

## Оценка производительности и удельных энергозатрат электроконтактной резки металлов быстровращающимся диском

Е.Н. Тимофеев<sup>2a</sup>, И.Я. Шестаков<sup>2b</sup>, И.А. Ремизов<sup>1, 3c</sup>, В.И. Шестаков<sup>2d</sup>

<sup>1</sup> Красноярский государственный медицинский университет имени профессора В.Ф. Войно-Ясенецкого Россия, 660022, г. Красноярск, ул. Партизана Железняка, 1

<sup>2</sup> Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнева Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31

<sup>3</sup> Сибирский федеральный университет, просп. Свободный, 79, Красноярск, Россия

<sup>a</sup> timofeew1800@gmail.com, <sup>b</sup> yakovlevish@mail.ru, <sup>c</sup> 2remizov@mail.ru, <sup>d</sup> pn3vm4t@mail.com

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

<sup>c</sup> <https://orcid.org/0000-0002-6980-0167>, <sup>d</sup> <https://orcid.org/009-0002-8564-055>

Статья поступила 17.08.2025, принята 15.09.2025

*Одним из перспективных методов резки металлических заготовок является электроконтактный способ. Как и любой другой метод, он требует постоянного совершенствования. Для оценки любого метода обработки необходимо определить его эффективность. Основными критериями оценки эффективности являются производительность и удельные энергозатраты. С целью повышения производительности в данной работе выполняется определение наиболее целесообразных условий и режимов электроконтактной резки. В работе проводится анализ технической литературы на предмет факторов, влияющих на изменение производительности и удельных энергозатрат, используются справочные и экспериментальные данные для проведения расчётов, необходимых для выявления закономерностей между режимами резки и процессами, происходящими при ЭКР в зоне резания. По результатам работы была произведена оценка тепловых, электрических и механических потерь при электроконтактной резке заготовок из сталей Ст3 и 12X18H10T. Определено, что производительность повышается с увеличением напряжения и снижением сопротивления внешней цепи. Экспериментально установлены соотношения рабочего напряжения ( $U_p$ ) и напряжения холостого хода ( $U_{xx}$ ). Оценка тепловых потерь позволила подтвердить литературные данные о том, что большая часть тепла расходуется не на расплавление материала заготовки, а на нагрев средств технологического оснащения. Проведённая оценка поверхности дискового электрода-инструмента позволила установить, что его износ не превышает 1,9–2,1 % от объёма удалённого при резке металла. Было установлено влияние полярности и мощности на производительность и удельные энергозатраты при резке заготовок из стали Ст3 и 12X18H10T.*

**Ключевые слова:** электроконтактная обработка; электроды; производительность; удельные энергозатраты.

## Evaluation of productivity and specific energy consumption of contact cutting of metals with a high-speed rotating disk

E.N. Timofeev<sup>2a</sup>, I.Ya. Shestakov<sup>2b</sup>, I.A. Remizov<sup>1,3c</sup>, V.I. Shestakov<sup>2d</sup>

<sup>1</sup> Krasnoyarsk State Medical University named after Professor V.F. Voyno-Yasenetsky; 1, Partizan Zheleznyak St., Krasnoyarsk, Russia

<sup>2</sup> Reshetnev Siberian State University of Science and Technology; 31, Krasnoyarskii Rabochii Pros., Krasnoyarsk, Russia

<sup>3</sup> Siberian Federal University; 79, Svobodny Ave., Krasnoyarsk, Russia

<sup>a</sup> timofeew1800@gmail.com, <sup>b</sup> yakovlevish@mail.ru, <sup>c</sup> 2remizov@mail.ru, <sup>d</sup> pn3vm4t@mail.com

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

<sup>c</sup> <https://orcid.org/0000-0002-6980-0167>, <sup>d</sup> <https://orcid.org/009-0002-8564-055>

Received 17.08.2025, accepted 15.09.2025

*One of the promising methods for cutting metal workpieces is the electric contact method. Like any other method, it requires constant improvement. To evaluate any processing method, it is necessary to determine its efficiency. The main criteria for evaluating the efficiency are productivity and specific energy consumption. In order to improve productivity, this paper defines the most appropriate conditions and modes of electric contact cutting. The paper analyzes technical literature for factors influencing changes in productivity and specific energy consumption, uses reference and experimental data to perform calculations necessary to identify patterns between cutting modes and processes occurring during ECC in the cutting zone. Based on the results of the work, an assessment of thermal, electrical and mechanical losses is performed during electric contact cutting of metal workpieces made of steels St.3 and 12X18N10T. It is determined that productivity increases with increasing voltage and decreasing resistance of the external circuit. The ratio of the operating voltage ( $U_p$ ) and the no-load voltage ( $U_{xx}$ ) is experimentally established. The assessment of heat losses confirms the theoretical data that most of the heat is spent not on melting the workpiece material, but on heating the means of technological equipment. The conducted assessment of the surface of the disk electrode-tool allows one to establish that its wear does not exceed 1,9–2,1 % of the volume of metal removed during cutting. The influence of polarity and power on productivity and specific energy consumption when cutting workpieces from steel St.3 and 12X18N10T is determined.*

**Keywords:** electrocontact processing; electrodes; productivity; specific energy consumption.

**Введение.** Развитие авиакосмической и энергетической отраслей промышленности требует непрерывного увеличения потребления жаропрочных, нержавеющих, антикавитационных и других высоколегированных сплавов, обработка которых обычными механическими методами затруднена или невозможна.

Для обеспечения надёжной, управляемой и экономически эффективной обработки этих сплавов необходимо внедрять новые приёмы обработки и виды режущего инструмента [1–5].

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

Среди методов, указанных выше, способ электроконтактной резки (далее – ЭКР) имеет преимущества: не требуются жидкие среды и источники постоянного тока, незначительно изнашивается режущий инструмент, применяется безопасное для работы напряжение на электродах, резке подвергается любой электропроводный материал независимо от прочности и твёрдости [5–7].

ЭКР сопровождается рядом недостатков, основным из которых является низкое качество обрабатываемой поверхности.

