

УДК 621.9.048

Doi: 10.31772/2712-8970-2022-23-2-337-346

Для цитирования: Шестаков И. Я., Шестаков В. И., Ремизов И. А. Коэффициент эрозии при электроконтактной обработке металлов // Сибирский аэрокосмический журнал. 2022. Т. 23, № 2. С. 337–346. Doi: 10.31772/2712-8970-2022-23-2-337-346.

For citation: Shestakov I. Ya., Shestakov V. I., Remizov I. A. [Erosion coefficient in electric contact processing of metals]. *Aerospace Journal*. 2022, Vol. 23, No. 2, P. 337–346. Doi: 10.31772/2712-8970-2022-23-2-337-346.

Коэффициент эрозии при электро-контактной обработке металлов

И. Я. Шестаков^{1*}, В. И. Шестаков¹, И. А. Ремизов²

¹Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский Рабочий», 31

²Красноярский государственный медицинский университет имени профессора В. Ф. Войно-Ясенецкого
Российская Федерация, 660022, г. Красноярск, ул. Партизана Железняка, 1

*E-mail: yakovlevish@mail.ru

В производстве ракетно-космической техники используются труднообрабатываемые стали и сплавы традиционными методами. Поэтому применяются электрические способы обработки деталей, использующие разновидности термического воздействия электрического тока непосредственно в процессе удаления слоя материала. В технологии размерной электрообработки возрастает роль электроэрозионных методов, которые находят все большее применение во всех отраслях машиностроения как наиболее эффективные, а зачастую, и как единственно возможные способы обработки деталей из современных высокопрочных и вязких конструкционных материалов. Одним из перспективных методов электрообработки металлических заготовок является электроконтактный. Для оценки эффективности этого метода применяется производительность. Проведённый литературный анализ показал, что для оценки производительности используется произведение силы тока на коэффициент, учитывающий режим обработки и материал электродов. В дальнейшем этот коэффициент получил название коэффициента электрической эрозии. Для металлов, используемых в коммутлирующей аппаратуре значение коэффициента, приводится. Однако применять его для расчёта производительности электроконтактной обработки нельзя из-за значительного отличия эрозионных процессов, протекающих в межэлектродном зазоре. По литературным данным произведён расчёт коэффициента эрозии при электроконтактной обработке, результаты представлены в таблице. В нескольких работах указано, что коэффициент эрозии зависит от полярности включения электродов-вращающегося диска и обрабатываемой заготовки. Приведённые данные противоречивы, поэтому были проведены исследования влияния полярности включения на коэффициент эрозии. При одинаковой марке обрабатываемого материала и вращающегося диска полярность включения не имеет значения. Выявлено, что для стали марки Ст3 коэффициент эрозии зависит от напряжения на электродах и при приближении к напряжению дугообразования резко возрастает независимо от полярности включения. Для нержавеющей стали резкое увеличение коэффициента эрозии наблюдается только при прямой полярности включения.

Ключевые слова: электроконтактная обработка, производительность, коэффициент эрозии, напряжение на электродах, полярность включения.

Erosion coefficient in electric contact processing of metals

I. Ya. Shestakov^{1*}, V. I. Shestakov¹, I. A. Remizov²

¹Reshetnev Siberian State University of Science and Technology
31, Krasnoyarskii Rabochi prospekt, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation

²Prof. V. F. Voino-Yasenetsky Krasnoyarsk State Medical University
1, Partizan Zheleznaya St., Krasnoyarsk, 660022, Russian Federation

*E-mail: yakovlevish@mail.ru

In the production of rocket and space technology, difficult-to-machine steels and alloys are used by traditional methods. Therefore, electrical methods for processing parts are used that use a variety of thermal effects of an electric current directly in the process of removing a layer of material. In the technology of dimensional electrical processing, the role of electroerosive methods is increasing, which are increasingly used in all branches of mechanical engineering as the most effective, and often, and as the only possible ways of processing parts made of modern high-strength and viscous structural materials. One of the most promising methods of electrical processing of metal blanks is electrocontact. Performance is applied to evaluate the effectiveness of this method. The carried out literary analysis showed that the product of the current strength and the coefficient taking into account the processing mode and the material of the electrodes is used to assess the productivity. Later, this coefficient was called the coefficient of electrical erosion. For metals used in switching equipment, the value of the coefficient is given. However, it cannot be used to calculate the performance of electrical contact processing due to the significant difference in erosion processes occurring in the interelectrode gap. According to the literature data, the erosion coefficient was calculated during electrical contact processing, the results are presented in the table. In several works it is indicated that the erosion coefficient depends on the polarity of the inclusion of the rotating disk electrodes and the workpiece being processed. The data presented are contradictory; therefore, studies were carried out on the influence of the inclusion polarity on the erosion coefficient. With the same grade of the processed material and the rotating disc, the polarity of the inclusion does not matter. It was revealed that for steel grade St.3 the erosion coefficient depends on the voltage on the electrodes and, when approaching the arcing voltage, increases sharply, regardless of the polarity of the inclusion. For stainless steel, a sharp increase in the erosion coefficient is observed only at the straight polarity of the inclusion.

