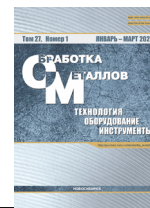




Обработка металлов (технология • оборудование • инструменты)

Сайт журнала: http://journals.nstu.ru/obrabotka_metallov



Разработка устройства для исследования и моделирования процесса электрохимического шлифования

Михаил Борисов^{1, а}, Дмитрий Лобанов^{1, в, *}, Вадим Скиба^{2, с}, Оксана Надеждина^{1, д}

¹ Чувашский государственный университет им. И.Н. Ульянова, Московский пр-т, 15, г. Чебоксары, 428015, Россия

² Новосибирский государственный технический университет, пр. К. Маркса, 20, г. Новосибирск, 630073, Россия

^а <https://orcid.org/0000-0001-9084-1820>, borisovmgou@mail.ru; ^в <https://orcid.org/0000-0002-4273-5107>, lobanovdv@list.ru;

^с <https://orcid.org/0000-0002-8242-2295>, skeeba_vadim@mail.ru; ^д <https://orcid.org/0009-0006-3656-394X>, nadezhkina_oksana@mail.ru

ИНФОРМАЦИЯ О СТАТЬЕ

УДК 621.9.047

История статьи:

Поступила: 26 ноября 2024

Рецензирование: 12 декабря 2024

Принята к печати: 28 декабря 2024

Доступно онлайн: 15 марта 2025

Ключевые слова:

Электрохимическое шлифование

Комбинированная обработка

Моделирование

Абразивный инструмент

Гибридная технология

Финансирование

Работа выполнена при финансовой поддержке в рамках Тематического плана НИР НГТУ по проекту ТП-ПТМ-1_25.

Благодарности

Исследования выполнены на оборудовании ИЦ «Проектирование и производство высокотехнологичного оборудования» и ЦКП «Структура, механические и физические свойства материалов».

АННОТАЦИЯ

Введение. При изготовлении ответственных деталей из высокопрочных и труднообрабатываемых сталей в различных отраслях промышленности окончательное качество обычно формируется на операциях финишной обработки. Эффективность процесса значительно выше при использовании комбинированных, гибридных методов воздействия на обрабатываемую поверхность. При обработке некоторых фасонных деталей сложной формы больше внимания на финишных операциях, как правило, уделяется уменьшению шероховатости с соблюдением ранее достигнутых показателей размерной точности. Для этого зачастую используют абразивные инструменты на жесткой основе, размещая их в менее жесткой технологической системе. Для повышения эффективности процесса необходимо установить оптимальные режимы механической и электрохимической обработки деталей. При отсутствии возможности использования на начальном этапе промышленного оборудования для гибридных технологий, с учетом необходимости проведения модернизации имеющегося технологического оборудования для осуществления процесса электрохимического шлифования, целесообразно исследование указанного процесса производить путем его моделирования на устройствах-имитаторах. **Цель работы:** разработка устройства для исследования и моделирования процесса электрохимического шлифования токопроводящих деталей абразивными головками на металлической связке. **Методика исследований.** Для моделирования процесса электрохимического шлифования токопроводящих деталей абразивными головками на металлической связке нами было разработано специальное устройство. Оно позволяет производить базирование заготовки, инструмента, реализовывать процесс электрохимического шлифования, его кинематические и электрические условия – главное движение, линейное перемещение рабочих органов, механические и электрические режимы, а также позволяет обеспечить необходимые условия для реализации технологии и реализовать систему управления. **Результаты и обсуждение.** Для определения влияния механических режимов резания на шероховатость обработанной поверхности образца детали, изготовленного из коррозионно-стойкой стали 12Х18Н10Т, проведены эмпирические исследования на спроектированном устройстве. Планирование и обработка результатов экспериментов выполнялись с использованием стандартной методики подготовки и проведения полного факторного эксперимента. Полученная модель позволяет определить рациональные механические режимы резания и оценить их влияние на качество обрабатываемой поверхности.

Для цитирования: Разработка устройства для исследования и моделирования процесса электрохимического шлифования / М.А. Борисов, Д.В. Лобанов, В.Ю. Скиба, О.А. Надеждина // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2025. – Т. 27, № 1. – С. 93–105. – DOI: 10.17212/1994-6309-2025-27.1-93-105.

Введение

При изготовлении ответственных деталей из высокопрочных и труднообрабатываемых сталей в различных отраслях промышленности окончательное качество формируется, как правило, на операциях финишной обработки. Зачастую такие детали функционируют в специфичных условиях их эксплуатации. Учитывая это обстоя-

*Адрес для переписки

Лобанов Дмитрий Владимирович, д.т.н., доцент
Чувашский государственный университет имени И.Н. Ульянова,
пр. Московский, 15,
428015, г. Чебоксары, Россия
Тел.: +7 908-303-47-45, e-mail: lobanovdv@list.ru

ятельство, детали изготавливают из труднообрабатываемых коррозионно-стойких и жаропрочных сталей и сплавов на основе титана и никеля. При наличии требования минимизации массы изделий многие детали являются тонкостенными и сложнопрофильными.

