al – Fe, Fe – Cu, Cu – Al, Cu – Mo. В табл. 1 представлены характеристики исследуемых материалов.

**Таблица 1.** Характеристики химических элементов

| Химический элемент | Радиус атома, м | Плотность, кг/м <sup>3</sup> | Работа выхода электронов, эВ |
|--------------------|-----------------|------------------------------|------------------------------|
| Mo                 | 1,36e-10        | 10210                        | 4,2                          |
| Fe                 | 1,26e-10        | 7850                         | 4,4                          |
| Cu                 | 1,28e-10        | 8930                         | 4,36                         |
| Al                 | 1,43e-10        | 2712                         | 4,2                          |

**Теоретическое определение энергии и работы адгезии.** Причиной адгезии может являться молекулярное притяжение контактирующих пар или их химическое взаимодействие.

Согласно работе Я.Е. Гегузина, Н.Н. Овчаренко о поверхностной энергии и процессах на поверхности твердых тел [7], контакт металлов приводит к изменению их профиля, что влечет за собой изменение поверхностной энергии новой формируемой поверхности в сравнении с исходными объектами.

Авторы этой же работы утверждают, что поверхностная энергия на границе тел с собственными парами значительно выше, чем в объеме материала этих тел [7]. Это говорит о необходимости учета как поверхностной энергии до контакта металлов, так и после него.

Определим работу адгезии по общеизвестному уравнению Дюпре:

$$A_a = \gamma_1 + \gamma_2 - \gamma_{12}, \quad (1)$$

где  $\gamma_1$  – удельная поверхностная энергия первого тела, Дж/м<sup>2</sup>;  $\gamma_2$  – удельная поверхностная энергия второго тела, Дж/м<sup>2</sup>;  $\gamma_{12}$  – удельная поверхностная энергия, сформированная при контакте первого и второго тела, Дж/м<sup>2</sup>.

Удельную поверхностную энергию каждого металла в твердом состоянии определим по формуле [8]:

$$\gamma = \frac{\varphi_x * Z}{1885 * 10^{-3} * R^2}, \quad (2)$$

где  $\varphi_x$  – работа выхода электронов, эВ;  $Z$  – число свободных электронов на один атом;  $R$  – радиус атома, м.

В данной формуле главной является зависимость удельной поверхностной энергии и работы выхода электрона, поэтому примем число свободных электронов, приходящихся на один атом, для всех металлов равным 0,1.

Полученные значения удельной поверхностной энергии и справочные данные этого же параметра представлены в табл. 2.

**Таблица 2.** Удельная поверхностная энергия металлов

| Химический элемент | $\gamma$ , Дж/м <sup>2</sup> , расчетное | $\gamma$ , Дж/м <sup>2</sup> , справочное | $\gamma_{жг}$ , Дж/м <sup>2</sup> , справочное |
|--------------------|--|---|--|
| Fe                 | 2,3                                      | 2,8 [9]                                   | 2,170 [10]                                     |
| Mo                 | 1,9                                      | 2,01 [9]                                  | -  |
| Cu                 | 2,26                                     | 2,02 [9]                                  | 1,760 [10]                                     |
| Al                 | 1,73                                     | 1,09 [9]                                  | 0,096[11]                                      |

Примечание. Прочерк – справочные данные не найдены.

Изменение свободной поверхностной энергии, возникающей при контакте двух пар металлов, определим через приближение Рэлея по формуле [12]:

$$\Delta\gamma = (\sqrt{\gamma_{тг}} - \sqrt{\gamma_{жг}}), \quad (3)$$

где  $\gamma_{тг}$  – удельная поверхностная энергия твердой фазы, Дж/м<sup>2</sup>,  $\gamma_{жг}$  – удельная поверхностная энергия жидкой фазы, Дж/м<sup>2</sup>.

Полученные расчетные значения изменения свободной поверхностной энергии представлены в таблице 3.

**Таблица 3.** Изменение свободной поверхностной энергии контактных пар

| Контактная пара | $\Delta\gamma$ , Дж/м <sup>2</sup> | Жидкая фаза |
|-----------------|------------------------------------|-------------|
| Fe – Mo         | 0,01                               | Fe          |
| Fe – Fe         | 0                                  | Fe          |
| Fe – Cu         | 0,2                                | Cu          |
| Fe – Al         | 1,22                               | Al          |
| Al – Cu         | 1,01                               | Al          |
| Cu – Mo         | 0,16                               | Cu          |

Энергия адгезии является разностью между удельной поверхностной энергией более мягкого металла до контакта с твердым телом и после контакта с ним. Поэтому она равна общей поверхностной энергии.