Keywords: electrical contact processing, productivity, erosion coefficient, voltage across the electrodes, polarity of inclusion.

Введение

Тенденции современного развития и повышения технического уровня авиакосмической техники связаны с непрерывным улучшением эксплуатационных характеристик применяемых материалов – их прочности, твердости, ударной вязкости, жаропрочности, стойкости к коррозионным средам и т. д. В свою очередь появление новых видов материалов, обладающих специфическими физико-механическими свойствами и, как следствие, характеризующихся трудностью их обработки традиционными методами, обуславливает актуальность создания и широкого внедрения в промышленность новых эффективных технологических процессов, основанных на фундаментальных достижениях современной науки и техники. Одним из приоритетных направлений, существенно расширяющих технологические возможности процесса обработки деталей, изготавливаемых из сталей и сплавов, обладающих высокими прочностными характеристиками, является использование локального термического воздействия непосредственно на физико-механические свойства обрабатываемого материала, включая изменение его структурных характеристик и агрегатного состояния, так что производительность обработки не зависит от физико-механических свойств обрабатываемого материала, а определяется только его теплофизическими характеристиками. Видное место в этом, успешно развивающемся в последние годы, перспективном направлении занимают электрические способы обработки деталей, ис-

пользующие разновидности термического воздействия электрического тока непосредственно в процессе удаления слоя материала. В технологии размерной электрообработки возрастает роль электроэрозионных методов, которые находят все большее применение во всех отраслях машиностроения как наиболее эффективные, а зачастую, и как единственно возможные способы обработки деталей из современных высокопрочных и вязких конструкционных материалов [1–5]. В этих условиях приобретает актуальность проблема широкого использования потенциальных возможностей электрических методов обработки, и создание на их базе новых эффективных технологических процессов.

Одним из перспективных методов электрообработки металлических заготовок является электроконтактный [6]. По сравнению с другими видами электрообработки металлов электроконтактная имеет ряд преимуществ. Для её реализации не требуются жидкие среды, незначительно изнашивается режущий инструмент и применяется безопасное для работы напряжение на электродах. Обработке подвергается любой электропроводный материал независимо от прочности и твёрдости [7].

Анализ литературных данных

Технологические показатели, принятые за критерии оценки эффективности процесса электроконтактной обработки это: производительность, удельный расход электроэнергии, качество обработанной поверхности (шероховатость, глубина измененного слоя, подвергшегося термическому воздействию, наличие микротрещин на обработанной поверхности) и износ электрод-инструмента. Наиболее важным показателем ЭКО является производительность.

При электроконтактной обработке массовая производительность (m) определяется как масса удалённого (снятого) металла (M) в единицу времени

$$m = M / t,$$

где M – масса снятого (удалённого) металла; t – время обработки.

При электроконтактной обработке в воздушной среде зависимость скорости съёма от среднего тока имеет характер, близкий к линейному, то производительность процесса [1] можно оценивать через силу тока

$$m = kI,$$

где k – коэффициент, учитывающий режим обработки и материал электродов.

При разрезании заготовок производительность

$$m = k_1 I,$$

где $k_1 = k / b$; b – толщина заготовки.

Массовую производительность [8] предлагается определять по формуле

$$m = V_n B b \rho,$$

где V_n – скорость подачи инструмента, см/мин; B – толщина заготовки, см; b – ширина прорези, см; ρ – плотность обрабатываемого материала, г/см³. V_n – выбирают на основе практического опыта.

Теплофизические свойства материала в расчёте не учитываются. Однако скорость подачи инструмента можно рассчитать с учётом теплофизических свойств обрабатываемого материала [5].

В первых работах по электро-контактной обработке [9] для расчёта производительности предлагалось учитывать электрическую и механическую составляющие эрозии в процессе

$$m = M / t = k_{эл} * I + k_{мех} * N / b * g,$$

где $k_{эл}$ и $k_{мех}$ – коэффициенты электрической и механической эрозии; g – ускорение свободного падения; N – механическая мощность в зазоре, которая определяется по формуле

$$N = 2 * \pi * n * P * k_{тр} * r / 60$$

где n – число оборотов дискового инструмента; P – усилие подачи; $k_{тр}$ – коэффициент трения между диском и обрабатываемой заготовкой; r – радиус диска.

