УДК 539.612 DOI: 10.18324/2077-5415-2026-3-33-41

Коэффициент эрозии электроконтактной резки металлов быстровращающимся диском

Е.Н. Тимофеев[2a], И.Я. Шестаков[2b], И.А. Ремизов[1c], В.И. Шестаков[2d]

[1] Красноярский государственный медицинский университет имени профессора В.Ф. Войно-Ясенецкого, ул. Партизана Железняка, 1, г. Красноярск, 660022, Россия
[2] Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнёва, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31, г. Красноярск, 660037, Российская Федерация
[a] timofeew1800@gmail.com, [b] yakovlevish@mail.ru, [c] 2remizov@mail.ru, [d] pn3vm4t@mail.com.
[a] https://orcid.org/0009-0002-8482-704X, [b] https://orcid.org/0000-0002-7759-5159,
[c] https://orcid.org/0000-0002-6980-0167, [d] https://orcid.org/009-0002-8564-055.
Статья поступила 22.05.2026, принята 18.08.2026.

Среди существующих электрофизических методов резки больше всего выделяется электроконтактный, сочетающий в себе высокую скорость съёма металла и меньший, по сравнению с другими методами, удельный расход энергии. Анализ литературных источников указывает на недостаточность экспериментальных данных и неполноту существующих закономерностей, необходимых для прогнозирования и оптимизации процесса ЭКР на этапе технологической подготовки производства. С целью повышения точности определения закономерностей процесса ЭКР в данной работе при расчёте величин основных критериев учитываются теплофизические показатели материалов инструментов и заготовок. По результатам работы был проведён расчёт коэффициента эрозии, удельных энергозатрат, производительности на основе экспериментальных и литературных данных для разных сочетаний материалов инструмента и заготовки. На основе анализа и сравнения полученных данных было установлено, что с точки зрения оценки удельных энергозатрат и производительности при ЭКР можно выделить следующие наиболее подходящие сочетания: заготовка сталь Ст3 – инструмент медь (Cu), заготовка сталь 12Х18Н10Т – инструмент сплав АМГ6М, заготовка сплав АМГ6М – инструмент сплав АМГ6М. Установлена необходимость учёта дополнительных факторов, к которым могут относиться износ инструмента, его геометрия, адгезия между поверхностями инструмента и заготовки.

Ключевые слова: электроконтактная резка; коэффициент эрозии; производительность; удельные энергозатраты.

Erosion coefficient of electrical contact cutting of metals with a high-speed rotating disk

E.N. Timofeev[2a], I.Ya. Shestakov[2b], I.A. Remizov[1c], V.I. Shestakov[2d]

[1] Krasnoyarsk State Medical University named after Professor V.F. Voyno-Yasenetsky; 1, Partizan Zheleznyak St., Krasnoyarsk, Russia
[2] Reshetnev Siberian State University of Science and Technology; 31, Krasnoyarsky Rabochy Ave., Krasnoyarsk, Russia
[a] timofeew1800@gmail.com, [b] yakovlevish@mail.ru, [c] 2remizov@mail.ru, [d] pn3vm4t@mail.com.
[a] https://orcid.org/0009-0002-8482-704X, [b] https://orcid.org/0000-0002-7759-5159,
[c] https://orcid.org/0000-0002-6980-0167, [d] https://orcid.org/009-0002-8564-055.
Received 22.05.2026, accepted 18.08.2026.

Among the existing electrophysical cutting methods, the most notable is electrical contact cutting, which combines a high metal removal rate with lower specific energy consumption compared to other methods. An analysis of literature sources indicates insufficient experimental data and the incompleteness of existing relationships needed to predict and optimize the ECC process at the stage of technological production preparation. In order to improve the accuracy of determining the relationships of the ECC process, this work takes into account the thermophysical parameters of the tool and workpiece materials when calculating the values of the main criteria. Based on the results of the work, the erosion coefficient, specific energy consumption, and productivity are calculated on the basis of experimental and literature data for different combinations of tool and workpiece materials. Based on the analysis and comparison of the obtained data, it is established that, from the standpoint of assessing specific energy consumption and productivity in ECC, the following most suitable combinations can be identified: workpiece St3 steel – copper (Cu) tool, workpiece 12Kh18N10T steel – AMG6M alloy tool, workpiece AMG6M alloy – AMG6M alloy tool. The need has been established to take into account additional factors, which may include tool wear, its geometry, and adhesion between the surfaces of the tool and the workpiece.

Keywords: electrical contact cutting; erosion coefficient; productivity; specific energy consumption.

Введение. Постоянное развитие промышленности приводит к необходимости производства новых сплавов и сталей, постоянно повышающаяся сложность обработки которых вызывает необходимость использования новых приёмов и видов режущего инструмента.

Одними из перспективных методов резки металлических заготовок являются электрофизические, к которым относятся электроконтактный, воздушнодуговой, электроконтактно-абразивный и другие способы.

При выборе метода обработки заготовки необходимо руководствоваться критериями его эффективности.

Основными критериями оценки эффективности метода резки являются производительность и удельные энергозатраты. Эти показатели позволяют сравнить различные виды резки и определить целесообразность использования их для решения конкретных технических задач.

С целью наиболее достоверного определения значений описываемых критериев на этапе технологической подготовки производства необходимо повышать точность зависимостей, выявляемых в результате исследований.

В области резки заготовок указанными выше методами проводятся следующие исследования: анализ процессов переноса тепла, изучение влияния геометрических параметров электрода-инструмента на ход процесса ЭКР, исследование влияния параметров резки на качество поверхности, разработка рекомендаций по выбору схемы питания и напряжения резки [1–4].

Среди рассматриваемых методов резки больше всего выделяется электроконтактный (далее – ЭКР), как наиболее перспективный метод, сочетающий в себе высокую скорость съёма металла и меньший, по сравнению с другими методами, удельный расход энергии.

Анализ литературных источников указывает на недостаточность экспериментальных данных и неполноту существующих закономерностей, необходимых для прогнозирования и оптимизации процесса ЭКР на этапе технологической подготовки производства [5–7].