На финальном этапе технологического процесса механической обработки для достижения требуемого качества обрабатываемых поверхностей необходимо минимизировать силовые и тепловые процессы в контактной зоне между заготовкой и абразивным инструментом.

Такие требования накладывают ограничения на выбор методов и условий финишной обработки. Эффективность процесса значительно выше при использовании комбинированных, гибридных методов воздействия на обрабатываемую поверхность [1–19].

При обработке некоторых фасонных деталей сложной формы больше внимания на финишных операциях, как правило, уделяется уменьшению шероховатости с соблюдением ранее достигнутых показателей размерной точности. Для этого зачастую используют абразивные инструменты на жесткой основе (абразивные головки на металлической связке), размещая их в менее жесткой технологической системе.

Правка инструмента может осуществляться электрохимическим способом непрерывно с использованием дополнительной электрической цепи или без ее использования периодически. Подача чередующихся с определенным интервалом импульсов тока обратной полярности производится непосредственно в рабочую цепь. Для повышения эффективности процесса необходимо установить оптимальные режимы механической и электрохимической обработки деталей [20–27]. При отсутствии возможности использования на начальном этапе промышленного оборудования для гибридных технологий, с учетом необходимости проведения модернизации имеющегося технологического оборудования для осуществления процесса электрохимического шлифования, целесообразно исследование указанного процесса производить путем его моделирования на устройствах-имитаторах [28–31].

Цель работы состоит в разработке устройства для исследования и моделирования про-

цесса электрохимического шлифования токопроводящих деталей абразивными головками на металлической связке.

Для достижения поставленной цели были сформулированы следующие **задачи**.

1. На основе моделирования выявить рабочие параметры исследуемой системы и применимость устройства для исследования шероховатости обрабатываемых деталей в процессе электрохимического шлифования абразивными головками на металлической связке.

2. Провести эмпирические исследования шероховатости обрабатываемых поверхностей в зависимости от режимов электрохимического шлифования.

3. Обосновать возможность применения разработанного устройства для исследования процесса электрохимического шлифования токопроводящих деталей абразивными головками на металлической связке.

Методика исследований

Для моделирования процесса электрохимического шлифования токопроводящих деталей абразивными головками на металлической связке нами было разработано специальное устройство, структурная схема которого представлена на рис. 1.

Предлагаемое устройство позволяет производить базирование заготовки, инструмента, реализовывать процесс электрохимического шлифования, его кинематические и электрические условия – главное движение, линейное перемещение рабочих органов, механические и электрические режимы, а также позволяет обеспечить необходимые условия для реализации технологии (электролит и его подачу в зону обработки) и реализовать систему управления.

Для определения модели гравера, придающего вращательное движение абразивной головке, и привода линейного перемещения абразивной головки были рассчитаны силы резания и мощность резания. Режимы абразивного шлифования выбраны в соответствии с режимами, которые применялись при исследовании гибридной технологии электрохимической обработки нержавеющей стали 12Х18Н10Т алмазной цилиндрической головкой с диаметром рабочей части

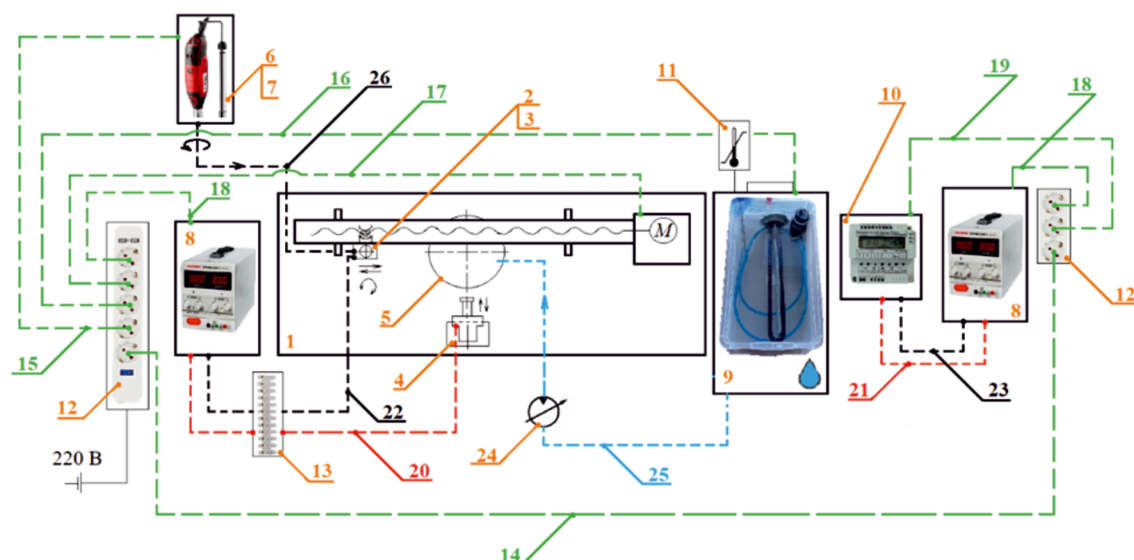


Рис. 1. Структурная схема устройства для моделирования процесса электрохимического шлифования:

1 – корпус устройства; 2 – цанговый механизм гравера; 3 – абразивная головка; 4 – приспособление для закрепления детали; 5 – емкость для электролита; 6 – гравер; 7 – штатив гравера; 8 – источник постоянного тока; 9 – емкость для электролита; 10 – реле времени; 11 – термометр; 12 – сетевой фильтр; 13 – колодка клеммная; 14 – сеть фильтра; 15 – сеть гравера; 16 – сеть электронагревателя; 17 – сеть двигателя привода линейного перемещения; 18 – сеть источника постоянного тока; 19 – сеть реле времени; 20 – сеть для подачи тока на деталь; 21 – сеть источника постоянного тока для реле времени; 22 – сеть для подачи тока на абразивную головку; 23 – сеть для подключения источника постоянного тока к реле времени; 24 – электронасос; 25 – линия подачи электролита; 26 – гибкий вал гравера

Fig. 1. Structural diagram of the device for simulating the electrochemical grinding process:

1 – device housing; 2 – collet mechanism of the engraver; 3 – abrasive head; 4 – part holding device; 5 – container for electrolyte; 6 – engraver; 7 – engraver stand; 8 – DC source; 9 – container for electrolyte; 10 – time relay; 11 – thermometer; 12 – surge protector; 13 – terminal block; 14 – filter electrical network; 15 – engraver electrical network; 16 – electric heater electrical network; 17 – linear motion drive motor electrical network; 18 – DC source electrical network; 19 – time relay electrical network; 20 – electrical network for supplying current to the part; 21 – DC source electrical network for a time relay; 22 – electrical network for supplying current to the abrasive head; 23 – electrical network for connecting a DC source to a time relay; 24 – electric pump; 25 – electrolyte supply line; 26 – flexible engraver shaft

3 мм и диаметром хвостовика 2 мм. Скорость резания от 4,7 до 6,05 м/с, глубина резания от 0,04 до 0,06 мм, продольная подача от 230 до 250 мм/мин [32]. В результате получили максимальные значения мощности резания 0,128 кВт. Дополнительно проведены расчеты деформации инструмента с использованием программного обеспечения ANSYS. Модель с граничными условиями для исследования приведена на рис. 2.

В табл. 1 приведены примеры расчета. Деформация инструмента составила от 0,14 до 0,23 мм.

На рис. 3 представлен общий вид привода линейного перемещения рабочего органа. Он служит для обеспечения продольной подачи ин-

струмента и состоит из двигателя постоянного тока, передачи «винт – гайка» и ползуна.

В табл. 2 приведены технические характеристики привода линейного перемещения.

Для придания главного движения резания абразивной головке используется гравер «Зубр 3Г-160ЭК», его технические характеристики приведены в табл. 3.

Для установки абразивной головки используется модернизированный под комбинированную технологию цанговый патрон, а для установки обрабатываемого образца – специальная оснастка, позволяющая реализовать поперечную подачу образца. Внешний вид рабочей зоны установки показан на рис. 4.

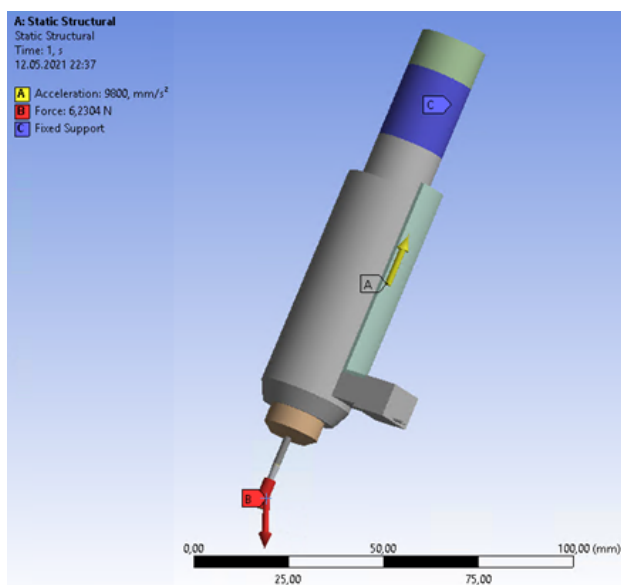


Рис. 2. Модель деформации инструмента с граничными условиями для исследования

Fig. 2. Tool deformation model with boundary conditions for analysis

Таблица 1

Table 1

Результаты расчета деформации инструмента

Tool deformation calculation results

Режим резания / Cutting mode		Деформация инструмента, мм / Tool deformation, mm		Напряжение сдвига, МПа / Shear stress, MPa
$V = 4,7$ м/с, $t = 0,04$ мм, $S = 230$ мм/мин		0,14844		59,551
$V = 6,05$ м/с, $t = 0,06$ мм, $S = 250$ мм/мин		0,23082		92,426

Рис. 3. Привод линейного перемещения:

$C = 700$ мм, $A = 160$ мм, $S = 500$ мм

Fig. 3. Linear drive:

$C = 700$ мм, $A = 160$ мм, $S = 500$ мм

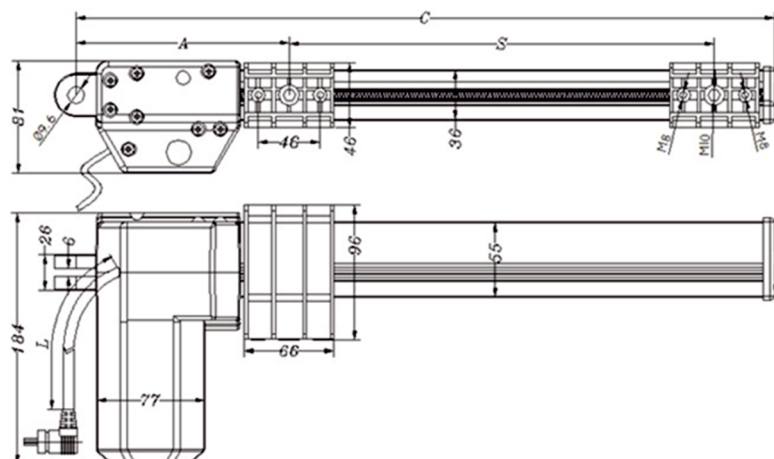


Таблица 2

Table 2

Технические характеристики привода линейного перемещения
Linear drive specifications

Наименование / Name	Значение / Meaning
Входное напряжение, В / Input voltage, V	12
Грузоподъемность, Н / Load capacity, N	1500
Скорость перемещения ползуна минимальная, мм/с / Minimum slider travel speed, mm/s	4
Скорость перемещения ползуна максимальная, мм/с / Maximum slider travel speed, mm/s	36
Ход, мм / Stroke motion, mm	500

Таблица 3

Table 3

Технические характеристики гравера
Engraver specifications

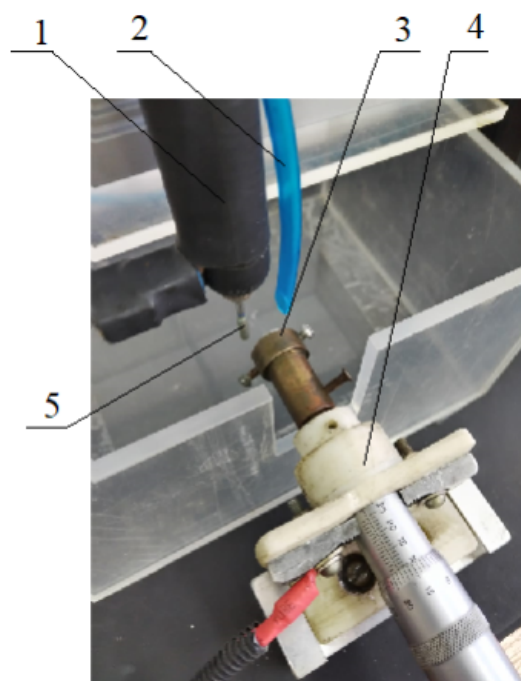
Наименование / Name	Значение / Meaning
Напряжение питания, В / Supply voltage, V	220
Частота, Гц / Frequency, Hz	50
Потребляемая мощность, Вт / Power consumption, W	160
Частота вращения, об/мин / Rotation speed, rpm	15 000...35 000
Диаметр цангового зажима, мм / Collet diameter, mm	2,4; 3,2
Масса, кг / Weight, kg	2,1

Рис. 4. Внешний вид рабочей зоны установки:

1 – модернизированный цанговый патрон; 2 – трубка для подачи электролита; 3 – обрабатываемый образец; 4 – оснастка для базирования и подачи образца; 5 – абразивная головка

Fig. 4. External view of the working area of the installation:

1 – upgraded collet chuck; 2 – electrolyte feed tube; 3 – sample being processed; 4 – sample basing and feed equipment; 5 – abrasive head



Патрон изолирован от гравера. Он устанавливается на ползуне привода движения подачи. Для передачи главного движения от гравера на патрон служит гибкий вал. Для базирования обрабатываемого экспериментального образца и реализации поперечной подачи (глубины резания t) используется специально спроектированная оснастка, изолированная от основного корпуса устройства.

Внешний вид устройства для исследования и моделирования процесса электрохимического шлифования приведен на рис. 5.

Результаты и их обсуждение

Для определения влияния механических режимов резания на шероховатость обработанной поверхности образца детали, изготовленного из коррозионностойкой стали 12Х18Н10Т, проведены эмпирические исследования на спроектированном устройстве. Электрические режимы и условия для реализации экспериментов при исследовании процесса электрохимического шлифования выбирались на основании предварительно проведенных экспериментов [32]:

напряжение на источнике технологического тока 12 В, плотность тока травления $1,5 \text{ А/см}^2$, электролит на водной основе ($\text{NaNO}_3 - 3 \%$, $\text{NaNO}_2 - 1 \%$, $\text{Na}_2\text{CO}_3 - 0,5 \%$).