Общую поверхностную энергию контактных пар металлов можно определить по формуле [7]:

$$\gamma_s = \frac{\partial_s * q}{4T_\infty} * H + \sigma_L, \quad (4)$$

где  $T_\infty$  – температура фазового равновесия, °С;  $q$  – теплота плавления жидкой фазы, °С;  $\partial_s$  – плотность

твердой фазы, кг/м<sup>3</sup>;  $\sigma_L$  – поверхностного натяжения жидкой фазы, мДж/м<sup>2</sup>;  $H$  – ширина контактной поверхности, мм.

По результатам практических экспериментов было установлено, что средний размер налипшей частицы расплавленного металла составляет 0,1 мм<sup>2</sup>. Поэтому примем  $H$  равной 0,356 мм.

Поскольку металл с более низкой температурой плавления будет использоваться в качестве заготовки, то в расчетах применяется его теплота плавления.

Параметры, необходимые для расчета изменения поверхностного натяжения, представлены в табл. 4.

**Таблица 4.** Температура фазового равновесия, температура плавления, поверхностное натяжение жидкой фазы при температуре плавления

| Контактная пара | $T_\infty$ , °С | $q$ , °С  | $\sigma_L$ , мДж/м <sup>2</sup> |
|-----------------|-----------------|-----------|---------------------------------|
| Fe – Mo         | 1200 [13]       | 1535 [15] | 1788 [15]                       |
| Fe – Fe         | 768 [13]        | 1535 [15] | 1788 [15]                       |
| Fe – Cu         | 850 [13]        | 1083 [15] | 1351 [15]                       |
| Fe – Al         | 552 [13]        | 660 [15]  | 914 [15]                        |
| Al – Cu         | 565 [14]        | 660 [15]  | 914 [15]                        |
| Cu – Mo         | 950 [14]        | 1083 [15] | 1351 [15]                       |

Результаты расчетов общей удельной поверхностной энергии и работы адгезии для всех пар металлов, а также известные данные справочной и научной литературы представлены в табл. 5.

**Таблица 5.** Удельная поверхностная энергия и работа адгезии контактных пар.

| Контактная пара | $\gamma_s$ , Дж/м <sup>2</sup> | $A_a$ , Дж/м <sup>2</sup> , расчетная | $A_a$ , Дж/м <sup>2</sup> , справочная |
|-----------------|--------------------------------|---------------------------------------|--|
| Fe – Mo         | 1,79                           | 2,73                                  | -                                      |
| Fe – Fe         | 1,79                           | 2,85                                  | -                                      |
| Fe – Cu         | 1,06                           | 2,98                                  | 3,46 [16]                              |
| Fe – Al         | 0,93                           | 2,53                                  | -                                      |
| Al – Cu         | 0,93                           | 1,93                                  | 2,78 [16]                              |
| Cu – Mo         | 1,06                           | 2,86                                  | -                                      |

Примечание. Прочерк – справочные данные не найдены.

Для проверки значений работы адгезии определим дисперсионную работу адгезии для контактных пар.

Согласно А.Д. Зимону [17], дисперсионная работа адгезии определяется по формуле:

$$W = 2 * \sqrt{\sigma_{жг}^d * \sigma_{тг}^d}, \quad (5)$$

где  $\sigma_{жг}^d$  – дисперсионная составляющая поверхностного натяжения жидкой фазы, Н/м;  $\sigma_{тг}^d$  – дисперсионная составляющая поверхностного натяжения твердой фазы, Н/м.

На рис. 1 представлена схема дисперсионного взаимодействия на границе раздела фаз [17].

Для определения дисперсионной работы адгезии используем полное поверхностное натяжение.

Согласно М.П. Дохову [18], значение поверхностного натяжения твердой фазы молибдена составляет 2,939 Дж/м<sup>2</sup>.

В работе В.М. Юрова [19] указывается, что значение поверхностного натяжения твердой фазы железа, меди и алюминия составляет 0,612 Дж/м<sup>2</sup>, 0,531 Дж/м<sup>2</sup> и 0,279 Дж/м<sup>2</sup> соответственно.