В работе по оценке производительности и удельных энергозатрат электроконтактной резки металлов быстровращающимся диском было установлено, что при ЭКР заготовок из разного материала на одних и тех же режимах и одним инструментом достигаются разные значения производительности и удельных энергозатрат [8].

Это свидетельствует о необходимости учёта теплофизических свойств исследуемых образцов.

Кроме того, согласно исследованию В.П. Александрова, выбор материала электрода-инструмента определяет уровень эрозии электродов [9].

Связь между характеристиками материала инструмента с заготовкой и производительностью с удельными энергозатратами может быть реализована через коэффициент эрозии.

Подобные исследования проводились в работах, посвящённых изучению коэффициента эрозии при ЭКР металлов с использованием вибрирующего электрода-инструмента в среде электролита и вращающегося электрода-инструмента в воздушной среде для разных материалов заготовок при неизменном материале инструмента [10, 11].

Однако в данной работе исследование проводится для ЭКР в воздушной среде без применения дополнительных жидких или газообразных сред для разных сочетаний материала вращающегося электрода-инструмента и заготовки.

Целью настоящего исследования является определение закономерностей и факторов, влияющих на удельные энергозатраты, производительность, эрозию заготовки при варьировании материалов электродов.

Методика исследований. В работе проводятся расчёты коэффициента эрозии, удельных энергозатрат, производительности на основе экспериментальных и литературных данных для разных сочетаний материалов инструмента и заготовки.

На основе анализа и сравнения полученных данных делаются выводы о процессах работы ЭКР заготовок при использовании разных инструментов.

Определение производительности по известным зависимостям. Поскольку ЭКР проходит в режиме оплавления, то механическая составляющая эрозии будет оказывать незначительное влияние. Поэтому в данной работе производится расчёт теоретического значения коэффициента электрической эрозии.

В работе по определению коэффициента эрозии электроконтактной обработки металлов указывается, что теоретическое значение коэффициента эрозии в зависимости от теплофизических свойств обрабатываемого металла и падения напряжения на контакте можно выразить по формуле [10]:

$$К_т = \frac{U_п}{C_v \cdot T}, \quad (1)$$

где $К_т$ – теоретический коэффициент эрозии обрабатываемого металла, мм^3/А·с; $U_п$ – напряжение плавления, В; C_v – удельная объёмная теплоёмкость обрабатываемого металла, Дж/м^3·К; Т – температура плавления обрабатываемого металла, К.

В расчётах теоретического значения коэффициента эрозии используем справочные данные, приведённые в табл. 1.

Поскольку в процессе ЭКР температура в зоне резания изменяется, принимаем средние значения удельной теплоёмкости (С), теплопроводности (λ), электросопротивления (r) и плотности (ρ) для температурного диапазона от 0 до 1200 °С.

Все значения удельной теплоёмкости переводятся в удельную объёмную теплоёмкость путём умножения первой на плотность материала.

Ввиду отсутствия литературных данных температуру плавления стали Ст3 примем как для железа (Fe) – 1530 °С.

Для сплава алюминия АМГ6М примем значение плотности, температуры плавления и удельного электросопротивления (r) как для чистого алюминия (Al) [13, 14].

Объёмная производительность снятого материала при ЭКР рассчитывается по формуле [10]:

$$V_{ме} = k_{эр} \cdot I_{ср}, \quad (2)$$

где $k_{эр}$ – теоретический коэффициент эрозии обрабатываемого металла, мм^3/А·с; $V_{ме}$ – объём снятого металла, мм^3; $I_{ср}$ – среднее значение силы тока, А.

Таблица 1. Свойства материалов заготовок и инструментов

Материал заготовки	Ст3	12Х18Н10Т	АМГ6М	Cu
T, K	1803 [12]	1698 [15]	931 [13]	1356 [12]
$U_п$, В	0,6 [14]	0,55 [14]	0,3 [14]	0,43 [14]
C_v, Дж/кг·К	683 [16]	595 [16]	998,9 [13]	464,3 [18]
ρ, кг/м^3	7800 [19]	7900 [19]	2650 [18]	8509 [18]
r, нОм·м	1130 [20]	1076 [20]	61 [18]	98,8 [12]
λ, Вт/м·град	29,8 [16]	29,7 [16]	118 [21]	337 [18]

Расчётные значения коэффициента эрозии и объёмной производительности, полученные по теоретическим данным, представлены в табл. 2.

Для расчётов $I_{ср}$ примем равным 40 А.

Таблица 2. Коэффициент эрозии и массовая производительность ЭКР заготовок

Материал заготовки	$k_{эр}$, мм^3/А·с	$V_{ме}$, мм^3/с
Ст3	0,062	2,48
12Х18Н10Т	0,068	2,75
АМГ6М	0,12	4,8

Согласно данным табл. 2, самое большое значение производительности ЭКР и коэффициента эрозии заготовки из сплава АМГ6М, следующее по величине значение достигается для стали Ст3 и самое низкое значение – для стали 12Х18Н10Т.

Для подтверждения теоретических расчётов проводится ряд экспериментов и последующие практические расчёты.

Методика проведения эксперимента. Для проведения экспериментов использовалась ручная отрезная машина, сконструированная на базе ручной шлифовальной машины модели ИП-2020.

Для подачи давления использовался коаксиальный безмасляный компрессор ELITECH, модель АСА 300-24S.

Давление холостого хода 6 бар.

КПД машины равен 0,7 [14].

Ручная машина ЭКР представлена в работе по исследованию адгезии при ЭКР [17].

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

Использовалась ручная подача.

Источником постоянного тока служил инверторный сварочный аппарат PRORAB FORWARD 161, IGBT, 6,4 кВт, 220 В.

Напряжение холостого 70 В.

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

В качестве заготовок использовались следующие материалы:

1. Труба из углеродистой стали Ст3 – диаметром 16 мм, толщиной стенки 0,75 мм.

2. Нержавеющей стали 12Х18Н10Т – диаметром 10 мм, толщиной стенки 1 мм.

3. Пластина из сплава алюминия АМГ6М – шириной 55 мм, толщиной 1,8 мм.