Усилие подачи определяется расчётным путём [10], величина $k_{тр}$ не определяемая, так как неизвестно состояние материала заготовки и инструмента в зоне контакта. Коэффициенты эрозии могут быть определены только экспериментальным путём. Учитывая тот факт, что наибольшее использование получила ЭКО в режиме оплавления, т. е. когда механическая эрозия незначительна (менее 5 %), в дальнейшем рассматривается только электрическая эрозия.

С электрической эрозией столкнулись специалисты в области коммутирующей аппаратуры для материалов контактов. В справочнике [11] рассматриваются механические, электрические, теплофизические свойства контактных материалов. Однако количественные эрозионные характеристики не представлены. Наиболее полные свойства контактных материалов имеются в справочнике [12]. Так, для железа коэффициент эрозии $k_{эп} = 0,006 \text{ мм}^3/\text{А} \cdot \text{с}$.

В работах [13; 14] исследовалась связь между теплосодержанием, физико-механическими и эрозионными характеристиками металлов. Основные выводы из работ:

- физико-механические и эрозионные характеристики металлов определяются энергией связи между атомами в узлах кристаллической решетки. Энергия связи между атомами изменяется с изменением теплосодержания (энтальпии) единицы объема металла;
- с целью выявления закономерностей поведения металла при различных физических процессах необходимо свойства металла определять на единицу объема (мм^3 , см^3 и т. д.);
- зависимость, связывающая величину межатомного взаимодействия с физико-механическими и эрозионными свойствами веществ, представляет ряд элементов, последовательно расположенных по мере изменения теплосодержания, обусловленный монотонным возрастанием энергии связи атомов в конденсированной фазе независимо от типа химической связи и кристаллического состояния веществ.

Коэффициент электрической эрозии на единицу объема обрабатываемого металла при электроэрозионно-химической обработке рассмотрен в работе [15].

Производительность обработки при копировально-прошивочных операциях оценивается суммой скоростей электроэрозионной и электрохимической обработок

$$V = V_{эп} + V_{эх} = k_{эп} \cdot i_{эп} + k_{эх} \cdot i_{эх}.$$

В этом уравнении коэффициент эрозии $k_{эп}$ определяется:

$$k_{эп} = 0,4 \cdot U \cdot 60 / (Q \cdot d + 2,2 [k / P_{оп}] \cdot \Pi), \text{ мм}^3/\text{А} \cdot \text{мин},$$

где d – плотность обрабатываемого металла; k – эмпирический коэффициент; $P_{оп}$ – оптимальное значение мощности, соответствующее максимальному съёму материала на единицу тока.

Значения k и $P_{оп}$ нужно определять экспериментально, поэтому коэффициент эрозии не рассчитывать. В работе приводится значение коэффициента эрозии железа при электроэрозионно-химической обработке $k_{эп} = 20 \text{ мм}^3 / \text{А} \cdot \text{мин}$, что составит $0,333 \text{ мм}^3/\text{А} \cdot \text{с}$.

При электроэрозионной обработке для расчёта производительности используют коэффициент равный объёму металла, снимаемого одним или несколькими импульсами с суммарной энергией 1 Дж [16]. Этот коэффициент зависит от вида и состояния рабочей среды, её прокачки, материалов и размеров электродов, характеристики импульсов и находят его экспериментально. Если значение этого коэффициента умножить на напряжение, то получается коэффициент эрозии.

Напряжение на электродах при электроэрозионной обработке находится в диапазоне (20–50) В [17]. При таком напряжении $k_{эп} = (0,0033–0,008) \text{ мм}^3/\text{А} \cdot \text{с}$. Малое значение коэффициента эрозии вызывает сомнение в правильности определения объема металла приходящегося на энергию импульса 1 Дж. Коэффициент эрозии может быть определён по формуле

$$k_{эп} = V / I \cdot 60,$$

где V – объёмная производительность, $\text{мм}^3/\text{мин}$; I – сила тока, А; 60 – переводной коэффициент.

Расчёт по вышеприведённой формуле по данным из справочника [17] показал, что с увеличением частоты импульсов от 1 до 440 кГц коэффициент эрозии уменьшается в 5–7 раз (с 0,11 до 0,016 мм³/А*с.). Это можно объяснить тем, что рабочая среда не успевает восстановить свои свойства и большая часть электрических импульсов не приводит к пробое межэлектродного промежутка.