На схеме  $\sigma_1^d$ ,  $\sigma_2^d$  – дисперсионная составляющая поверхностного натяжения твердой и жидкой фазы, соответственно  $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$  – полное поверхностное натяжение твердой и жидкой фазы, соответственно.

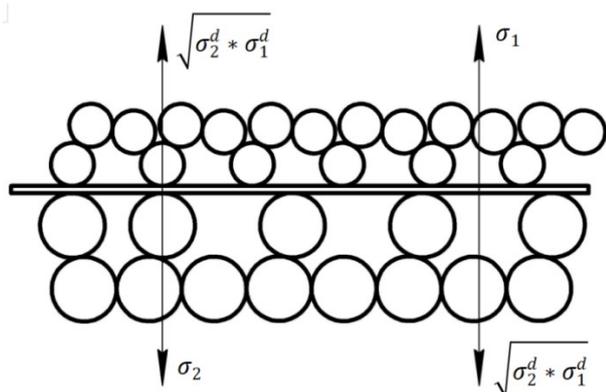


Рис. 1. Схема дисперсионного взаимодействия на границе раздела фаз [17]

Полученные результаты расчетов представлены в табл. 6.

Таблица 6. Дисперсионная работа адгезии

| Контактная пара | W, Дж/м <sup>2</sup> |
|-----------------|----------------------|
| Fe – Mo         | 4,58                 |
| Fe – Fe         | 2,09                 |
| Fe – Cu         | 1,61                 |
| Fe – Al         | 1,51                 |
| Al – Cu         | 1,4                  |
| Cu – Mo         | 3,53                 |

Определим работу когезии  $W_k$  для металлов контактных пар.

Общеизвестно, что работа когезии равна удвоенному значению поверхностного натяжения тела на границе с газом. Полученные значения представлены в табл. 7.

Таблица 7. Работа когезии

| Контактная пара | $W_k$ , Дж/м <sup>2</sup> |
|-----------------|---------------------------|
| Fe – Fe         | 1,226                     |
| Mo – Mo         | 5,878                     |
| Cu – Cu         | 1,062                     |
| Al – Al         | 0,558                     |

Поверхностную энергию контактных пар металлов можно определить по формуле [7]:

$$\gamma_s = \sigma_s + S * \frac{d\sigma_s}{dS}, \quad (6)$$

где  $d\sigma_s$  – изменение поверхностного натяжения, Дж/м<sup>2</sup>;  $dS$  – изменение площади поверхности, мм<sup>2</sup>;  $\sigma_s$  – поверхностное натяжение более мягкого тела контактной пары, Дж/м<sup>2</sup>.

Из уравнения (6) видно, что уменьшение поверхностной энергии приводит к уменьшению поверхностного натяжения.

Поэтому увеличение свободной поверхностной энергии металла приводит к увеличению работы когезии.

В тоже время из уравнения (1) следует, что увеличение удельной поверхностной энергии твердой и жидкой фаз и уменьшение их общей поверхностной энергии приводит к увеличению работы адгезии.

Согласно А.Д. Зимону [17], работа адгезии определяется как произведение работы когезии и относительной работы адгезии жидкости. Поэтому при увеличении работы когезии увеличивается работа адгезии.

Таким образом, разница в полученных значениях работы адгезии контактных пар полностью согласуется с изменением работы адгезии отдельных тел, общей поверхностной энергией контактных пар, поверхностным натяжением твердой фазы этих тел и работой когезии.

Для подтверждения теоретических расчетов было проведено два эксперимента.

Первый из них направлен на определение минимальной планки величины адгезионной прочности для следующего ряда контактных пар: Fe – Fe, Fe – Al.

Эксперимент проводился путем отрезания части заготовки дисковым электрод-инструментом, изготовленным из низкоуглеродистой стали, диаметрами 300 и 150 мм, толщиной 1 мм.

Инструмент подключался к отрицательному полюсу источника тока, а заготовка – к положительному.

Резка проводилась в воздушной среде без применения дополнительных жидких или газообразных сред.

Использовалась ручная машина электроконтактной резки с диаметром 150 мм которая представлена на рис. 2.