В качестве инструментов использовались следующие материалы:

1. Диск из углеродистой стали Ст3 – диаметром 165,425 мм, толщиной 0,975 мм. Диск покрыт оксидной плёнкой.

2. Диск из нержавеющей стали 12Х18Н10Т – диаметром 167,475 мм, толщиной 0,55 мм.

3. Диск медный – диаметром 168,05 мм, толщиной 0,9 мм.

4. Диск из сплава алюминия АМГ6М – диаметром 164,7 мм, толщиной 1,35 мм.

Измерения проводились в четырёх плоскостях, поэтому представлены средние значения диаметров дисков до ЭКР первого образца.

Скорость вращения диска составляла 15 000 об/мин [17], что соответствовало окружной скорости 130 м/с.

Для измерения геометрических характеристик инструментов и заготовок использовался штангенциркуль ШЦК-1 — 150—0,02.

Для измерения напряжения использовался вольтметр, силы тока – мультиметр MY 67, подключённый через шунт на 100 А, которые соответствуют 75 мВ.

На каждой заготовке выполнялось минимум 4 реза всеми инструментами. Замеры напряжения, силы тока и времени резки проводились для каждого реза.

Результаты и обсуждения. Зависимости изменения силы тока и напряжения от времени резки всеми типами используемых в данной работе инструментами заготовки из нержавеющей стали 12Х18Н10Т, углеродистой стали Ст3, пластины из сплава алюминия АМГ6М представлена, соответственно на рис. 1, 2, 3, 4, 5, 6.

Для полученных графиков величина достоверности аппроксимации не опускается ниже значения 0,95 единиц.

Увеличение электросопротивления исследуемых материалов заготовок и инструментов может быть вызвано наличием примесей и легирующих добавок в их составе, а также увеличением температуры в зоне резания [12, 18, 22].

Общее сопротивление в цепи может зависеть от наличия и величины зазора между заготовкой и инструментом, свойств материалов элементов внешней цепи, заготовки, инструмента и сопротивления источника питания.

В процессе ЭКР расплавленные частицы материала заготовки и инструмента могут смешиваться с ними и между собой. Это может приводить к изменению электросопротивления на локальных участках поверхностей инструмента и заготовки.

Таким образом, разность химического состава инструмента и заготовки может приводить к образованию локальных участков на поверхностности заготовки и инструмента с изменённой электропроводностью.

Изменение электропроводности всех участков цепи влияет на силу тока, напряжение и температуру в зоне резания.

Рост силы тока на графиках рис. 1–3 указывает на снижение общего сопротивления цепи, что может быть вызвано увеличением площади контакта поверхности заготовок и инструментов в процессе ЭКР.

Для количественной оценки результатов опытов данные силы тока и напряжения приведены к средним значениям и представлены в табл. 3.

При расчёте средних арифметических параметров начальные и конечные значения силы тока и напряжения исключены ввиду нестабильности дугового процесса.

Таблица 3. Средние значения силы тока и напряжения при резке заготовок инструментами

Материал инструмента	Материал заготовки					
	Ст3		12Х18Н10Т		АМГ6М	
	$I_{ср}$, А	$U_{ср}$, В	$I_{ср}$, А	$U_{ср}$, В	$I_{ср}$, А	$U_{ср}$, В
12Х18Н10Т	35,7	31,6	24,2	45,6	32	40,5
Ст3	35,8	28,8	22,6	48,3	26	41,7
АМГ6М	36,5	27,8	21,1	48,3	35,6	29,3
Cu	26,5	38,7	22,3	45	46,3	38,3

Согласно графику на рис. 1, были получены следующие данные о ЭКР заготовки из стали 12Х18Н10Т:

1. Использование инструмента из стали 12Х18Н10Т влечёт за собой линейный рост силы тока. При этом достигается самая высокая скорость данного роста.

2. При применении инструментов из стали Ст3, сплава АМГ6М и меди (Cu) наблюдается плавный рост силы тока со временем по квадратичной зависимости.

3. Использование инструмента из меди (Cu) позволяет достичь наиболее плавного роста силы тока.

Полученные результаты могут быть вызваны следующими причинами.

1. Наличие оксидной плёнки на поверхностях инструментов из сплава АМГ6М и стали Ст3 осложняет процесс формирования стабильной дуги.

2. Инструмент из стали 12Х18Н10Т обладает наиболее близкими к заготовке теплофизическими характеристиками.

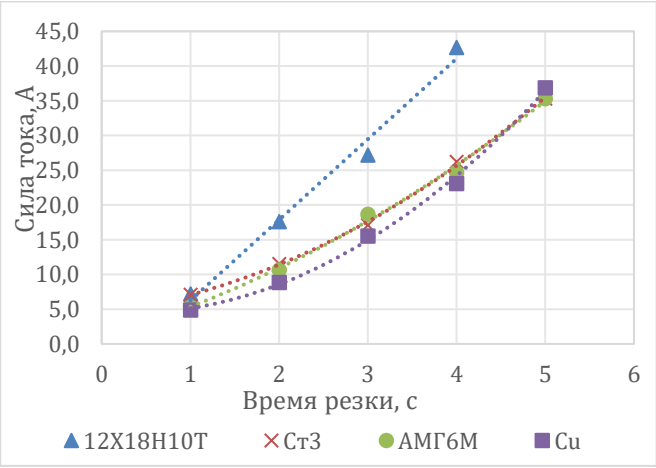

Рис. 1. Зависимость изменения силы тока от времени резки заготовки из нержавеющей стали 12Х18Н10Т для всех типов используемых инструментов

Увеличение силы тока и изменение характера кривой на графике рис. 2 по сравнению со значениями на графиках рис. 1 и 3 можно объяснить ростом площади контакта за счёт боковых поверхностей диска.

Согласно графику на рис. 2 и табл. 3, были получены следующие данные о ЭКР заготовки из сплава АМГ6М:

1. При ЭКР заготовки инструментами из стали 12Х18Н10Т и сплава АМГ6М сила тока растёт линейно.