При электроконтактной обработке вращающимся электродом-инструментом условия эвакуации продуктов обработки улучшаются, поэтому следует ожидать увеличения коэффициента эрозии.

В работе [17] приведена графическая зависимость коэффициента расплавления вращающихся заготовок из стали 113ГЛ от напряжения холостого хода и полярности включения. Размерность указанного коэффициента совпадает с размерностью коэффициента эрозии. Из графика видно, что полярность включения и напряжение холостого хода влияют на величину коэффициента эрозии. За счёт вращения заготовки $k_{эр}$ достигает максимального значения 1 мм³/А*с при напряжении холостого хода 30 В и обратном включении электродов.

В [18] приводятся данные по удельному расходу электроэнергии для ЭКО слитков из коррозионностойких и жаропрочных сталей $q = 0,8 - 1,2$ кВт*ч/кг.

Рассчитать коэффициент эрозии можно по формуле:

$$k_{эр} = U / q * 3600 * r, \quad (1)$$

где U – напряжение, подаваемое на заготовку и вращающийся диск, В; 3600 – коэффициент перевода часов в секунды; r – плотность стали, г/мм³.

При $q = 1$ кВт*ч/кг получим $k_{эр} = 0,854$ мм³/А*с.

При обработке титана достигнута производительность $m = 12,5$ г/с, при этом среднее значение тока I составило 3574 А, тогда коэффициент эрозии будет равен 0,8 мм³/А*с.

При резке заготовок из алюминиевых сплавов среднее значение удельных энергозатрат составляет 2 кВт*ч/кг, при этом рабочее напряжение при ЭКО листа равно 23 В, прибылей – 28 В, тогда коэффициенты эрозии соответственно будут равны 1,18 и 1,4 мм³/А*с.

В работе [19] указано, что удельный расход электроэнергии при электродуго-контактной обработке для сталей различных марок составляет 1,4–1,8 кВт*ч/кг при среднем напряжении 32,5 В. После подстановки в выражение (1) средних значений получим $k_{эр} = 0,717$ мм³/А*с.

Для экспериментального определения коэффициента эрозии при электроконтактной обработке вращающимся дисковым электродом на переменном токе промышленной частоты разработана схема исследований и установка для ручной резки металлов [20]. Для расчёта коэффициента эрозии использовалось выражение:

$$k_{эр} = M / I * \tau, \quad (2)$$

где M – масса снятого металла, г; I – сила тока, А; τ – время, в течение которого проводилось снятие металла, с.

Резке подвергали прокат из стали Ст. 3 в виде трубы и уголка. Для трубы коэффициент эрозии равен 0,2, для уголка – 0,3 мм³/А*с. Низкое значение коэффициента эрозии можно объяснить малой величиной напряжения на электродах. Результаты расчётов коэффициента эрозии по данным из разных источников показаны в табл. 1.

Исследования электроконтактной резки на постоянном токе при прямой полярности включения электродов представлены в работе [21]. По результатам опытов рассчитан объёмный коэффициент эрозии. В табл. 2 представлены теплофизические свойства обрабатываемых материалов: температура плавления ($T_{пл}$), коэффициент теплопроводности (λ), массовая удельная теплоёмкость (c), объёмная удельная теплоёмкость (c') коэффициент эрозии ($k_{эр}$). На основании теплофизических свойств рассчитан критерий Палатника и коэффициент температуропроводности. Критерий Палатника был предложен для оценки эрозионной стойкости металлов

$$\Pi = \lambda * \rho * c * T_{пл}^2.$$

По мнению учёных, этот критерий для некоторых случаев не соответствует действительности [22].

Таблица 1

Коэффициенты эрозии по литературным данным

Источник	Материал	Вид заготовки	Способ определения $k_{эп}$	Коэффициент эрозии $k_{эп}$, мм ³ /А*с
17	Сталь 110Г13Л	Стержень цилиндр.	Из графика	1,0
8	Коррозионно-стойкие и жаропрочные стали	Слитки	Форм. (2)	0,85
8	Титан		Форм. (1)	0,8
18	Алюм. сплав	Лист	Форм. (2)	1,18
19	Стали разных марок		Форм. (2)	0,72
20	Сталь Ст3	Труба	Форм. (2)	0,2
	Сталь Ст3	Уголок	Форм. (2)	0,3