К основным дефектам поверхности, получаемой после ЭКР, относятся: высокая шероховатость, наличие микро-и макротрещин, возникновение внутренних напряжений, мелкозернистость [8, 9].

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

Предыдущие исследования направленные на решение проблемы повышения эффективности ЭКР, проводились в следующих направлениях:

- анализ процессов переноса тепла [9];
- изучение влияния геометрических параметров электрода-инструмента на ход процесса ЭКР [10];
- исследование влияния параметров резки на качество поверхности [11];
- разработка рекомендаций по выбору схемы питания и напряжения резки [12];
- разработка математической модели распределения электрической энергии на различных участках электрической цепи при ЭКР [13].

Для практики достаточны решения, основанные на приближённых методах, справедливость которых может быть проверена на основе сравнения результатов с экспериментом.

Целью данной работы является определение таких условий и режимов ЭКР, которые позволят повысить её производительность и уменьшить энергозатраты.

**Методология.** В работе проводится анализ технической литературы на предмет факторов, влияющих на изменение производительности, используются справочные и экспериментальные данные для проведения расчётов, необходимых для выявления закономерностей между режимами резки и процессами, происходящими при ЭКР в зоне резания.

При ЭКР удельные энергозатраты формируются из полезной потребляемой мощности и потерь энергии.

Полезная мощность расходуется на вращение инструмента, расплавление заготовки.

Потери энергии можно разделить на электрические, тепловые и механические.

**Электрические потери.** Для оценки электрической составляющей потерь определим максимальную производительность по мощности.

Одним из базовых факторов, влияющих на производительность ЭКР, является потребляемая мощность резания.

Общая мощность ( $P$ ), потребляемая в процессе резки, расходуется на съём металла в зоне обработки ( $P_n$ ) и на нагрев элементов внешней цепи ( $P_b$ ):

$$P = P_b + P_n, \quad (1)$$

Количество тепла в эрозионном промежутке:

$$P_n = R_n \cdot \frac{U^2}{(R_{вн} + R_n)^2}, \quad (2)$$

где  $I$  – ток, А;  $R_{вн}$  – сопротивление проводов, Ом;  $U$  – напряжение, В.

Видно, что полезная мощность ( $P_n$ ) растёт с уменьшением внешнего сопротивления.

Уравнение (2) можно представить в виде:

$$P_n = U^2 \cdot \frac{1}{\left(\frac{R_b^2}{R_n} + 2 \cdot R_b + R_n\right)}, \quad (3)$$

где  $R_b$  – сопротивление элементов внешней цепи.

Из выражения (3) следует, что полезная мощность ( $P_n$ ) принимает максимальное значение при  $R_n = R_b$ :

$$[P_n]_{max} = \frac{U^2}{4 \cdot R_b}, \quad (4)$$

Общую расходуемую мощность определим по формуле:

$$P = 2 \cdot P_n \quad (5)$$

Величина производительности (скорость съёма металла) увеличивается с повышением полезной мощности:

$$M = k \cdot P_n, \quad (6)$$

где  $k$  – коэффициент пропорциональности;  $M$  – производительность, кг/ч.

При  $R_n = R_b$  максимальная производительность равна:

$$M_{max} = k \cdot [P_n]_{max} = k \cdot \frac{U^2}{4 \cdot R_b}, \quad (7)$$

Таким образом, максимальная производительность будет повышаться с увеличением напряжения и снижением сопротивления внешней цепи.

Однако повышение производительности за счёт увеличения напряжения приведёт к возрастанию удельных энергозатрат.

Для решения задачи оптимизации рабочего напряжения были проведены эксперименты по определению соотношения рабочего напряжения ( $U_p$ ) и напряжения холостого хода ( $U_{xx}$ ).

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

КПД машины равен 0,7 [14].

Ручная машина ЭКР представлена в работе по исследованию адгезии при электроконтактной обработке [15].

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

В качестве заготовок использовались следующие трубы:

- из углеродистой стали Ст3 – диаметром 22,4 мм, толщиной стенки 1,7 мм и диаметром 21 мм, толщиной стенки 3 мм;
- нержавеющей стали 12X18H10T – диаметром 18 мм, толщиной стенки 1,7 мм и диаметром 16 мм, толщиной стенки 2,5 мм.

Первый тип заготовок использовался во время опытов для источника тока с регулировкой по напряжению, второй – по току.

Источником постоянного тока служил сварочный выпрямитель ВДУ-506.

Использовались дисковые электрод-инструменты из низкоуглеродистой стали. При регулировке по напряжению диаметр диска составлял 150 мм, по току – 200 мм.

Скорость вращения диска составляла 15 000 об/мин [16], что соответствовало окружной скорости: в первом случае – 112 м/с; во втором случае – 159 м/с.

Полученные значения рабочего напряжения и величины тока в зависимости от изменений напряжения холостого хода для заготовки из стали Ст3 представлены в табл. 1, стали 12X18H10T – в табл. 2.

Результаты табл. 1 и 2 показывают, что рабочее напряжение ( $U_p$ ) и сила тока ( $I_p$ ) линейно растут с увеличением напряжения холостого хода ( $U_{xx}$ ).

Результаты при прямой и обратной полярности свидетельствуют о том, что при проведении исследования необходимо учитывать дополнительные факторы.

К таким факторам относятся как процессы, происходящие между элементами внутренней цепи, так и теплофизические свойства обрабатываемых материалов.

Полученные значения рабочего напряжения и величины тока, измеренные при установленной величине тока на панели выпрямителя, представлены в табл. 3 для заготовки из стали Ст3, стали 12X18H10T – в табл. 4.

Потребляемая мощность расходуется также на нагрев элементов внутренней и внешней цепей.

Таким образом, необходимым подходом к снижению энергозатрат является исследование тепловых процессов, которые происходят на заготовке и инструменте.