2. При ЭКР заготовки инструментами из стали Ст3 и меди (Cu) сила тока растёт по квадратичной зависимости.

3. При использовании инструмента из меди (Cu) на протяжении всего процесса поддерживаются наиболее высокие значения силы тока.

4. Значения напряжения принимают достаточно близкие величины для инструментов из меди (Cu), стали 12Х18Н10Т и стали Ст3.

Полученные результаты могут быть вызваны следующими причинами:

1. Наличие оксидной плёнки на поверхности инструмента из стали Ст3 (Fe_2O_3) затрудняет процесс ЭКР.

2. Инструмент из меди (Cu) обеспечивает значительно больший отвод тепла из зоны резания, что приводит к снижению электросопротивления.

3. Близость теплофизических характеристик материалов заготовки и инструмента из сплава АМГ6М приводит к более равномерному распределению тепла в зоне ЭКР.

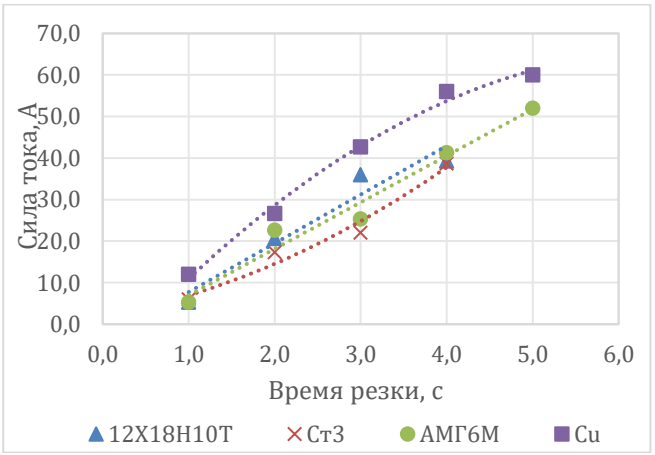

Рис. 2. Зависимость изменения силы тока от времени резки заготовки из пластины из сплава алюминия АМГ6М для всех типов используемых инструментов

Согласно графику на рис. 3 и табл. 3, были получены следующие данные о ЭКР заготовки из стали Ст3:

1. ЭКР заготовки всеми инструментами сопровождается линейным ростам силы тока.

2. Значения силы тока принимают достаточно близкие величины для инструментов из сплава АМГ6М, стали 12Х18Н10Т и стали Ст3, для меди (Cu) – значительно меньше.

3. Значение напряжения для инструмента из стали 12Х18Н10Т превышает величины для стали Ст3 и

сплава АМГ6М в пределах 4 В, однако для меди (Cu) разница достигает 11 В.

Полученные результаты могут быть вызваны следующими причинами:

1. Использование инструмента из стали 12Х18Н10Т сопровождается тратой части напряжения на повышенное электросопротивление инструмента.

2. Близость теплофизических характеристик материалов заготовки и инструмента из стали Ст3 приводит к более равномерному распределению тепла в зоне ЭКР.

Стоит отметить, что на результаты всех рассматриваемых случаев оказывает влияние постепенный рост температуры в зоне резания, что приводит к изменению теплофизических характеристики материалов заготовок и инструментов.

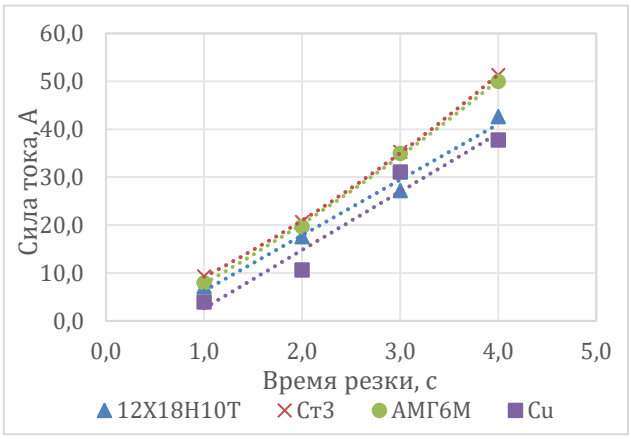

Рис. 3. Зависимость изменения силы тока от времени резки заготовки из углеродистой стали Ст3 для всех типов используемых инструментов

Данные графиков рис. 4–6 позволяет на основании закона Ома для полной цепи говорить о том, что снижение напряжения при ЭКР связано с ростом силы тока и снижением общего сопротивления цепи.

В то же время характер падения зависит от локального нагрева зоны контакта, коэффициента термического расширения, теплопроводности и удельного электросопротивления заготовки и инструмента.

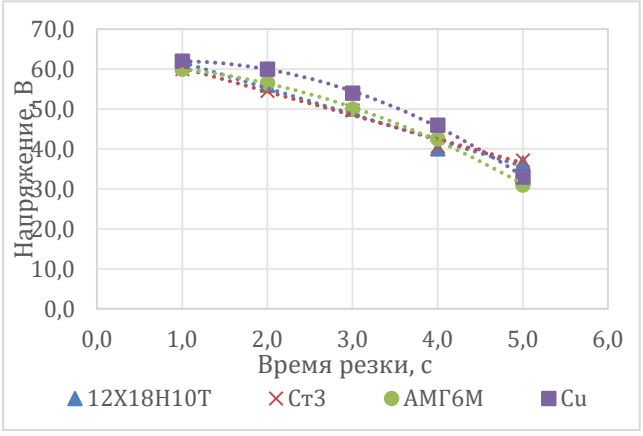

Рис. 4. Зависимость изменения напряжения от времени резки заготовки из нержавеющей стали 12Х18Н10Т для всех типов используемых инструментов