Рис. 2. Ручная машина электроконтактной резки

В качестве заготовок использовался круглый прокат диаметром 100 мм и толщиной стенки 5 мм из стали Ст.3 и труба диаметром 26,8 мм и толщиной стенки 2,35 мм из сплава АД31.

Резка проводилась при скорости вращения диска 100 м/с.

Обработка проката проводилась при напряжении 14 В, что соответствует режиму дугообразования, труба отрезалась при напряжении менее 10 В.

Адгезионная прочность определяется путем отрыва налипших на инструмент частиц заготовки при вращении инструмента.

Схема разрезания заготовки дисковым электрод-инструментом представлена на рис. 3.

Силу отрыва определим через силы инерции по формуле:

$$F_{ц} = m * r * \sqrt{\left(\frac{\omega}{dt}\right)^2 + \omega^4}, \quad (7)$$

где  $m$  – масса налипшей частицы, кг;  $t$  – время обработки, принимаемое от 10 до 100 с,  $r$  – радиус, на котором расположена частица относительно центра диска, мм.

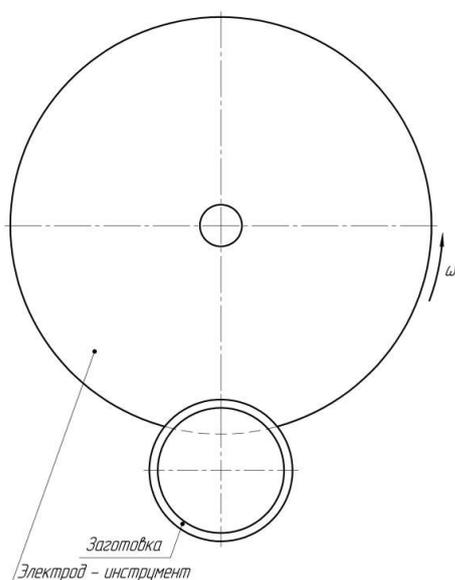


Рис. 3. Схема разрезания заготовки дисковым электрод-инструментом

Если адгезионная прочность меньше силы отрыва, то произойдет отрыв налипших на инструмент частиц заготовки, в противном случае частицы останутся на поверхности инструмента.

При обработке происходит не только формирование молекулярных связей, но и деформация контактирующих поверхностей.

В тоже время очевидно, что чем прочнее будет адгезионное соединение при отрыве налипших частиц, тем больше будут подвергаться деформации компоненты системы.

Отсюда следует, что при растяжении ранее деформированной поверхности повышается вероятность разрыва материалов по деформированной части более мягкого металла, а не по адгезионной связи.

Признаком разрыва связи по деформированной поверхности является наличие кратеров.

Поверхность инструмента после обработки стального проката представлена на рис. 2.

Поверхность инструмента после обработки трубы представлена на рис. 4. Изменение цвета боковой поверхности диска связано с наличием дуги в зоне обработки.

Наличие на боковой поверхности дискового инструмента налипшего металла заготовки свидетельствует о том, что значение адгезионной прочности превышает значение центробежной силы.

В случае обработки проката в области прямого контакта заготовки и инструмента наблюдается налипание значительного числа частиц, что объясняется работой в условиях дугообразования и продолжительным контактом поверхности инструмента с заготовкой.



Рис. 4. Взаимодействие размягченного металла с ЭИ

После разрезания трубы в области ее прямого контакта с инструментом наблюдается большое число кратеров на его торцевой поверхности.

В табл. 8 представлены полученные значения центробежной силы.

Таблица 8. Центробежная сила

| Время обработки, с | Радиус, мм | Центробежная сила, Н |
|--------------------|------------|----------------------|
| 10                 | 45         | 1,31E-03             |
| 40                 |            | 1,31E-03             |
| 70                 |            | 1,31E-03             |
| 100                |            | 1,74E-03             |
| 10                 | 60         | 1,74E-03             |
| 40                 |            | 1,74E-03             |
| 70                 |            | 1,74E-03             |
| 100                |            | 1,74E-03             |

Согласно полученным результатам, для удаления налипшей частицы расплавленного металла с поверхности инструмента необходимо приложить к ней силу больше 1,31 Н. В тоже время это говорит о том, что суммарные силы, возникающие между налипшими частицами заготовки и инструмента, превышают 1,31 Н.

Полученные результаты показывают, что для этих контактных пар большое значение адгезионной прочности вызывает образование кратеров на поверхности инструмента.