**Таблица 1.** Зависимость значений рабочего напряжения и величина тока от напряжения холостого хода при резке стальной трубы (Ст3)

$U_{xx}, В$	$U_p, В$		$I_p, А$	
	Прямая полярность	Обратная полярность	Прямая полярность	Обратная полярность
20	8,0	6,0	50	65
25	8,6	6,3	55	75
30	9,2	6,6	62	85
35	10,0	7,0	69	105
40	10,5	7,8	80	117
45	11,3	9,0	100	130
50	12,0	10,5	120	150

**Таблица 2.** Зависимость значений рабочего напряжения и величина тока от напряжения холостого хода при резке стальной трубы (12X18H10T)

$U_{xx}, В$	$U_p, В$		$I_p, А$	
	Прямая полярность	Обратная полярность	Прямая полярность	Обратная полярность
20	6,0	6,0	70	50
25	7,1	6,7	80	60
30	8,6	7,7	90	70
35	10,0	8,8	100	80
40	11,6	9,6	113	90
45	13,8	10,7	125	105
50	17,0	12,0	140	130

**Таблица 3.** Зависимость значений рабочего напряжения и величины тока от установленной величины тока на панели выпрямителя при резке стальной трубы (Ст3)

$I, А$	$I_p, А$		$U_p, В$	
	Прямая полярность	Обратная полярность	Прямая полярность	Обратная полярность
50			7,0	6,7
100	13	14	10,3	9,9
150			13,5	13,1
200	25–41 / 33	26–42	17,1	16,5
250	41		20,6	19,9
300	63	64	23,9	23

**Таблица 4.** Зависимость значений рабочего напряжения и величины тока от установленной величины тока на панели выпрямителя при резке стальной трубы (12X18H10T)

$I, А$	$I_p, А$		$U_p, В$	
	Прямая полярность	Обратная полярность	Прямая полярность	Обратная полярность
50			5,8	6,0
100	13	14	8,7	9,0
150			11,5	11,9
200	25–41	26–42	14,3	14,8
250			16,2	16,8
300	63	64	20,0	20,5

**Тепловые потери.** ЭКР заготовок проводится в условиях дугообразования, поэтому в данной работе будем считать, что всё тепло в зоне резания формируется за счёт преобразования энергии разрядов в тепловую.

Тепловые потери можно разделить на потери в зоне резания и вокруг неё.

К тепловым потерям в зоне резания можно отнести нагрев диска обрабатываемой детали, испарение рас-

плавленного металла, а также другие виды излучений и конвективный обмен с окружающей средой.

В работе В.Б. Витлина и А.С. Давыдова указывается на то, что в зоне резания большая часть тепловой энергии расходуется на нагрев металла заготовки и инструмента [6].

Поэтому в данной работе потери тепла расходуемые, на испарении жидкого металла не учитываются.

Количество тепла, выделяемое в зоне резания, определяется законом Джоуля – Ленца:

$$Q = I^2 \cdot R \cdot t = P \cdot t, \quad (8)$$

где  $Q$  – количество тепла, Дж;  $I$  – сила тока, А;  $R$  – сопротивление эрозионного промежутка, Ом;  $t$  – время резки, с;  $P$  – мощность, Вт.

Рассчитанные значения количества тепла, выделяемого в зоне резания, представлены в табл. 5 и 6.

Только часть тепла ( $Q$ ) расходуется на нагрев и плавление металла. Сюда же можно отнести нагрев крепёжных приспособлений.

Приближённо полезная составляющая тепла ( $Q_n$ ) будет определяться по формуле:

$$Q_n = k_n \cdot Q, \quad (9)$$

где  $k_n$  – коэффициент потерь, принимаемый равным 24,6 % [6].

Количество расплавленного металла определяется из выражения:

$$G = \frac{Q_n}{q} = \frac{k_n \cdot Q}{q} = \frac{k_n \cdot P \cdot t}{q}, \quad (10)$$

где  $G$  – количество расплавленного металла, г;  $q$  – теплотемплетность расплавленного металла, Дж/г.

**Таблица 5.** Количество тепла, выделяемое в зоне резания, по закону Джоуля – Ленца (регулировка по напряжению)

U <sub>хх</sub> , В	Q, кДж (Ст3)		Q, кДж (12X18H10T)	
	Прямая полярность	Обратная полярность	Прямая полярность	Обратная полярность
20	4,80	3,90	1,20	2,10
25	5,06	4,11	1,49	2,41
30	5,30	4,26	1,81	2,77
35	5,60	4,41	2,00	3,08
40	5,63	4,56	2,09	3,25
45	5,65	4,68	2,14	3,34
50	5,76	4,73	2,21	3,36

**Таблица 6.** Количество тепла, выделяемое в зоне резания, по закону Джоуля – Ленца (регулировка по току)

I, А	Q, кДж (Ст3)		Q, кДж (12X18H10T)	
	Прямая полярность	Обратная полярность	Прямая полярность	Обратная полярность
50	3,33	3,12	1,08	1,28
100	5,66	5,24	2,31	2,71
150	7,56	7,13	3,53	4,38
200	9,34	8,79	4,65	5,83
250	11,06	10,33	4,88	6,58
300	12,46	11,63	5,08	6,92

Таким образом, количество расплавленного металла растёт при увеличении подаваемой мощности и уменьшении его теплосодержания.

С целью эффективного удаления расплавленного металла из зоны резания и минимизации потерь тепла, необходимо исследовать влияние процессов при ЭКР не только на заготовку, но и на инструмент.

**Износ инструмента.** При ЭКР инструмент подвергается износу в результате теплового и механического воздействия.

Доказано, что при скорости вращения диска больше 100 м/с глубина проплавления дискового ЭИ стремится к нулю [16].

Поэтому при данных условиях работы не будем учитывать износ инструмента от проплавления в результате теплового воздействия на него.

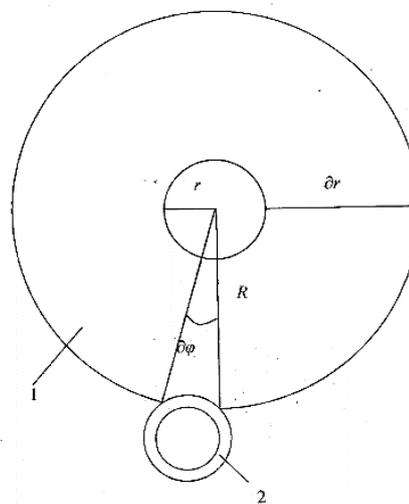
При возникновении температурного градиента на периферии диска возникает потеря устойчивости в процессе работы.