Таблица 2

Теплофизические и электроэрозионные свойства металлов и сплавов

Материал образцов	Теплофизические и электроэрозионные свойства							
	$T_{пл}$, °С	α_{105} , м ² /с	Π^*1014	λ , Вт/(м·К)	ρ , кг/м ³	c , Дж/(кг·К)	c^*106 Дж/м3К	$k_{эп}$, мм ³ /А*с
1. Сталь, Ст3	1540	0,81	5,04	39,71	7800	628	4,9	0,39
2. Сталь нержавеющая 12Х18Н10Т	1510	0,55	8,76	26	7900	598	7,9	0,9
3. Алюминиевый сплав Д16	650	9,84	4,9	238	2696	897	2,4	2,94
4. Медь М1	1084	9,6	25,53	354	8950	412	3,7	0,928
5. Титановый сплав ВТ14	1650	0,34	7,6	8,37	4520	544	2,5	0,984
6. Титан ВТ1	1670	0,77	1,73	18,85	4505	540	2,4	2,06

Методика проведения эксперимента

Для исследования влияния полярности включения электродов на коэффициент эрозии были проведены эксперименты в воздушной среде. Испытания проводились с использованием дискового электрода-инструмента изготовленного из низкоуглеродистой стали диаметром 150 мм и толщиной 1,0 мм. Для вращения электрода-инструмента применялась модернизированная пневматическая радиально-шлифовальная ручная машина ИП2020 [23]. Источником постоянного тока служил сварочный выпрямитель ВДУ-506. Для ЭКО использовали цилиндрические полые образцы (трубы) из углеродистой стали Ст3 и нержавеющей стали 12Х18Н10Т. По результатам испытаний произведён расчёт коэффициента эрозии:

$$k_{эп} = m / I, \quad (3)$$

где m – производительность обработки, г/с; I – сила тока, А.

Результаты исследований

По формуле (3) рассчитан коэффициент эрозии. Значения коэффициента эрозии в зависимости от напряжения и полярности представлены на рис. 1 и 2. В диапазоне тока от 50 до 175 А значение $k_{эп} = (0,7-0,80)$ мм³/А*с. При электроконтактной резке труб из нержавеющей стали

коэффициент эрозии при прямой полярности равен (0,90–1,0) мм³/А*с, при обратной – (0,71–0,83) мм³/А*с, что совпадает с данными табл. 1 и 2.

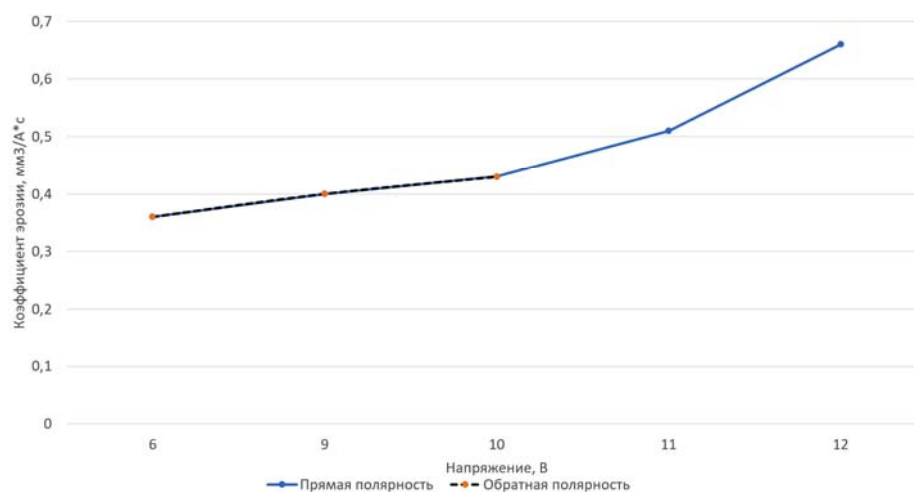


Рис. 1. Зависимость коэффициента эрозии стальной трубы (Ст3) от напряжения и полярности включения

Fig. 1. Dependence of the erosion coefficient of a steel pipe (steel 3) on the voltage and polarity of switching on