Это связано в первую очередь с тем, что когезионная прочность в объеме инструмента ниже адгезионной прочности, возникающей между налипшей частицей заготовки и поверхностью инструмента.

Подбор сочетания материалов инструмента и заготовки позволит снизить количество кратеров на поверхности инструмента, а значит и его износ.

За счет данных, полученных в теоретической части, можно подобрать наиболее подходящее сочетание материалов.

Для подтверждения теоретических расчетов был проведен второй эксперимент, схема которого представлена на рис. 5 [20].

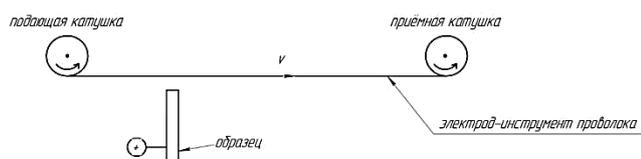


Рис. 5. Схема эксперимента [20]

Для опытов была изготовлена установка, состоящая из двух катушек – подающей и приемной, привода вращения приемной катушки, источника постоянного тока.

Подающая катушка подключалась к минусу источника тока, образец – к плюсу. В качестве образцов использовалась металлическая фольга, установленная перпендикулярно натянутому проволочному электроду. В качестве инструмента применяется медная проволока диаметром 0,43 мм. Заготовка – нержавеющая сталь, алюминий, толщина 0,1 мм. Напряжение холостого хода 12 В. Средняя скорость движения проволочного инструмента составляла 5 см/с.

**Результаты и обсуждение.** По результатам эксперимента было установлено, что при электроконтактной резке фольги из нержавеющей стали медной проволокой образуются выступы, вытянутые вдоль проволочного инструмента. Они налипают на поверхность проволоки и состоят из частиц нержавеющей стали.

При резке фольги из алюминия медная проволока рвется, так как медь переносится на образец.

Поскольку происходит процесс переноса и последующего налипания частиц заготовки на инструмент, можно утверждать о том, что происходит процесс адгезии.

В тоже время результаты эксперимента указывают на то, что в обоих случаях происходит перенос металла с большей температурой плавления.

Это позволяет утверждать, что температура плавления не оказывает большого влияния на то, в каком направлении будет проходить перенос частиц.

В тоже время, несмотря на очевидность расплавления в контактной паре металла с меньшей температурой плавления, можно наблюдать процесс, при котором происходит налипания частиц инструмента на заготовку.

Однако несмотря на то, что на данном этапе исследований сложно сказать о том, в каком направлении будет идти адгезия при рабочих режимах электроконтактной обработки, можно точно определить разницу в работе адгезии разных контактных пар металлов.

Результаты исследования показывают, что для меди металлом с наименьшей адгезией является алюминий, для железа – также алюминий.

Наибольшая адгезия проявляется между железом и медью.

Между железом и молибденом, также медью и молибденом адгезия почти равна адгезии между железом и железом.

Таким образом, электроконтактная обработка медной заготовки инструментом, основным компонентом которого является железо или молибден, приведет к налипанию большого числа частиц расплавленной меди на поверхность инструмента.

Результаты исследования позволяют сделать предположение о том, что для снижения адгезии при электроконтактной обработке меди и железа необходимо использовать инструмент, основным компонентом которого является алюминий. Данный материал обладает низкой прочностью, поэтому использование в качестве инструмента для обработки меди и железа приведет к его деформации.

Другим способом уменьшения налипания частиц заготовки на инструмент может служить нанесение такого покрытия на инструмент, для которого адгезия с заготовкой имеет значения меньшие, чем с основным материалом инструмента.

Таким образом, нанесение на поверхность медного или железного диска алюминиевого покрытия позволит обрабатывать сплавы на основе меди и железа с минимальными силами адгезии.

**Выводы и заключение.** По результатам работы определены минимальные значения адгезионной прочности для контактных пар металлов Fe - Fe, Fe - Al.

Было установлено, что для этих контактных пар адгезионная прочность больше когезионной прочности самих металлов, что дало представление о том, как происходит процесс отрывания налипших на поверхность диска частиц заготовки.

Было оценено качество поверхности инструмента при электроконтактной резке.

Получены значения удельной поверхностной энергии и изменения свободной поверхностной энергии контактных пар, что дало представление о том, как изменяется их поверхностная энергия.