Планирование и обработка результатов экспериментов проводились с использованием стандартной методики подготовки и проведения полного факторного эксперимента. Исходные данные для планирования и обработка результатов экспериментов представлены в табл. 4.

Полученное в результате обработки экспериментальных данных уравнение регрессии отражает зависимость шероховатости поверхности от механических режимов обработки и имеет следующий вид:

$$Ra = -2,67 + 106,17t - 0,43tS - 19,55tV + 0,013S - 0,004SV + 0,94V + 0,08tSV.$$

Полученная модель позволяет определить рациональные механические режимы резания и оценить их влияние на качество обрабатываемой поверхности. Частные случаи поверхностей отклика системы при постоянных значениях режимов резания в нулевом уровне варьирования приведены на рис. 6–8.

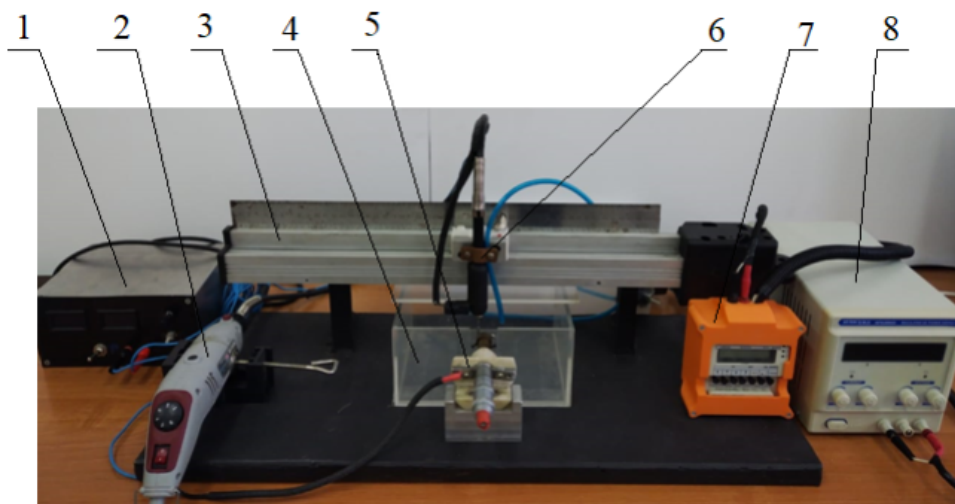


Рис. 5. Внешний вид устройства для исследования и моделирования процесса электрохимического шлифования:

1 – источник тока для электрохимического процесса; 2 – гравер; 3 – привод линейного перемещения; 4 – емкость для электролита; 5 – оснастка для базирования и подачи образца; 6 – модернизированный цанговый патрон; 7 – реле времени; 8 – источник тока для электродвигателя привода линейного перемещения

Fig. 5. External view of the device for studying and simulating the electrochemical grinding process:

1 – current source for electrochemical process; 2 – engraver; 3 – linear drive; 4 – electrolyte container; 5 – sample basing and feeding equipment; 6 – upgraded collet chuck; 7 – time relay; 8 – current source for linear drive electric motor

Исходные данные для планирования и обработка результатов экспериментов

Initial data for planning and processing experimental results

Фактор / Factors	Уровень / Levels			Интервал варьи- рования / Variation interval
	Верхний / Upper $X_i = +1$	Основной (Нулевой) / Primary (Zero) $X_i = 0$	Нижний / Lower $X_i = -1$	
X_1 – глубина резания, t (мм) / X_1 – cutting depth, t (mm)	0,06	0,05	0,04	0,01
X_2 – подача, S (мм/мин) / X_2 – feed rate, S (mm/min)	250	240	230	10
X_3 – скорость резания V (м/с) / X_3 – cutting speed, V (m/s)	6	5	4	1

Рис. 6. Графики влияния подачи и глубины резания на шероховатость R_a обработанной поверхности стали 12X18H10T при $V = 5$ м/с

Fig. 6. Graphs of the influence of feed rate and depth of cut on the surface roughness R_a of the machined 0.12 C-18 Cr-10 Ni-Ti steel at $V = 5$ m/sec