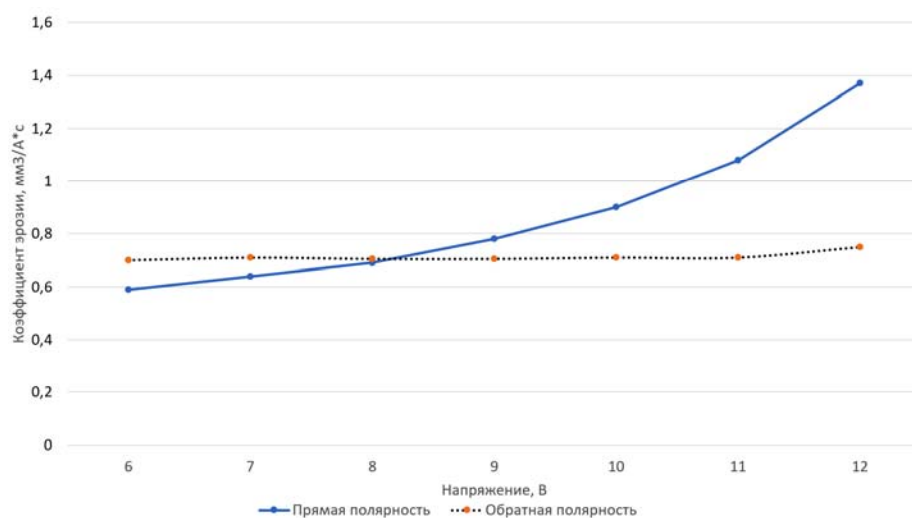


Рис. 2. Зависимость коэффициента эрозии стальной трубы (12X18H10T) от напряжения и полярности включения

Fig. 2. Dependence of the erosion coefficient of a steel pipe (12X18H10T) on the voltage and polarity of switching on

Заключение

1. Полярность включения электродов, изготовленных из материала одной марки не влияет на коэффициент эрозии при электроконтактной обработке сталей.
2. Изменение силы тока практически не влияет на коэффициент эрозии.
3. У меди максимальное значение критерия Палатника, однако коэффициент эрозии близок к нержавеющей стали.
4. При прямой полярности включения коэффициент эрозии в значительной степени определяется напряжением подаваемым на электроды.

5. Коэффициент эрозии зависит от объёмной теплоёмкости обрабатываемого металла.
6. Малое значение коэффициента эрозии титанового сплава BT14 по сравнению с титаном BT1 можно объяснить наличием легирующих компонентов в количестве 12 %.

Библиографические ссылки

1. Справочник технолога-машиностроителя : в 2 т. Т. 2 / под ред. А. М. Дальского, А. Г. Сулова, А. Г. Косиловой, Р. К. Мещерякова. 5-е изд., испр. М. : Машиностроение, 2003. 944 с.
2. Исследование влияния теплообменных процессов на удельные энергозатраты при электроконтактной резке металла / Т. А. Веретнова, И. Я. Шестаков, А. В. Цуканов и др. // Вестник СибГАУ. 2009. № 2. С. 241–246.
3. Zikeev V. N. Métal Science and Heat Treatment // Scientific contribution of A. P. Gulyaev to the physical metallurgy of structural steels. 2008. Vol. 50, No. 11–12, P. 518–521.
4. Vitlin V. B. Metallurgist // Electrocontact-abrasive cutting of semifinished products. Vol. 27. № 8. P. 285–288.
5. Modeling of Heat Exchange Processes under Electrocontact Cutting of Metals / Veretnova T. A., Shestakov I. Ya., Kovaleva A. A. et al. // Журнал Сибирского федерального университета. Серия: «Техника и технологии». 2013. № 4. С. 455–461.
6. Муравьев Д. В. Перспективы применения контактно-дуговой резки и обработки металлов в промышленности // Сварочное производство. 2001. № 8. С. 33–35.
7. Повышение эффективности электроконтактной резки металла путем применения системы управления / Веретнова Т. А., Царенко А. А., Веретнов А. Г., Шестаков И. Я. // Цветные металлы. 2019. № 9. С. 69–74.
8. Витлин В. Б., Давыдов А. С. Электро-физико-химические методы обработки в металлургическом производстве. М. : Металлургия, 1988. 127 с.
9. Гуткин Б. Г., Григорчук И. П. Электроконтактная обработка металлов. Л. : Машгиз, 1960. 51 с.
10. Пат. 2296653 Российская Федерация, МПК В23Н 5/04. Способ электроконтактной обработки металлических материалов / Шестаков И. Я., Миленин В. Н., Цуканов А. В., № 2005139775/02 ; заявл. 05.01.2001 ; опубл. 10.04.2007. Бюл. №10. 7с.
11. Электротехнический справочник : в 4 т. Т. 1 Общие вопросы. Электротехнические материалы / под общ. ред. профессоров МЭИ В. Г. Герасимова и др. 9-е изд., стер. М. : Издательство МЭИ, 2003. 440 с.
12. Материалы в приборостроении и автоматике : справочник / под ред. Ю. М. Пятина. 2-е изд., перераб. и доп. М. : Машиностроение, 1982. 528 с.
13. Волченкова Р. А. Связь между теплосодержанием и физико-механическими и эрозионными характеристиками металлов // Электронная обработка материалов. 1973. № 4. С. 58–62.
14. Волченкова Р. А. Об эрозионном ряде элементов // Электронная обработка материалов. 1976. № 2. С. 45–48.
15. Аронов А. И., Исакова Р. Б., Мороз И. И. Электроэрозионно-химический способ обработки // Электрохимическая размерная обработка металлов. Кишинёв : Штиинца, 1974. 260 с.
16. Немилов Е. Ф. Справочник по электроэрозионной обработке материалов. Л. : Машиностроение, 1989. 164 с.
17. Справочник по электрофизическим и электрохимическим методам обработки / Г. Л. Ами-тан и др. ; под общ. ред. Волосатого, В. А. Л. : Машиностроение, 1988. 719 с.
18. Витлин В. Б., Давыдов А. С. Электрофизические методы обработки в металлургическом производстве. М. : Металлургия, 1979. 160 с.
19. Веселовский С. И., Фролов В. Я., Донской А. В. Электродугоконтактная резка металлов. СПб. : Энергоатомиздат, 1993. 123 с.
20. Повышение эффективности электроконтактной резки дисковым электродом / Н. А. Терёхин, В. И. Душкин, И. Я. Шестаков, В. Н. Миленин // Технология машиностроения. 2002. № 4. С. 9–12.