Проведены эксперименты позволившие оценить направление процесса адгезии.

Это дало понимание того, что для более точной оценки необходима разработка методик расчета позволяющих прогнозировать адгезию с учетом большого числа факторов.

Дальнейшие работы будут направлены на анализ большого числа контактных пар и моделирование процесса адгезии.

Это позволит создать модель, ускоряющую процесс подбора такого сочетания контактных пар материалов инструмента и заготовки, для которых адгезия будет иметь минимальные значения.

Полученные значения удельной поверхностной энергии металлов согласуются с литературными данными, что позволяет говорить о достоверности полученных результатов

## Литература

## References

1. Андреев И.Г., Шакиров А.Р. Дефекты, возникающие при термической обработке стали // Современные материалы, техника и технологии. 2023. № 2. С. 22-24.
2. Коломейченко А.В., Кравченко И.Н., Логачев В.Н., Измалков А.А., Карцев С.В. Анализ факторов, влияющих на адгезионную прочность электрометаллизационных покрытий // Агроинженерия. 2019. № 4. С. 35-41.
3. Постников Д.В., Блесман А.И., Теплоухов А.А., Полонянкин Д.А., Ткаченко Э.А., Тюкин А.В. Адгезия защитных покрытий из молибдена на стальную подложке // Динамика систем, механизмов и машин. 2016. № 2. С. 279-282.
4. Тулинов А.Б., Шубенков А.В. Влияние модифицирования поверхности на адгезионную прочность соединений металлов с композиционными материалами // Сервис в России и за рубежом. 2014. № 1. С. 138-144.
5. Веснин Р.А. Исследование адгезионной прочности границы раздела металл-композит // Аллея науки. 2018. № 5. С. 90-97.
6. Пантелеенко Ф.И., Карпец М.Н., Белоцерковский М.А., Сосновский А.В. Определение адгезионной и когезионной прочности металлических покрытий, нанесенных гиперзвуковой металлизацией // Наука и техника. 2021. № 6. С. 459-464.
7. Гегузин Я.Е., Овчаренко Н.Н. Поверхностная энергия и процессы на поверхности твердых тел // Успехи физических наук. 1962. № 2. С. 283-327.
8. Ставровский М.Е., Албагачиев А.Ю., Сидоров М.И. Моделирование адгезии при контактном взаимодействии металлов // Современные материалы, техника и технологии. 2016. № 4. С. 168-173.
9. Егоров С.Н. Расчет поверхностной энергии металлов в твердом состоянии // Изв. высших учеб. заведений. Северо-Кавказский регион. Технические науки. 2003. № 3. С. 132-134.
10. Дохов М.П., Кокоева М.Н., Шериева Э.Х. Смачивание железа и меди жидкими оловом, свинцом и расчет их межфазных энергий // Конденсированные среды и межфазные границы. 2019. № 3. С. 385-389.
11. Стеценко В.Ю. Кластеры в жидких металлах – стабильные нанокристаллы // Литье и металлургия. 2015. № 2. С. 33-35.
12. Дохов М.П. О связи межфазной энергии на границе раздела твердое тело-расплав с поверхностной энергией отдельных фаз // Успехи современного естествознания. 2007. № 10. С. 85-87.
13. Диаграммы состояния двойных и многокомпонентных систем на основе железа: справ. изд. / Под ред. О.А. Банных, М.Е. Дрица. М.: Металлургия. 1986. 440 с.
14. Двойные и многокомпонентные системы на основе меди: справ. изд. / Под ред. А.Н. Чернова. М.: Металлургия. 1979. 248 с.
15. Свойства элементов: справ. изд. / Под ред. М.Е. Дрица. М.: Металлургия. 1985. 672 с.
16. Фроленкова Л.Ю., Шоркин В.С. Метод вычисления поверхностной энергии и энергии адгезии упругих тел // Вестн. Перм. национал. исслед. политехнич. ун-та. Механика. 2013. № 1. С. 235-259.
17. Зимон А.Д. Адгезия жидкости и смачивание. М.: Химия, 1974. 416 с.
18. Дохов М.П. Смачивание вольфрама и молибдена жидкой сурьмой и расчет их межфазных энергий // Изв. Кабардино-Балкар. гос. аграр. ун-та. 2019. № 2. С. 83-85.
19. Юров В.М. Физический смысл коэффициента Русанова // Междунар. журнал прикладных и фундаментальных исследований. 2010. № 8. С. 150-151.