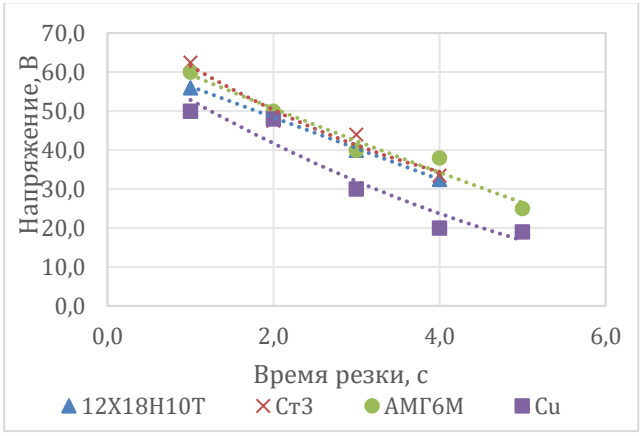

Рис. 5. Зависимость изменения напряжения от времени резки заготовки из сплава АМГ6М для всех типов используемых инструментов

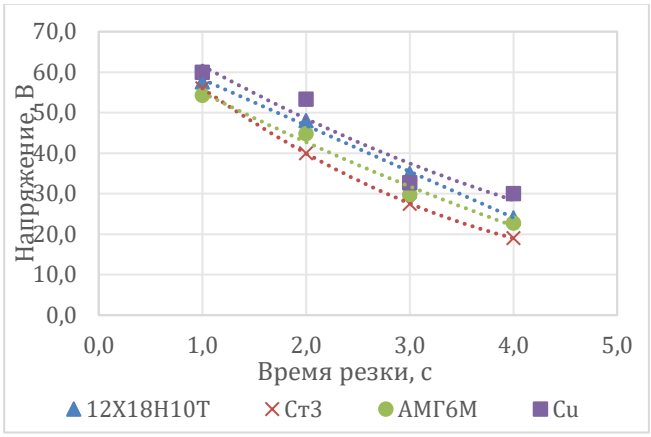

Рис. 6. Зависимость изменения напряжения от времени резки заготовки из углеродистой стали Ст3 для всех типов используемых инструментов

Полученные результаты указывают на влияние разности химического состава, электропроводности и теплопроводности материалов заготовок и инструментов, наличия пассивирующих поверхностей.

Графики рисунков 1–6 дают представление о характере протекания ЭКР при разном сочетании инструментов и заготовок.

Однако для комплексного анализа процесса далее в исследовании проводится оценка удельных энергозатрат и производительности.

По полученным данным силы тока и напряжения составим гистограммы электрической мощности в зоне резки, представленные на рис. 7, 8, 9.

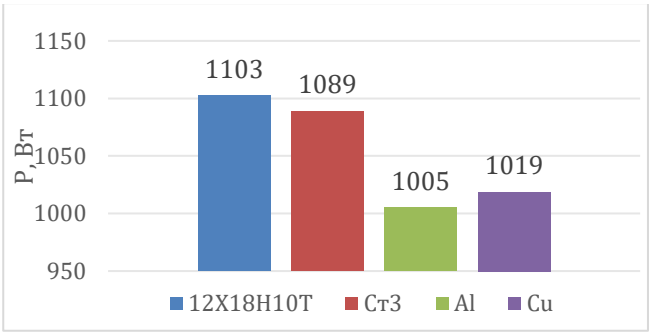

Рис. 7. Гистограмма электрической мощности в зоне резки заготовки из нержавеющей стали 12Х18Н10Т для всех типов используемых инструментов

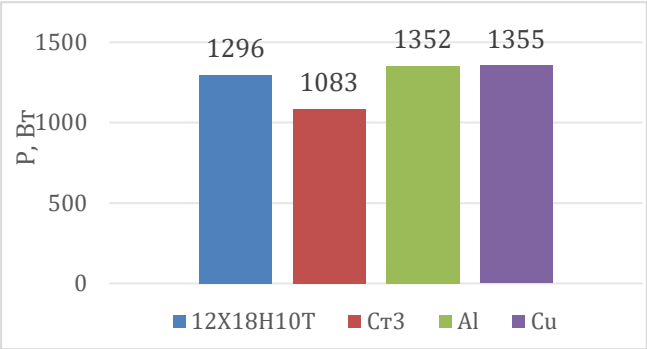

Рис. 8. Гистограмма электрической мощности в зоне резки заготовки из сплава АМГ6М для всех типов используемых инструментов

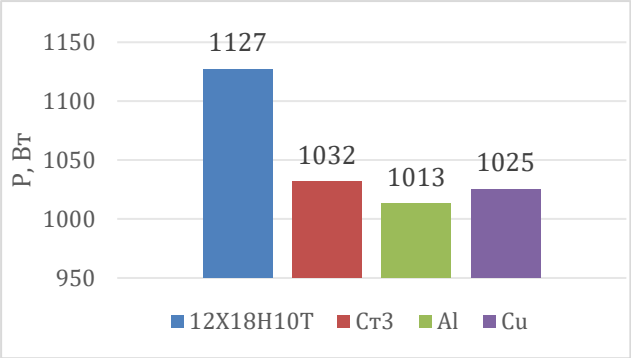

Рис. 9. Гистограмма электрической мощности в зоне резки заготовки из углеродистой стали Ст3 для всех типов используемых инструментов

Масса и объём снятого с заготовок материала при ЭКР используемыми инструментами определялась исходя из полученных значений ширины реза и сечения заготовок.

Ширина реза ($t_р$) заготовки при использовании разных сочетаний инструментов представлена в табл. 4.

Таблица 4. Ширина реза при ЭКР заготовок используемыми инструментами

Материал инструмента	**Материал заготовки**		
	Ст3	12Х18Н10Т	АМГ6М
	$t_р$, мм		
12Х18Н10Т	1	1,8	1,41
Ст3	1,07	2	2,25
АМГ6М	1,35	2,34	2,3
Cu	1,77	1,9	1,97

Значения объёмной производительности ($V_{ме}$) при ЭКР заготовок представлены в табл. 5.

Таблица 5. Объёмная производительность при ЭКР заготовок

Материал инструмента	**Материал заготовки**		
	Ст3	12Х18Н10Т	АМГ6М
	$V_{ме}$, мм^3/с		
12Х18Н10Т	5,98	8,47	9,91
Ст3	6,42	9,42	10,1
АМГ6М	8,08	11,02	16,56
Cu	10,62	8,94	10,3

Анализ гистограмм и объёмной производительности показывает, что высокая мощность в зоне резки не гарантирует высокой производительности.