Для устранения этого эффекта необходимо снизить температуру на кромке диска, либо выровнять температуру по всей поверхности диска.

Снижение температуры на периферии диска возможно за счёт СОЖ, либо путём снижения общей температуры в зоне контакта.

Возникающий температурный градиент можно регулировать подбором интенсивности подачи СОЖ.

Схема разрезания заготовки дисковым электродом-инструментом представлена на рис. 2.



**Рис. 2.** Схема разрезания заготовки дисковым электродом-инструментом: 1 – дисковый электрод инструмент; 2 – разрезаемая заготовка [16]

Чтобы избежать механических повреждений (изгиба) электрода-инструмента необходимо знать предельное усилие подачи ( $P_{\text{поддачи}}$ ), которое определяем по формуле:

$$P_{\text{поддачи}} \leq P_{\text{кр}} + P_{\text{ц.ст}}, \quad (11)$$

где  $P_{\text{кр}}$  – критическое усилие, оказываемое на электрод-инструмент, Н;  $P_{\text{ц.ст}}$  – центростремительная сила, Н.

Критическое усилие, оказываемое на электрод-инструмент ( $P_{\text{кр}}$ ), определяем по формуле Эйлера [17]:

$$P_{кр} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot J}{(2 \cdot R)^2}, \quad (12)$$

где  $E$  – модуль продольной упругости материала (модуль Юнга), Н/м<sup>2</sup>;  $J$  – минимальный осевой момент инерции поперечного сечения дискового электрода инструмента, м<sup>4</sup>;  $R$  – радиус дискового электрода – инструмента, м.

Минимальный осевой момент рассчитываем по известной формуле [18]:

$$J = \frac{b^3 \cdot l}{12}, \quad (13)$$

где  $b$  – толщина дискового электрода-инструмента, м;  $l$  – длина контакта дискового электрода-инструмента с заготовкой, м.

Центростремительная сила ( $P_{ц.ст}$ ) определяется из известного выражения [19]:

$$P_{ц.ст} = \gamma \cdot b \cdot \omega^2 \cdot r^2 \cdot \partial\varphi \cdot \partial r, \quad (14)$$

где  $\gamma$  – плотность материала дискового электрода-инструмента, кг/м<sup>3</sup>;  $\omega$  – угловая скорость вращения электрода-инструмента, с<sup>-1</sup>;  $r$  – внутренний радиус дискового электрода-инструмента, м;  $\partial\varphi$  – угол охвата заготовки электродом-инструментом, рад;  $\partial r$  – разность между внешним и внутренним радиусами дискового электрода-инструмента, м.

Определим предельное усилие подачи для четырёх вариантов условий ЭКР:

1. Для резки трубы из стали Ст3, диаметром 22,4 мм, толщиной стенки 1,7 мм. Средняя длина контакта дискового электрода-инструмента с заготовкой 4 мм.

2. Для резки трубы из стали Ст3, диаметром 21 мм, толщиной стенки 3 мм. Средняя длина контакта дискового электрода-инструмента с заготовкой 6,5 мм.

3. Для резки трубы из нержавеющей стали 12Х18Н10Т, диаметром 18 мм, толщиной стенки 1,7 мм. Средняя длина контакта дискового электрода-инструмента с заготовкой 3,5 мм.

4. Для резки трубы из нержавеющей стали 12Х18Н10Т, диаметром 16 мм, толщиной стенки 2,5 мм. Средняя длина контакта дискового электрода-инструмента с заготовкой 5,2 мм.

Толщина дискового электрода-инструмента для первого и третьего варианта равна 1 мм, второго и четвертого – 1,5 мм.

Коэффициент трения для всех указанных выше вариантов равен 0,15.

Результаты расчётов для указанных случаев представлены в табл. 9.

Таблица 9. Характеристики инструмента

№ варианта	J, м <sup>4</sup>	P <sub>кр</sub> , Н	P <sub>ц.ст</sub> , Н	P <sub>подачи</sub> , Н
1	0,33*10 <sup>-12</sup>	29,82	8,21	38,03
2	0,54*10 <sup>-12</sup>	27,45	25,96	53,41
3	0,29*10 <sup>-12</sup>	26,2	8,31	34,51
4	0,43*10 <sup>-12</sup>	21,86	26,29	48,15

Усилие подачи в процессе резки не должно превышать расчётное значение. Повышение усилия подачи снижает переходное сопротивление в зоне контакта диска и обрабатываемого изделия и резкому изменению электрофизических характеристик в зоне резки.

Усилие подачи влияет на механическую энергию вращающегося диска ( $N_{мех}$ ), которая равна [20]:

$$N_{мех} = \frac{2 \cdot \pi \cdot n \cdot M_c}{60}, \quad (15)$$

где  $n$  – скорость вращения дискового электрода-инструмента, об/мин;  $M_c$  – момент сопротивления на валу электрода-инструмента, Н\*м;  $N_{мех}$  – механическая энергия, Вт.

Момент сопротивления на валу электрода-инструмента ( $M_c$ ) определяется по формуле:

$$M_c = G_c \cdot r_d, \quad (16)$$

где  $G_c$  – сила сопротивления, Н;  $r_d$  – радиус дискового электрода-инструмента, м.

В свою очередь величина ( $G_c$ ) представляет силу трения и тогда будет определяться по формуле:

$$G_c = k_{тр} \cdot P_{подачи}, \quad (17)$$

где  $k_{тр}$  – коэффициент трения между электродами.

После подстановки формул (17) и (16) в формулу (15) получим:

$$N_{мех} = \frac{2 \cdot \pi \cdot n \cdot P_{подачи} \cdot k_{тр} \cdot r_d}{60} \quad (18)$$

Подставив значения в формулу (18), получим следующие результаты для вышеуказанных вариантов:

1. Для первого и третьего варианта  $N_{мех}$  составит 530,1 Вт.