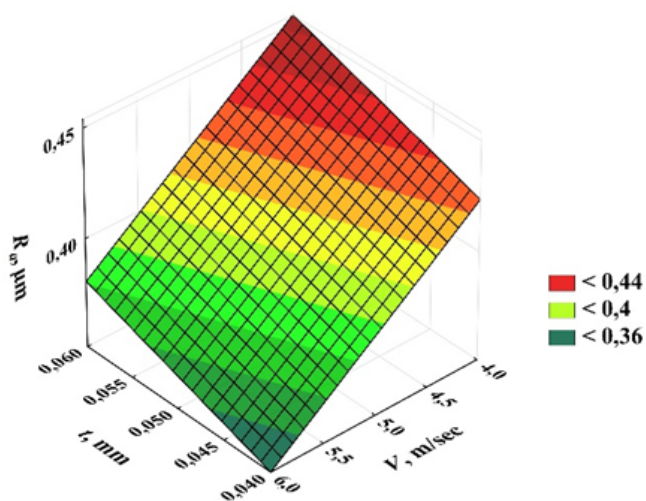
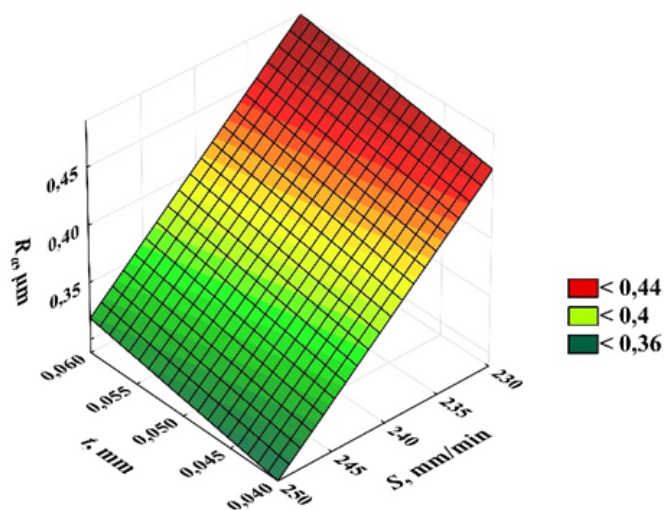


Рис. 7. Графики влияния скорости и глубины резания на шероховатость R_a обработанной поверхности стали 12X18H10T при $S = 240$ мм/мин

Fig. 7. Graphs of the influence of cutting speed and depth of cut on the surface roughness R_a of the machined 0.12 C-18 Cr-10 Ni-Ti steel at $S = 240$ mm/min

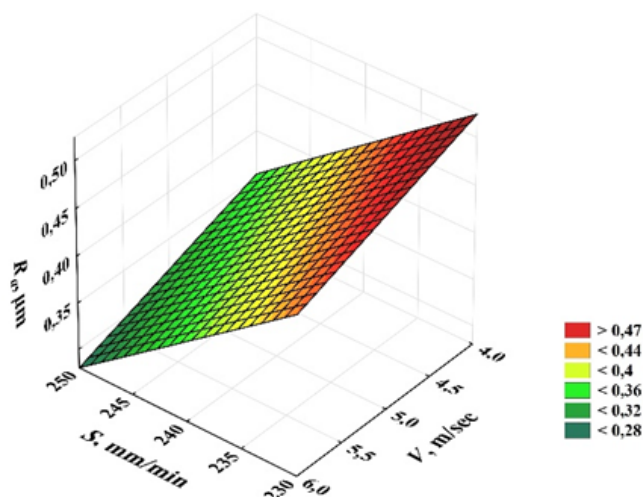


Рис. 8. Графики влияния скорости и подачи на шероховатость R_a обработанной поверхности стали 12X18H10T при $t = 0,05$ мм

Fig. 8. Graphs of the influence of cutting speed and feed rate on the surface roughness R_a of the machined 0.12 C-18 Cr-10 Ni-Ti steel at $t = 0.05$ mm

Полученная модель и поверхности отклика позволяют прогнозировать изменение шероховатости поверхности в зависимости от режимов шлифования и представляют собой эмпирическую модель рассматриваемой системы.

Выводы

1. Расчетами установлено, что при моделировании процесса обработки деталей из нержавеющей стали 12X18H10T диаметром 10 мм алмазной цилиндрической головкой с диаметром рабочей части 3 мм при изменении скорости резания от 4,7 до 6,05 м/с, глубины резания от 0,04 до 0,06 мм и продольной подачи от 230 до 250 мм/мин максимальное значение мощности резания составило 0,128 кВт, а максимальная деформация инструмента – 0,23 мм. Таким образом, разработанное устройство приемлемо для исследования зависимости качественных показателей обработанной поверхности от режимов резания. Для дальнейшего исследования параметров точности обработки жесткость системы следует увеличить.

2. Проведенные с использованием разработанного устройства исследования процесса электрохимического шлифования деталей из нержавеющей стали 12X18H10T диаметром 10 мм алмазной цилиндрической головкой с диаметром рабочей части 3 мм на указанных режимах резания позволили построить эмпирическую модель, позволяющую прогнозировать изменение шероховатости поверхности в зависимости от режимов электрохимического шлифования.

3. Теоретическими расчетами и практически экспериментами подтверждено, что разработанное устройство применимо для исследования и моделирования процесса электрохимического шлифования токопроводящих деталей абразивными головками на металлической связке.