Некоторые сочетания инструмента и заготовки, несмотря на меньшую мощность, обеспечивают значительно более высокую скорость резки, что свидетельствует о более эффективном использовании энергии.

Согласно данным табл. 5, были установлены следующие зависимости:

1. Объёмная производительность зависит от характеристик материала заготовки и инструмента.

2. Производительность при резке заготовки из стали Ст3:

2.1. Производительность для инструмента из стали Ст3 больше, чем для инструмента из стали 12Х18Н10Т.

2.2. Производительность для инструмента из меди (Cu) составляет наибольшую величину.

2.3. Производительность для инструмента из сплава АМГ6М на 20 % ниже, чем для инструмента из меди (Cu).

3. Производительность при резке заготовки из стали 12Х18Н10Т:

3.1. Производительность для инструмента из сплава АМГ6М достигает самого высокого значения.

3.2. Производительность для инструмента из стали 12Х18Н10Т достигает самого низкого значения.

4. Производительность при резке заготовки из сплава АМГ6М:

4.1. Производительность для инструмента из сплава АМГ6М достигает самого высокого значения.

4.2. Производительность для инструментов из стали Ст3 и меди (Cu) принимает близкие значения.

Таким образом, высокое или низкое значение силы тока и напряжения может регулироваться теплофизическими свойствами материалов заготовок и инструментов в зависимости от их сочетания.

Для определения удельных энергозатрат используем общеизвестную формулу:

$$\gamma = \frac{I \cdot U \cdot \tau}{m}, \qquad (5)$$

где γ – расчётное значение удельных энергозатрат, кВт·ч/кг; τ – время резки, с; I – сила тока, А; U – напряжение, В; m – масса снятого материала, кг.

Расчёты удельных энергозатрат выполнялись для каждой секунды резки.

Полученные данные использовались для определения среднего арифметического значения расчётных удельных энергозатрат ($\gamma_{ср}$), представленного в табл. 6.

При расчёте среднего арифметического значения первая и последняя секунда резки исключены.

Для инструментов из меди (Cu) и сплава АМГ6М использовались данные со 2 по 5 секунды резки, для сталей Ст3 и 12Х18Н10Т – со 2 по 4 секунду.

Согласно работе псо электрофизическим методам обработки в металлургическом производстве при ЭКР заготовок из сплавов алюминия АМЦ и Д16, сталей 45, ШХ15 удельные энергозатраты варьируются от 1,5 до 2,2 кВт·ч/кг [23].

Таблица 6. Средние расчётные значения удельных энергозатрат при ЭКР заготовок

Материал инструмента	Материал заготовки		
	Ст3	12Х18Н10Т	АМГ6М
	$\gamma_{ср}$, кВт·ч/кг		
12Х18Н10Т	1,848	1,188	1,553
Ст3	1,850	1,059	1,233
АМГ6М	1,377	0,878	0,832
Cu	1,080	1,044	1,351

Сравнение значений производительности и удельных энергозатрат, полученных экспериментальным путём, позволяет установить следующие закономерности и отклонения:

1. Заготовка – сталь Ст3:

1.1. Инструмент из меди (Cu) – самые высокая производительность и самые низкие удельные энергозатраты.

1.2. Инструмент сплава АМГ6М – уменьшение производительности сопровождается ростом удельных энергозатрат по сравнению с инструментом из меди (Cu).

1.3. Инструменты из сталей Ст3 и 12Х18Н10Т – различия в удельных энергозатратах пренебрежимо малы, однако производительность первого несколько больше второго.

2. Заготовка – сталь 12Х18Н10Т. При использовании инструмента из сплава АМГ6М достигается самая высокая производительность и самые низкие удельные энергозатраты.

3. Заготовка – сплав АМГ6М. Инструмент из сплава АМГ6М – самая высокая производительность и самые низкие удельные энергозатраты.

Таким образом, с точки зрения оценки удельных энергозатрат и производительности среди рассматриваемых сочетаний материалов заготовок и инструментов определены наиболее подходящие:

1. Заготовка сталь Ст3 – инструмент медь (Cu).

2. Заготовка сталь 12Х18Н10Т – инструмент сплав АМГ6М.

3. Заготовка сплав АМГ6М – инструмент сплав АМГ6М.

Для определения коэффициента эрозии, представленного в табл. 6, используем выражение, полученное путём преобразования формулы (3).

В расчётах использовалось время резки, принятое равным 7 с.

Полученное выражение для определения коэффициента электрической эрозии примет вид:

$$k_{эр} = \frac{V_{ме}}{I_{ср} \cdot \tau}, \qquad (4)$$

где $k_{эр}$ – теоретический коэффициент эрозии обрабатываемого металла, мм^3/А·с; $V_{ме}$ – объём снятого металла, мм^3; τ – время резки, с; $I_{ср}$ – среднее значение силы тока, А.

Сравнение значений коэффициента эрозии табл. 6 и объёмной производительности табл. 5 позволяет установить следующие закономерности и отклонения:

1. Заготовка – сталь Ст3. Прослеживается прямая связь между коэффициентом эрозии заготовки при использовании каждого типа инструмента и производительностью. Рост коэффициента эрозии приводит к росту производительности.

2. Заготовка – сталь 12Х18Н10Т. Для всех инструментов кроме меди (Cu) рост коэффициента эрозии приводит к росту производительности, что может быть связано с высокой теплопроводностью меди (Cu).

3. Заготовка – сплав АМГ6М. Из общего ряда зависимостей вновь выбивается инструмент из меди (Cu), что также может быть связано с его высокой теплопроводностью.

Сравнение данных табл. 2, 5, 7 позволило установить, что данные производительности и коэффициентов эрозии, полученные по известным зависимостям, меньше величин рассматриваемых показателей, полученных экспериментальным путём.