20. Тимофеев Е.Н., Шестаков И.Я., Шестаков В.И. Электрохимические особенности взаимодействия сталей P6M5K5 и P18 с медной связкой шлифовального круга // Системы. Методы. Технологии. 2024. № 2. С. 28-33.
1. Andreev I.G., Shakirov A.R. Defects arising during heat treatment of steel // Modern materials, engineering and technology. 2023. № 2. P. 22-24.
2. Kolomeychenko A.V., Kravchenko I.N., Logachev V.N., Izmailkov A.A., Kartsev S.V. Analysis of factors affecting the adhesion strength of electrometallization coatings // Agroengineering. 2019. № 4. P. 35-41.
3. Postnikov D.V., Blesman A.I., Teploukhov A.A., Polonyankin D.A., Tkachenko E.A., Tyukin A.V. Adhesion of molybdenum protective coatings on steel substrate // Dynamics of systems, mechanisms and machines. 2016. № 2. P. 279-282.
4. Tulinov A.B., Shubenkov A.V. Influence of the surface modification on the adhesive strength of the metal compounds with composite materials // Service in Russia and abroad. 2014. №1. P. 138-144.
5. Vesnin R.A. Investigation of adhesion strength of the metal-composite interface // Science Alley. 2018. № 5. P. 90-97.
6. Panteleenko F.I., Karpets M.N., Belotserkovsky M.A., Sosnovskiy A.V. Determination of the adhesion and cohesive strength of the metal coatings applied by hypersonic metallization // Science and Technology. 2021. № 6. P. 459-464.
7. Geguzin Ya.E., Ovcharenko N.N. Surface energy and processes on the surface of solid bodies // Advances in the physical sciences. 1962. № 2. P. 283-327.
8. Stavrovskiy M.E., Albagachiev A.Yu., Sidorov M.I. Modeling of adhesion in the contact interaction of metals // Modern Materials, Engineering and Technology. 2016. № 4. P. 168-173.
9. Egorov S.N. Calculation of the surface energy of metals in the solid state // Tidings vysshee obrazovaniya vysshee obrazovaniya. North-Caucasian region. Technical Sciences. 2003. № 3. P. 132-134.
10. Dokhov M.P., Kokoeva M.N., Sherieva E.H. Wetting of iron and copper with liquid tin, lead and calculation of their interfacial energies // Condensed Media and Interfacial Boundaries. 2019. № 3. P. 385-389.
11. Stetsenko V.Yu. Clusters in liquid metals – stable nanocrystals // Casting and Metallurgy. 2015. № 2. P. 33-35.
12. Dokhov M.P. About the connection of the interphase energy at the interface solid-melt with the surface energy of the separate phases // Advances in modern natural science. 2007. № 10. P. 85-87.
13. State diagrams of double and multicomponent iron-based systems: reference edition / Ed. by O.A. Bannykh, M.E. Drits. M.: Metallurgy. 1986. 440 p.
14. Double and multicomponent systems based on copper: reference edition / Ed. by A.N. Chernov. M.: Metallurgy. 1979. 248 p.
15. Properties of elements: reference edition / Ed. by M.E. Drits. M.: Metallurgy. 1985. 672 p.
16. Frolenkova L.Yu., Shorkin V.S. Method of calculation of surface energy and adhesion energy of elastic bodies // Bulletin of Perm National Research Polytechnic University. Mechanics. 2013. № 1. P. 235-259.
17. Zimon A.D. Liquid adhesion and wetting. Moscow: Chemistry, 1974. 416 p.
18. Dokhov M.P. Wetting of tungsten and molybdenum by liquid antimony and calculation of their interfacial energies // Izvestiya Kabardino-Balkar. gos. agrarian university. 2019. № 2. P. 83- 85.
19. Yurov V.M. Physical sense of the Rusanov coefficient (in Russian) // Intern. journ. of applied and fundamental research. 2010. № 8. P. 150-151.
20. Timofeev E.N., Shestakov I.Ya., Shestakov V.I. Electrochemical peculiarities of the interaction between the steels P6M5K5 and P18 with a copper bond of a grinding wheel (in Russian) // Systems. Methods. Technologies. 2024. № 2. P. 28-33.