Список литературы

1. Исследование процесса автоматического управления сменой полярности тока в условиях гибридной технологии электрохимической обработки коррозионно-стойких сталей / М.А. Борисов, Д.В. Лобанов, А.С. Янющкин, В.Ю. Скиба // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2020. – Т. 22, № 1. – С. 6–15. – DOI: 10.17212/1994-6309-2020-22.1-6-15.
2. The research into the effect of conditions of combined electric powered diamond processing on cutting power / D.V. Lobanov, P.V. Arkhipov, A.S. Yanyushkin, V.Yu. Skeebea // Key Engineering Materials. – 2017. – Vol. 736. – P. 81–85. – DOI: 10.4028/www.scientific.net/KEM.736.81.
3. Анализ и синтез системы виброизоляции шлифовального станка с учетом эксплуатационной надежности ее элементов / С.М. Братан, А.О. Харченко, Е.А. Владецкая, А.А. Харченко // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2019. – Т. 21, № 1. – С. 35–49. – DOI: 10.17212/1994-6309-2019-21.1-35-49.
4. Kharchenko A., Chasovitina A., Bratan S. Modeling of regularities of change in profile sizes and wear areas of abrasive wheel grains during grinding // Materials Today: Proceedings. – 2021. – Vol. 38 (4). – P. 2088–2091. – DOI: 10.1016/j.matpr.2020.10.154.
5. Nosenko S.V., Nosenko V.A., Kremenetskii L.L. The condition of machined surface of titanium alloy in dry grinding // International Conference on Indus-



trial Engineering, ICIE 2017, Saint-Petersburg, 16–19 May 2017. – St. Petersburg, 2017. – P. 115–120. – DOI: 10.1016/j.proeng.2017.10.446.

6. Analysis of grinding process with the use of field theory / V.V. Gusev, S.I. Roshchupkin, D.A. Moiseev, E.P. Melnikova // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2019. – Vol. 709 (2). – P. 022001. – DOI: 10.1088/1757-899X/709/2/022001.

7. Реченко Д.С. Исследование процесса резания труднообрабатываемых материалов на микроуровне // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2019. – Т. 21, № 2. – С. 18–25. – DOI: 10.17212/1994-6309-2019-21.2-18-25.

8. Ultra-high-speed sharpening and hardening the coating of carbide metal-cutting tools for finishing aircraft parts made of titanium alloys / D.S. Rechenko, A.Y. Popov, Y.V. Titov, D.G. Balova, B.P. Gritsenko // Journal of Physics: Conference Series. – 2019. – Vol. 1260 (6). – P. 062020. – DOI: 10.1088/1742-6596/1260/6/062020.

9. Kozlov A.M., Kozlov A.A. Shaping the surface topology of cylindrical components by means of an abrasive tool // Russian Engineering Research. – 2009. – Vol. 29 (7). – P. 743–746. – DOI: 10.3103/S1068798X09070223.

10. Soler Ya.I., Kazimirov D.Yu. Predicting the supporting area of microrelief in machine parts of variable rigidity during plane grinding // Journal of Machinery Manufacture and Reliability. – 2006. – Vol. 35 (3). – P. 260–265.

11. Study on electrochemical effect in electrochemical grinding of tungsten alloy / L. Niu, Z. Jin, Z. Zhou, Z. Dong, X. Zhu // ISAAT 2018 – 21st International Symposium on Advances in Abrasive Technology, Toronto, 14–16 October 2018. – Toronto, ON, 2018.

12. Братан С.М., Сидоров Д.Е., Богоцкий В.Б. Синтез фильтра Калмана-Бюсси для оценивания состояния операции шлифования // Современные направления и перспективы развития технологий обработки и оборудования в машиностроении: материалы международной научно-технической конференции, Севастополь, 14–15 сентября 2015 года. – Севастополь, 2015. – С. 87–91.

13. Испытательный комплекс на базе прецизионного профилешлифовального станка с ЧПУ CHEVALIER модели smart-B1224 III / В.А. Носенко, Р.А. Белухин, А.В. Фетисов, Л.К. Морозова // Известия Волгоградского государственного технического университета. – 2016. – № 5 (184). – С. 35–39.

14. Гусев В.В., Моисеев Д.А. Оценка параметров рабочей поверхности алмазного шлифовального круга // Прогрессивные технологии и системы машиностроения. – 2017. – № 4 (59). – С. 11–17.

15. Макаров В.Ф., Никитин С.П. Повышение эффективности профильного глубинного шлифова-

ния лопаток турбин на многокоординатных станках с ЧПУ // Наукоемкие технологии в машиностроении. – 2018. – № 4 (82). – С. 21–29.

16. Макаров В.Ф., Жуковский В.А., Бычина Е.Н. Проблемы автоматизации финишной обработки сложнопрофильных поверхностей лопаток ГТД // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2016. – № 8-2. – С. 52–55.

17. Патент № 2215641 С2 Российская Федерация, МПК В24В 49/00, G01L 5/00. Приспособление для измерения малых сил при электроалмазном шлифовании: № 2001116428/28: заявл. 13.06.2001: опубл. 10.11.2003 / А.С. Янюшкин, В.Ю. Попов, А.А. Сурьев, В.В. Янпольский; заявитель Братский государственный технический университет.

18. Патент № 2210749 С2 Российская Федерация, МПК G01L 1/22, G01L 1/00, G01L 5/00. Тензометрическая вставка для измерения малых сил при электроалмазном шлифовании: № 2001116429/28: заявл. 13.06.2001: опубл. 20.08.2003 / А.С. Янюшкин, В.Ю. Попов, А.А. Сурьев, В.В. Янпольский; заявитель Братский государственный технический университет.