Таблица 7. Коэффициент эрозии обрабатываемых материалов для разных сочетаний материалов заготовок и инструментов

Материал инструмента	Материал заготовки		
	Ст3	12Х18Н10Т	АМГ6М
	$k_{эр}$, мм^3/А·с		
12Х18Н10Т	0,167	0,35	0,3
Ст3	0,179	0,41	0,38
АМГ6М	0,221	0,49	0,46
Cu	0,4	0,42	0,22

В то же время были установлены следующие закономерности и отклонения:

1. Заготовка – сплав АМГ6М. Значительно превосходящая остальные заготовки величина коэффициента эрозии, рассчитанного по литературным зависимостям, хотя и не отражает самые большие характеристики того же показателя, полученного экспериментальным путём, однако соответствует самым высоким величинам фактической производительности.

2. Заготовка – сталь 12Х18Н10Т. Значение коэффициента эрозии, полученного по известным зависимостям значительно меньше, чем для инструмента из сплава АМГ6М, по экспериментальным данным – для стали 12Х18Н10Т больше, чем для сплава АМГ6М.

3. Заготовка – сталь Ст3. Самое низкое значение коэффициента эрозии, рассчитанного как по известным зависимостям, так и по экспериментальным данным, за исключением случая использования инструмента из меди (Cu).

Однако использование коэффициента эрозии, полученного по литературным зависимостям, для предварительной оценки производительности и удельных энергозатрат требует проведения дополнительных исследований.

Заключение. В работе было установлено, что выбор оптимального материала инструмента играет ключевую роль в обеспечении высоких значений производительности и низких удельных энергозатрат.

Было проведено сравнение коэффициента эрозии и производительности, рассчитанных по известным зави-

симостям и экспериментальным данным, что позволило получить более полное представление о возможности по формулы (1) для определения исследуемых показателей.

Была произведена оценка коэффициента эрозии и производительности, полученных по экспериментальным данным, что позволило дополнить представление о взаимосвязях между данными показателями.

В работе установлена необходимость учёта дополнительных факторов, к которым может относиться износ инструмента, его геометрия, адгезия между поверхностями инструмента и заготовки, и другие.

Таким образом, данное исследование подчёрчивает значимость правильного выбора инструмента и учёта теплофизических свойств материалов при технологической подготовке процесса ЭКР.

Результаты могут служить основой для дальнейшего совершенствования технологии и внедрения её в промышленные условия.

Дальнейшие исследования будут направлены на учёт влияния износа инструмента и адгезии между поверхностями инструмента и заготовки.

Литература

1. Вишницкий А.Л. Электрохимическая и электромеханическая обработка металлов / Вишницкий А.Л., Ясногорский И.З., Григорчук И.П. Л. : Машиностроение, 1971. 211 с.
2. Семёнов В.Н., Фотеев Н.К. Некоторые вопросы методики исследования электроконтактной резки // Электронная обработка материалов. 1984. № 2 (20). С. 11–15.
3. Щукин В.Д. Электроэрозионная обработка сплавов повышенной твёрдости // Электрофизические и электрохимические методы обработки. М.: НИИ Маш. 1965. 75 с.
4. Валяев А.Н., Зайцев А.Н., Карецкий Ю.Н. Расчёт температурного поля диска-инструмента при электроконтактной обработке металлов. // Тезисы докладов всесоюзной научно-практической конференции / Комбинированные электронно-электрохимические методы размерной обработки металлов. УФА.: УАИ. 1983. С. 37–40.
5. Шестаков И.Я., Веретнова Т.А., Ремизов И.А., Зиборова Н.А. Энергосберегающий способ электроконтактной резки металла. // Решетнёвские чтения. 2009. Том 1.1. С. 44–46.
6. Веретнова Т.А., Шестаков И.Я., Цуканов А.В., Ковалева А.А., Ремизов И.А. Исследование влияния теплообменных процессов на удельные энергозатраты при электроконтактной резке металла. // Вестник сибирского государственного аэрокосмического университета им. Академика М.Ф. Решетнёва. 2009. №2 (23). С. 241–246.
7. Веретнова Т.А., Ковалева А.А., Шестаков И.Я., Тинькова С.М., Пьяных А.А. Моделирование теплообменных процессов при электроконтактной резке металлов. // Вестник сибирского государственного аэрокосмического университета им. Академика м.ф. Решетнева. 2010. № 4 (30). С. 141–144.
8. Тимофеев Е.Н., Шестаков И.Я., Ремизов И.А., Шестаков В.И. Оценка производительности и удельных энергозатрат электроконтактной резки металлов быстровращающимся диском. // Системы. Методы. Технологии. 2025. № 3 (67). С. 20–28.
9. Александров В.П. Влияние материала электрода-инструмента и его структуры на величину эрозии электродов. // Труды. 1965. № 1 (20). С. 17–24.
10. Шестаков И.Я., Шестаков В.И., Ремизов И. А. Коэффициент эрозии электроконтактной обработки металлов вибрирующим электродом-инструментом в электролите. // Сибирский аэрокосмический журнал. 2023. № 1 (24). С. 204–210.
11. Шестаков И.Я., Шестаков В.И., Ремизов И. А. Коэффициент эрозии при электро-контактной обработке металлов. // Сибирский аэрокосмический журнал. 2022. № 2 (23). С. 337–346.
12. Чиркин В.С. Теплофизические свойства материалов. М.: Государственное издательство физико-математической литературы, 1959. 356 с.
13. Дриц М.Е. Свойства элементов / Дриц М.Е., Будберг П.Б., Бурханов Г.С., Дриц А.М., Пановко В.М. Л. : Металлургия, 1985. 672 с.
14. Хольм Р. Электрические контакты. М.: Издательство иностранной литературы, 1961. 464 с.
15. Химушин Ф.Ф. Нержавеющие стали. – 2-е изд., перераб. и доп. М.: Металлургия, 1967. – 798 с. ил.; 22.
16. Мастрюков Б.С. Теория, конструкции и расчёты металлургических печей. Т. 2. Расчёты металлургических печей. М.: Металлургия, 1978. 272 с.
17. Тимофеев, Е.Н. Исследование адгезии при электроконтактной обработке / Е. Н. Тимофеев, И. Я. Шестаков // Системы. Методы. Технологии, 2025. – № 1 (65). – С. 39-–5.
18. Зиновьев В.Е. Теплофизические свойства металлов при высоких температурах. М.: Металлургия, 1989.384 с.
19. Зубченко А.С. Марочник сталей и сплавов. М.: Машиностроение – 1, 2003. 782 с.
20. Сорокин В.Г. Марочник сталей и сплавов / Сорокин В.Г., Волосникова А.В., Вяткин С.А., Гервасьев М.А., Гредитор М.А., Крылова К.М., Кубачек В.В., Мирмельштейн В.А. М.: Машиностроение, 1989. 640 с.
21. Белецкий В.М. Алюминиевые сплавы / Белецкий В.М., Кривов Г.А. К.: Коминтех, 2005. 365 с.
22. Витлин В.Б., Давыдов А.С. Электрофизические методы обработки в металлургическом производстве. М.: Металлургия, 1979. 160 с.
23. Фомин Н.Е., Ивлев В.И., Юдин В.А. Влияние примесей на электросопротивление меди и алюминия // Инженерные технологии и системы. 2014. № 1–2. С 50–57.