2. Для второго и четвертого варианта  $N_{мех}$  составит 1060,3 Вт.

Проведённые испытания показали, что относительный износ электрода-инструмента не превышает 1,9–2,1 % от объёма удалённого при резке металла. Можно отметить утолщение рабочей части диска с 1,0 мм до 1,7 мм за счёт наваривания удаляемого расплава. Однако при этом ширина реза изменялась незначительно и находилась в пределах 1,9–2,2 мм.

**Результаты и обсуждения.** Используя коэффициент эрозии, полученный экспериментально, определим значение производительности ЭКР по формуле:

$$M_T = k_{эр} \cdot I \cdot \rho, \quad (19)$$

где  $k_{эр}$  – коэффициент эрозии, мм<sup>3</sup>/А\*с;  $I$  – сила тока, А;  $M_T$  – производительность обработки, г/с;  $\rho$  – плотность материала, кг/м<sup>3</sup>.

Для сталей Ст3 и 12Х18Н10Т экспериментальные значения  $k_{эр}$  примем равными 0,39 мм<sup>3</sup>/А\*с и 0,9 мм<sup>3</sup>/А\*с, соответственно [21].

Результаты расчёта значения производительности метода ЭКР сталей Ст3 и 12Х18Н10Т представлены на рис. 3.

Из графика видно, что производительность ЭКР стали 12Х18Н10Т выше, чем стали Ст3.

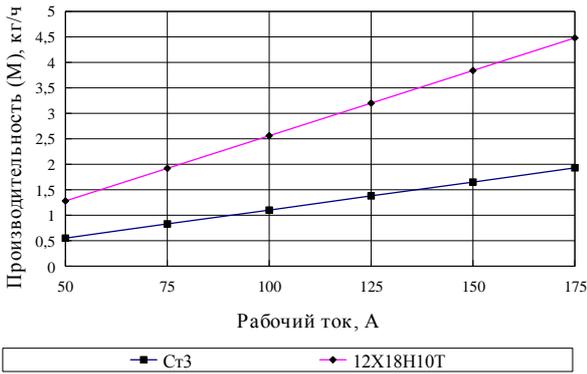


Рис. 3. Зависимость производительности резки стальной трубы (Ст3 и 12X18H10T) от величины рабочего тока

Расчётные значения производительности, полученные с использованием коэффициента эрозии, сопоставим с результатами экспериментального измерения.

Результаты экспериментов, проводимых на источнике питания с регулировкой по току, приведены на рис. 4 и 5.

Из графиков видно, что при ЭКР стали Ст3 производительность при обратной полярности выше, чем при прямой, а при резке стали 12X18H10T наоборот – ниже.

При повышении величины рабочего тока от 50 А до 175 А производительность ЭКР стали Ст3 повышается с 1,2 кг/ч до 4,1 кг/ч, стали 12X18H10T – с 1,63 кг/ч до 5,6 кг/ч.

Согласно представленным данным производительность ЭКР стали 12X18H10T незначительно превышает производительность ЭКР стали Ст3.

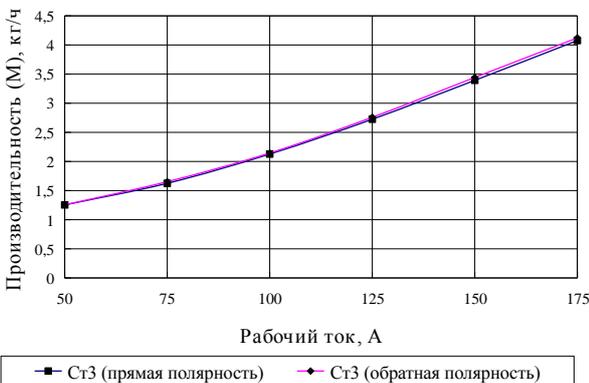


Рис. 4. Зависимость производительности резки стальной трубы (Ст3) от величины рабочего тока

Повышенные значения производительности при ЭКР нержавеющей сталей, в сравнении с углеродистыми, в основном связаны с различием теплопроводностей этих сталей.

Нержавеющая сталь имеет теплопроводность значительно ниже, вследствие чего при ЭКР её тепловые потери будут меньше.

Экспериментальные значения производительности ЭКР стали Ст3 и стали 12X18H10T выше тех, что были рассчитаны с использованием коэффициента эрозии.

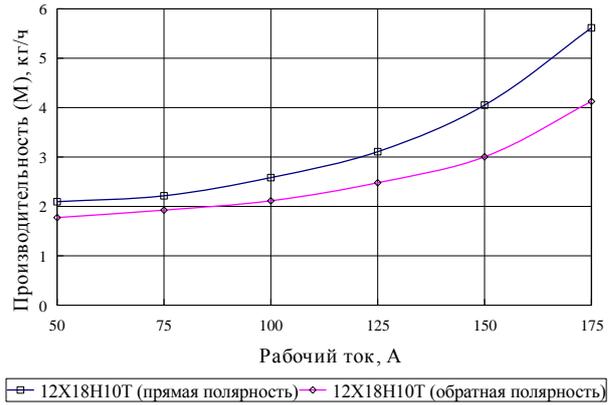


Рис. 5. Зависимость производительности резки стальной трубы (12X18H10T) от величины рабочего тока

Линейный рост производительности отмечается как в экспериментальных, так и в расчётных данных для стали Ст3.

Экспериментальные данные для стали 12X18H10T не подтверждают наличие линейного роста производительности, наблюдаемого в расчётных данных.

Результаты экспериментов, проводимых при регулировке напряжения холостого хода, приведены на рис. 6 и 7.

Из графика видно, что влияние полярности на производительность при регулировке напряжения холостого хода аналогично результатам, полученным при регулировке рабочего тока, для обеих сталей.