21. Оценка влияния процессов теплообмена на технологические показатели электроконтактной резки / А. Г. Веретнов, Т. А. Веретнова, И. Я. Шестаков, А. А. Косович // Успехи современного естествознания. 2013. № 11. С. 157–162.
22. Верхотуров А. Д., Подчерняева И. А., Коневцов Л. А. Самсонов Г. В. и Лазаренко Б. Р. – основатели нового научного направления “Материаловедение электродных материалов для электроэрозионной обработки” // Электрические контакты и электроды. Киев : ИПМ НАН Украины. 2010. С. 274–287.
23. Пат. 32019 Российская Федерация, МПК В23Н 5/04 Ручная отрезная машина. / Н. А. Терёхин, В. И. Душкин, И. Я. Шестаков, В. Н. Миленин, А. В. Цуканов. № 2003111656/20 ; заявл. 24.04.2003 ; опубл. 10.09.2003, Бюл. № 13, 5 с.

References

1. *Spravochnik tehnologa-mashinostroitelya* [Handbook of a mechanical engineer]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2003, 944 p.
2. 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 electrocontact metal cutting]. *Vestnik SibGAU*. 2009, No. 2, P. 241–246 (In Russ.).
3. Zikeev V. N. Métal Science and Heat Treatment. *Scientific contribution of A. P. Gulyaev to the physical metallurgy of structural steels*. 2008. Vol. 50, No. 11–12, P. 518–521.
4. Vitlin V. B. Metallurgist. *Electrocontact-abrasive cutting of semifinished products*. Vol. 27. No. 8. P. 285–288.
5. Veretnova T. A., Shestakov I. Ya., Kovaleva A. A., Tinkova S. M., Kosovich A. A. Modeling of Heat Exchange Processes under Electrocontact Cutting of Metals. *Journal of Siberian Federal University. Series: "Engineering and Technology"*. 2013, No. 4, P. 455–461.
6. Muraviev D. V. [Prospects for the use of contact-arc cutting and metal processing in industry]. *Welding production*, 2001, No. 8, P. 33–35 (In Russ.).
7. Veretnova T. A., Tsarenko A. A., Veretnov A. G., Shestakov I. Ya. [Improving the efficiency of electrocontact metal cutting by using a control system]. *Non-ferrous metals*. 2019, No. 9, P. 69–74 (In Russ.).
8. Vitlin V. B., Davydov A. S. *Elektro-fiziko-khichieskie metodi obrabotki v metalurgicheskoy proizvodstve* [Electro-physical-chemical processing methods in metallurgical production]. Moscow, Metallurgy Publ., 1988, 127 p.
9. Gutkin B. G., Grigorchuk I. P. *Elektrokontaktnaya obrabotka metalov* [Electrical contact processing of metals]. Leningrad, Mashgiz Publ., 1960, 51 p.
10. Shestakov I. Ya., Milenin V. N., Tsukanov A. V. *Sposob elektrokontaktnoy obrabotki metalicheskikh materialov* [Method for electrocontact processing of metallic materials]. Patent RF, no. 2296653, 2007.
11. Gerasimov V. G. *Elektrotehnicheskii spravochnik. Vol. 1. Elektrotehnicheskie materialy* [Electrotechnical reference book. Vol. 1. General questions. Electrical materials]. Moscow, MEI Publ., 2003, 440 p.
12. Pyatin Yu. M., Chernyavskaya A. M., Vladimirovskiy R. A. *Materialy v priborostroenii i avtomatike: spravochnik* [Materials in instrument making and automation: Handbook]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1982, 528 p.
13. Volchenkova R. A. [The relationship between the heat content and the physicomachanical and erosional characteristics of metals]. *Electronic processing of materials*. 1973, No. 4, P. 58–62 (In Russ.).
14. Volchenkova R. A. [On the erosional series of elements]. *Electronic processing of materials*. 1976, No. 2, P. 45–48 (In Russ.).