References

1. Vishnitskiy A.L., Yasnogorskiy I.Z., Grigorchuk I.P. Electrochemical and Electromechanical Metal Machining. Leningrad: Mashinostroenie, 1971. 211 p.
2. Semenov V.N., Foteev N.K. Some methodological issues in the study of electro-contact cutting // Electro-Machining Methods (Elektronnaya obrabotka materialov). 1984. No. 2 (20). P. 11–15.
3. Shchukin V.D. Electro-discharge machining of high-hardness alloys // Electrophysical and Electrochemical Machining Methods. Moscow: NIIMash, 1965. 75 p.
4. Valyaev A.N., Zaytsev A.N., Karetskiy Yu.N. Calculation of the temperature field of a disc tool during electro-contact metal machining // Abstracts of the All-Union Scientific and Practical Conference: Combined Electro-physical and Electrochemical Methods of Dimensional Metal Machining. Ufa: UAI, 1983. P. 37–40.
5. Shestakov I.Ya., Veretnova T.A., Remizov I.A., Ziborova N.A. Energy-saving method for electro-contact metal cutting // Reshetnev Readings. 2009. Vol. 1.1. P. 44–46.

6. Veretnova T.A., Shestakov I.Ya., Tsukanov A.V., Kovaleva A.A., Remizov I.A. Investigation of the influence of heat exchange processes on specific energy consumption during electro-contact metal cutting // Bulletin of the Siberian State Aerospace University... ...Academician M.F. Reshetnev. 2009. No. 2 (23). Pp. 241–246.
7. Veretnova T.A., Kovaleva A.A., Shestakov I.Ya., Tinkova S.M., Pyanykh A.A. Modeling of heat exchange processes during electro-contact metal cutting. // Bulletin of the Siberian State Aerospace University named after Academician M.F. Reshetnev. 2010. No. 4 (30). Pp. 141–144.
8. Timofeev E.N., Shestakov I.Ya., Remizov I.A., Shestakov V.I. Assessment of productivity and specific energy consumption in electro-contact metal cutting using a rapidly rotating disk. // Systems. Methods. Technologies. 2025. No. 3 (67). Pp. 20–28.
9. Aleksandrov V.P. Influence of the electrode-tool material and its structure on the magnitude of electrode erosion. // Proceedings. 1965. No. 1 (20). Pp. 17–24.
10. Shestakov I.Ya., Shestakov V.I., Remizov I.A. Erosion coefficient for electro-contact metal processing using a vibrating electrode-tool in an electrolyte. // Siberian Aerospace Journal. 2023. No. 1 (24). Pp. 204–210.
11. Shestakov I.Ya., Shestakov V.I., Remizov I.A. Erosion coefficient in electro-contact metal processing. // Siberian Aerospace Journal. 2022. No. 2 (23). pp. 337–346.
12. Chirkin V.S. Thermophysical Properties of Materials. Moscow: State Publishing House of Physical and Mathematical Literature, 1959. 356 p.
13. Drits M.E. Properties of Elements / Drits M.E., Budberg P.B., Burkhanov G.S., Drits A.M., Panovko V.M. Leningrad: Metallurgiya, 1985. 672 p.
14. Holm R. Electric Contacts. Moscow: Foreign Literature Publishing House, 1961. 464 p.
15. Khimushin F.F. Stainless Steels. 2nd ed., revised and supplemented. Moscow: Metallurgiya, 1967. 798 p., ill.
16. Mastryukov B.S. Theory, Design, and Calculations of Metallurgical Furnaces. Vol. 2. Calculations of Metallurgical Furnaces. Moscow: Metallurgiya, 1978. 272 p.
17. Timofeev E.N. Investigation of Adhesion during Electric Contact Processing / E.N. Timofeev, I.Ya. Shestakov // Systems. Methods. Technologies, 2025. No. 1 (65). pp. 39–45.
18. Zinovyev V.E. Thermophysical Properties of Metals at High Temperatures. Moscow: Metallurgiya, 1989. 384 p.
19. Zubchenko A.S. Handbook of Steels and Alloys. Moscow: Mashinostroenie – 1, 2003. 782 p.
20. Sorokin V.G. Handbook of Steels and Alloys / Sorokin V.G., Volosnikova A.V., Vyatkin S.A., Gervasyev M.A., Greditor M.A., Krylova K.M., Kubachek V.V., Mirmelshtein V.A. Moscow: Mashinostroenie, 1989. 640 p.
21. Beletsky V.M. Aluminum Alloys / Beletsky V.M., Krivov G.A. Kyiv: Komintekh, 2005. 365 p.
22. Vitlin V.B., Davydov A.S. Electrophysical Machining Methods in Metallurgical Production. Moscow: Metallurgiya, 1979. 160 p.
23. Fomin N.E., Ivlev V.I., Yudin V.A. Influence of Impurities on the Electrical Resistance of Copper and Aluminum // Engineering Technologies and Systems. 2014. No. 1–2. P. 50–57.