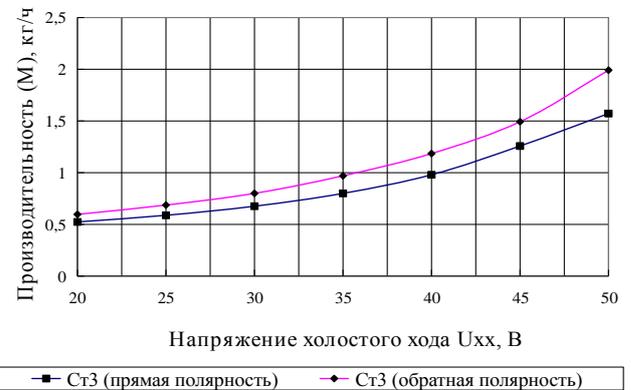


Рис. 6. Зависимость производительности резки стальной трубы (Ст3) от напряжения холостого хода

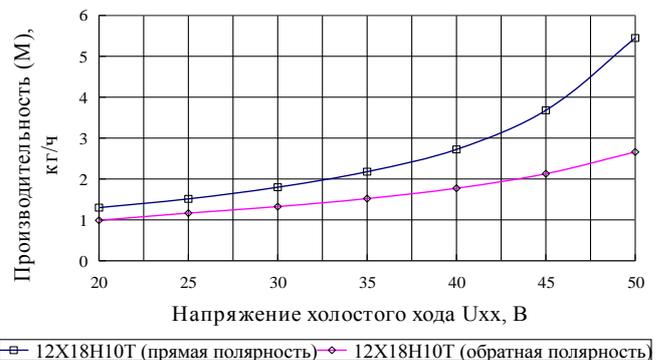


Рис. 7. Зависимость производительности резки стальной трубы (12X18H10T) от напряжения холостого хода

При повышении  $U_{xx}$  от 20 В до 50 В производительность ЭКР стали Ст3 повышается с 0,59 кг/ч до 1,97 кг/ч, стали 12Х18Н10Т – от 1,36 кг/ч до 5,20 кг/ч.

В то же время при ЭКР стали Ст3, в отличие от ситуации с регулировкой по току, наблюдается гиперболический рост зависимости производительности от напряжения холостого хода.

Для стали 12Х18Н10Т аналогичный гиперболический рост производительности отмечается как при регулировке напряжения холостого хода, так и при регулировке рабочего тока.

При электроконтактной резке (ЭКР) сталей Ст3 и 12Х18Н10Т с регулировкой по току производительность достигает наибольших начальных и максимальных значений, что указывает на преимущество регулировки рабочего тока перед регулировкой напряжения холостого хода.

На рис. 8 показана зависимость удельного расхода электроэнергии от величины напряжения холостого хода (*a* – электрическая составляющая, *b* – механическая составляющая, *в* – общая), при ЭКР углеродистых и нержавеющей сталей (дисковый электрод-инструмент диаметром 150 мм; линейная скорость диска – 112 м/с).

Из графиков видно, что полярность напряжения оказывает влияние на удельные энергозатраты.

Удельные энергозатраты при резке углеродистых сталей составляли 0,661 кВт·ч/кг при напряжении холостого хода 20 В и производительности 0,59 кг/ч, при резке нержавеющей сталей расход энергии снижается до 0,231 кВт·ч/кг при том же напряжении и производительности 1,36 кг/ч.

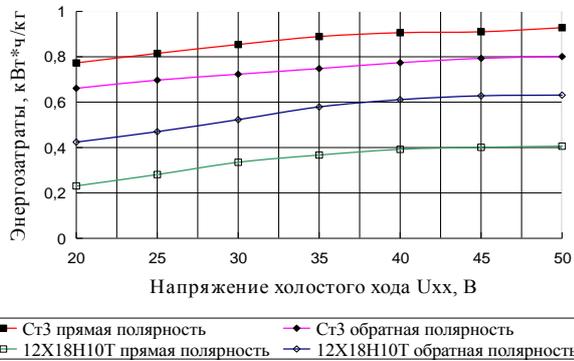


Рис. 8, а. Зависимость удельного расхода электрической энергии от напряжения холостого хода

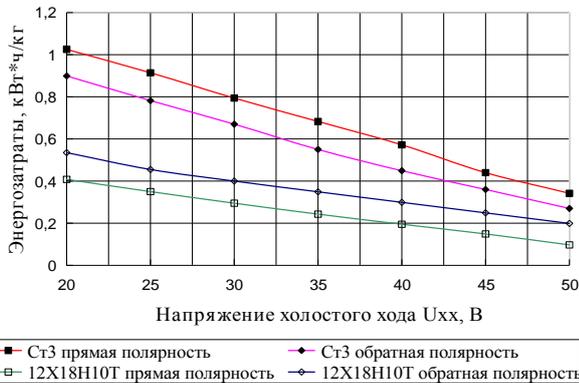


Рис. 8, б. Зависимость удельного расхода механической энергии от напряжения холостого хода

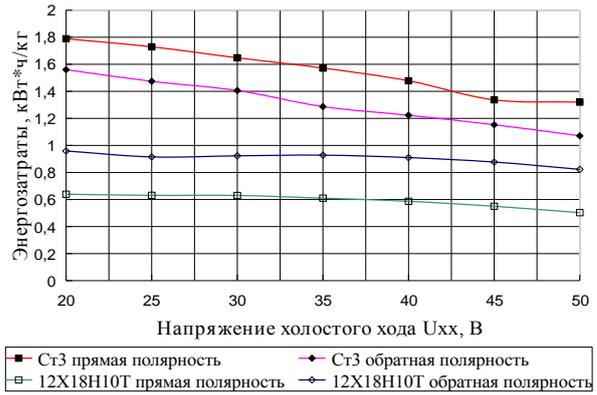


Рис. 8, в. Зависимость удельного расхода энергии от напряжения холостого хода (общая)

На рис. 9 показана зависимость удельного расхода электроэнергии от величины рабочего тока (*a* – электрическая составляющая, *b* – механическая составляющая, *в* – общая), при ЭКР углеродистых и нержавеющей сталей (дисковый электрод-инструмент диаметром 200 мм, линейная скорость диска составляла 159 м/с).