15. Aronov A. I., Isakova R. B., Moroz I. I. [Electro-erosion-chemical method of processing]. *Electrochemical dimensional processing of metals: sbornik nauch. materialov*. Chisinau, Shtiintsa, 1974, P. 124–131 (In Russ.).
16. Nemilov E. F. *Spravochnik po elektrjerozionnoi obrabotke materialov* [Handbook of EDM materials]. Leningrad, Mashinostroenie Publ., 1989, 164 p.
17. Amitan G. L., Baiisupov I. A., Baron Yu. M. *Spravochnik po elektrohimicheskim i elektrofizicheskim metodam obrabotki* [Reference book on electrophysical and electrochemical processing methods]. Leningrad, Mashinostroenie Publ., 1988, 719 p.
18. Vitlin V. B., Davydov A. S. *Elektrofizicheskie metody v metallurgicheskom proizvodstve* [Electrophysical processing methods in metallurgical production]. Moscow, Metallurgy Publ., 1979, 160 p.
19. Veselovsky S. I., Frolov V. Ya., Donskoy A. V. *Elektrodugokontaktnaya rezka metallov* [Electric arc contact cutting of metals]. Sankt-Peterburg, Energoatomizdat Publ., 1993, 123 p.
20. Terekhin N. A., Dushkin V. I., Shestakov I. Ya., Milenin V. N. [Improving the efficiency of electrocontact cutting with a disk electrode]. *Mechanical engineering technology*. 2002, No 4, P. 9–12 (In Russ.).
21. Veretnov A. G., Veretnova T. A., Shestakov I. Ya., Kosovich A. A. [Assessment of the influence of heat transfer processes on the technological indicators of electrocontact cutting]. *The successes of modern natural science*. 2013, No. 11, P. 157–162 (In Russ.).
22. Verkhoturov A. D., Podchernyaeva I. A., Konevtsov L. A. [Samsonov G. V. and Lazarenko B. R. Founders of a new scientific direction 'Materials science of electrode materials for electrical discharge machining']. *Electrical contacts and electrodes*. Kiev, IPM NAS of Ukraine, 2010, P. 274–287 (In Russ.).
23. Teryokhin N. A., Dushkin V. I., Shestakov I. Ya., Milenin V. N., Tsukanov A. V. *Ruchnaya otreznaya mashina* [Manual cutting machine]. Patent RF, no. 32019, 2003.

© Шестаков И. Я., Шестаков В. И., Ремизов И. А., 2022

Шестаков Иван Яковлевич – доктор технических наук, доцент, профессор кафедры электронной техники и телекоммуникаций; Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: yakovlevish@mail.ru.

Шестаков Владислав Иванович – магистрант кафедры технологии машиностроения; Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: pn3vm4t@gmail.com.

Ремизов Игорь Анатольевич – кандидат физико-математических наук, доцент кафедры медицинской и биологической физики; Красноярский государственный медицинский университет имени профессора В. Ф. Войно-Ясенецкого. E-mail: rector@krsk.info.

Shestakov Ivan Yakovlevich – Dr. Sc., Associate Professor, Professor of the Department of Electronic Engineering and Telecommunications; Reshetnev Siberian State University of Science and Technology. E-mail: yakovlevish@mail.ru.

Shestakov Vladislav Ivanovich – undergraduate of the Department of Mechanical Engineering Technology; Reshetnev Siberian State University of Science and Technology. E-mail: pn3vm4t@gmail.com.

Remizov Igor Anatolyevich – Cand. Sc., Associate Professor of the Department of Medical and Biological Physics; Prof. V. F. Voyno-Yasenetsky Krasnoyarsk State Medical University. E-mail: rector@krsk.info.