Полученные графики показывают, что полярность включения влияет на удельные энергозатраты.

При резке углеродистой стали при рабочем токе 50 А удельные энергозатраты составляли 0,279 кВт·ч/кг при производительности 0,5 кг/ч, тогда как при резке нержавеющей стали при том же токе удельные энергозатраты снижаются до 0,138 кВт·ч/кг при производительности 1,25 кг/ч.

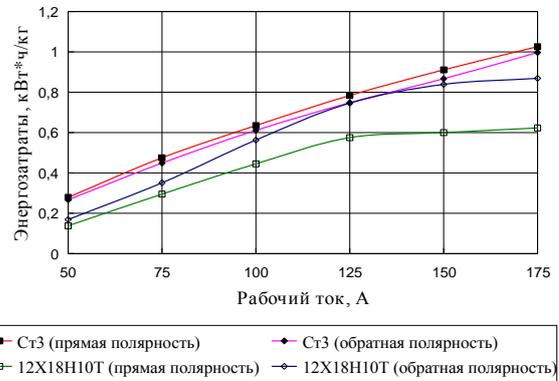


Рис. 9, а. Зависимость удельного расхода электрической энергии от величины рабочего тока

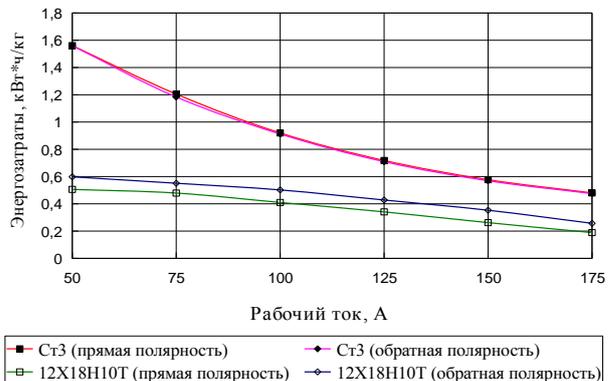


Рис. 9, б. Зависимость удельного расхода механической энергии от величины рабочего тока

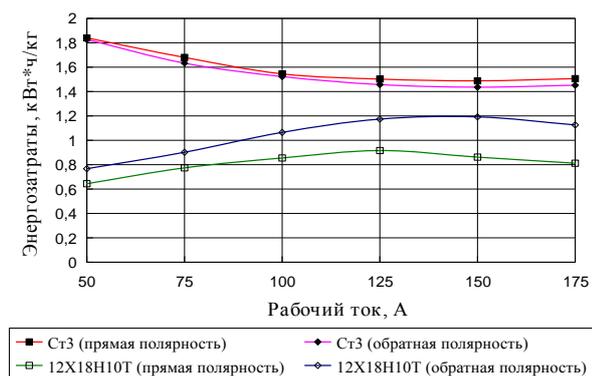


Рис. 9, в. Зависимость удельного расхода энергии от величины рабочего тока (общая)

**Выводы.** По результатам работы была определена зависимость производительности ЭКР от величины рабочего тока и напряжения холостого хода.

Определена зависимость производительности и удельного расхода энергии от полярности.

Для сталей Ст3, 12X18H10T были получены значения рабочего напряжения и величины тока как для случая с регулировкой напряжения холостого хода, так и с регулировкой по току.

Определён уровень расхода тепла и электроэнергии на расплавление материала заготовки и на отвод тепла из зоны резания.

Определена зависимость удельного расхода механической, электрической и общей энергии от величины рабочего тока и напряжения холостого хода.

#### Литература

1. Веселовский С.И., Фролов В.Я., Донской А.В. Электродугоконтактная резка металлов. – СПб. : Энергоатомиздат, 1993. – 123 с.
2. Uskov I.V., Belyaev S.V., Gilmanshina T.R. et al. Next-generation technologies of manufacturing of waveguides from aluminum alloys // ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences. – 2016. – Vol. 11, № 21. – P. 12367–12370.
3. Zikeev V.N. Metal Science and Heat Treatment // Metal Science and Heat Treatment. – Vol. 50, № 11–12. – P. 518–521.
4. Illarionov I.E., Bogdanova T.A., Gil'manshina T.R. et al. Technology for Modifying Aluminum Alloys with Ultrafine Silicon // Metallurgist. – 2018. – Vol. 62, № 5–6. – P. 476–481.
5. Быковский О.Г., Фролов В.А., Пешков В.В. Сварка и резка цветных металлов. – М. : ИНФРА-М, 2016. – 336 с.
6. Витлин В.Б., Давыдов А.С. Электрофизические методы обработки в металлургическом производстве. – М. : Металлургия, 1979. – 159 с.
7. Vitlin V.B. Electrocontact-abrasive cutting of semifinished products // Metallurgist. – Vol. 27, № 8. – P. 285–288.
8. 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. Решетнева. – 2009. – № 2 (23). – С. 241–246.
9. Вишницкий А.Л. Электрохимическая и электрохимическая обработка металлов / Вишницкий А.Л., Ясногорский И.З., Григорчук И.П. – Л. : Машиностроение, 1971. – 211 с.
10. Семенов, В.Н., Фотеев, Н.К. Некоторые вопросы методики исследования электроконтактной резки // Электронная обработка материалов. – 1984. – № 2 (20). – С. 11–15.
11. Шукин В.Д. Электроэрозионная обработка сплавов повышенной твёрдости // Электрофизические и электрохимические методы обработки. – М. : НИИ Маш, 1965. – 75 с.
12. 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.
13. Чечурин С.Л., Закарян Г.А. Математическая модель процесса электроконтактной резки // Электронная обработка материалов. – 1990. – № 3 (153). – С. 3–6.
14. Патент РФ № 2003111656/20, 24.04.2003. Шестаков И.Я., Душкин В.И., Миленин В.Н., Терехин Н.А., Цуканов А.В. Ручная отрезная машина // Патент России № 32019.2003. Бюл. № 25.
15. Тимофеев Е.Н., Шестаков И.Я. Исследование адгезии при электроконтактной обработке // Системы. Методы. Технологии. – № 1 (65). – С. 39–45.
16. Патент РФ № 2005139775/02, 19.12.2005. Шестаков И.Я., Милетин В.Н., Цуканов А.В. Способ электроконтактной обработки металлических материалов // Патент России № 2296653.2007. Бюл. № – 10.
17. Беляев Н.М. Сопrotивление материалов / Н.М. Беляев. – М. : Альянс, 2015. – 608 с.
18. Ануриев В.И. Справочник конструктора-машиностроителя. Т. 1. – 8-е изд., перераб. и доп. – М. : Машиностроение, 2001. – 920с.

19. Коршунов Б.С. Электроабразивные и электролитические способы обработки труднообрабатываемых материалов. – М. : Машиностроение, 1969. – 212 с.
20. Артамонов Б.А., Вишницкий А.Л., Волков Ю.С. Размерная электрическая обработка. – М. : Высшая школа, 1978. – 336 с.
21. 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.
10. Semenov, V.N., Foteev, N.K. Nekotory`e voprosy` metodiki issledovaniya e`lektrokontaktnoj rezki // E`lektronnaya obrabotka materialov. 1984. №.2 (20). – P. 11-15.
11. Shhukin V.D. E`lektroe`rozionnaya obrabotka splavov povy`shennoj tvyordosti // E`lektrofizicheskie i e`lektroximicheskie metody` obrabotki. – М. : NII Mash. 1965. – 75 p.
12. Valyaev A.N., Zajcev A.N., Kareczkij Yu.N. Raschyot temperaturnogo polya diska-instrumenta pri e`lektrokontaktnoj obrabotke metallov. // Tezisy` dokladov vsesoyuznoj nauchno-prakticheskoy konferencii / Kombinirovanny`e e`lektronno-e`lektroximicheskie metody` razmernoj obrabotki metallov. – UFA :UAI. 1983. – P. 37–40.

#### References

1. Veselovskij S.I., Frolov V.Ya., Donskoj A.B. E`lektrodugokontaktnaya rezka metallov. – SPb. : E`nergoatomizdat.1993. – 123 p.
2. Uskov I.V., Belyaev S.V., Gilmanshina T.R. et al. Next-generation technologies of manufacturing of waveguides from aluminum alloys // ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences. – 2016. – Vol. 11, № 21. – P. 12367–12370.
3. Zikeev V.N. Metal Science and Heat Treatment // Metal Science and Heat Treatment. – Vol. 50, № 11–12. – P. 518–521.
4. Illarionov I.E., Bogdanova T.A., Gil`manshina T. R. et al. Technology for Modifying Aluminum Alloys with Ultrafine Silicon // Metallurgist. – 2018. – Vol. 62, № 5–6. – P. 476–481.
5. By`kovskij O.G., Frolov V.A., Peshkov V.V. Svarka i rezka czvetny`x metallov. – М. : INFRA-M, 2016. – 336 s.
6. Vitlin V.B., Davy`dov A.C. E`lektrofizicheskie metody` obrabotki v metallurgicheskom proizvodstve. – М. : Metallurgiya, 1979. – 159 p.
7. Vitlin V.B. Electrocontact-abrasive cutting of semifinished products // Metallurgist. – Vol. 27, № 8. – P. 285–288.
8. Veretnova T.A., Shestakov I.Ya., Czukanov A.V., Kovaleva A.A., Remizov I.A. Issledovanie vliyaniya teploobmennyx processov na udel`ny`e e`nergozatraty` pri e`lektrokontaktnoj rezke metalla // Vestnik sibirskogo gosudarstvennogo ae`rokosmicheskogo universiteta im. Akademika m.f. Reshetneva. – 2009. – № 2 (23). – P. 241–246.
9. Vishniczkij A.L. E`lektroximicheskaya i e`lektromexanicheskaya obrabotka metallov / Vishniczkij A.L., Yasnogorskij I.Z., Grigorichuk I.P. – L. : Mashinostroenie, 1971. – 211 p.
13. Chechurin S.L., Zakaryan G.A. Matematicheskaya model` processa e`lektrokontaktnoj rezki // E`lektronnaya obrabotka materialov. – 1990. – № 3 (153). – P. 3–6.
14. Patent RF № 2003111656/20, 24.04.2003. Shestakov I.Ya., Dushkin V.I., Milenin V.N., Terexin N.A., Czukanov A.V. Ruchnaya otreznaya mashina//Patent Rossii № 32019.2003. – Byul. – № 25.
15. Timofeev E.N., Shestakov I.Ya. Issledovanie adgezii pri e`lektrokontaktnoj obrabotke // Sistemy`. Metody`. Texnologii. – № 1 (65) – P. 39–45.
16. Patent RF № 2005139775/02, 19.12.2005. Shestakov I.Ya., Miletin V.N., Czukanov A.V. Sposob e`lektrokontaktnoj obrabotki metallicheskix materialov//Patent Rossii № 2296653.2007. – Byul. – № 10.
17. Belyaev N.M. Soprotivlenie materialov / N.M. Belyaev. – М. : Al`yans. – 2015. – 608 p.
18. Anur`ev V.I. Spravochnik konstruktora-mashinostroitelya. T.1. – 8-e izd., pererab. i dop. – М. : Mashinostroenie, 2001. – 920 p.
19. Korshunov B.S. E`lektroabrazivny`e i e`lektroliticheskie sposoby` obrabotki trudnoobrabaty`vaemy`x materialov. – М. : Mashinostroenie. 1969. – 212 p.
20. Artamonov B.A., Vishniczkij A.L., Volkov Yu.S. Razmernaya e`lektricheskaya obrabotka. – М. : Vy`sshaya shkola. – 1978. – 336 p.
21. Shestakov I.Ya., Shestakov V.I., Remizov I.A. Koe`fficient e`rozii pri e`lektro-kontaktnoj obrabotke metallov // Sibirskij ae`rokosmicheskij zhurnal. – 2022. – № 2 (23). – P. 337–346.