19. Носенко В.А., Носенко С.В. Технология шлифования металлов. – 4-е изд., стер. – Старый Оскол: Тонкие наукоемкие технологии, 2022. – 616 с.

20. Influence of the duration of current pulses on the roughness in the combined processing of corrosion steel 12H18N10T / D. Lobanov, M. Borisov, A. Yanyushkin, V. Skeebe // Key Engineering Materials. – 2022. – Vol. 910. – P. 397–402. – DOI: 10.4028/p-gu270a.

21. Zaborski S., Łupak M., Poroś D. Wear of cathode in abrasive electrochemical grinding of hardy machined materials // Journal of Materials Processing Technology. – 2004. – Vol. 149 (1–3). – P. 414–418. – DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2004.02.015.

22. Diamond – ECM grinding of ceramic-metal tungsten / V.A. Mogilnikov, M.Y. Chmir, Y.S. Timofeev, V.S. Poluyanov // Proceedings of the Seventeenth CIRP Conference on Electro Physical and Chemical Machining (ISEM), Leuven, 08–12 April 2013. – Leuven, 2013. – P. 407–409. – DOI: 10.1016/j.procir.2013.03.104.

23. Гусев В.В., Полтавец В.В., Молчанов А.Д. Технологическое обеспечение обработки труднообрабатываемых материалов алмазным шлифованием за счет управления режущей способностью кругов // Инновационные перспективы Донбасса: материалы 5-й Международной научно-практической конференции, Донецк, 21–23 мая 2019 года. Т. 3. – Донецк, 2019. – С. 119–123.

24. Повышение качества абразивного электрохимического шлифования жаропрочных сплавов на никелевой основе / Р.Х. Ганцев, Д.В. Гундеров, В.В. Атрощенко, Л.А. Таймасова, М.В. Ватуев //

Нефтегазовые технологии и новые материалы. Проблемы и решения. – Уфа, 2019. – Вып. 8 (13). – С. 322–326.

25. Жетесова Г.С., Булатов Д.Ж. Определение наиболее оптимальных параметров и условий электромеханической обработки // Труды Университета. – 2014. – № 1 (54). – С. 24–26.

26. Механизм образования защитных пленок на алмазных кругах с металлической связкой / А.С. Янюшкин, О.И. Медведева, П.В. Архипов, В.Ю. Попов // Системы. Методы. Технологии. – 2010. – № 1 (5). – С. 132–138.

27. Попов В.Ю., Янюшкин А.С. Формирование поверхностного слоя режущего инструмента при алмазной обработке кругами на металлической связке // Решетневские чтения. – 2014. – Т. 1. – С. 306–308.

28. Kozlov A.M., Ambrosimov S.K., Kozlov A.A. Modeling abrasive grain interaction with machined surface // Proceedings of the 6th International Conference on Industrial Engineering (ICIE 2020), Sochi, Russia, 18–22 May 2020. – Springer, 2021. – P. 953–960. – DOI: 10.1007/978-3-030-54817-9_110.

29. Bratan S., Bogutsky B., Roshchupkin S. Development of mathematical model of material removal calcu-

lation for combined grinding process // Proceedings of the 4th International Conference on Industrial Engineering ICIE 2018, Moscow, 15–18 May 2018. – Springer, 2019. – P. 1759–1769. – DOI: 10.1007/978-3-319-95630-5_189.

30. Investigation of the structure and properties of copper-tin bonding M2-01 in diamond grinding wheel introducing additional energy in the form of electric discharges into the processing zone / Y. Gutsalenko, S. Bratan, S. Roshchupkin, V. Dyadichev, S. Menyuk // Materials Today: Proceedings. – 2019. – Vol. 11 (1). – P. 586–590. – DOI: 10.1016/j.matpr.2019.01.033.

31. Козлов А.М., Болгов Д.В. Моделирование совмещенной абразивной обработки // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – 2010. – № 2 (280). – С. 50–53.

32. Ways to implement hybrid finishing technology with a hand-held rotary tool / D. Lobanov, M. Borisov, A. Yanyushkin, V. Skeebe // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2020. – Vol. 709 (4). – P. 044075. – DOI: 10.1088/1757-899X/709/4/044075.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

© 2025 Авторы. Издательство Новосибирского государственного технического университета. Эта статья доступна по лицензии Creative Commons «Attribution» («Атрибуция») 4.0 Всемирная (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0>).



Obrabotka metallov -

Metal Working and Material Science

Journal homepage: http://journals.nstu.ru/obrabotka_metallov



Development of a device for studying and simulating the electrochemical grinding process

Mikhail Borisov^{1, a}, Dmitry Lobanov^{1, b, *}, Vadim Skeebe^{2, c}, Oksana Nadezhkina^{1, d}

¹ I.N. Ulianov Chuvash State University, 15 Moskovsky Prospekt, Cheboksary, 428015, Russian Federation

² Novosibirsk State Technical University, 20 Prospekt K. Marksa, Novosibirsk, 630073, Russian Federation

^a <https://orcid.org/0000-0001-9084-1820>, borisovmgou@mail.ru; ^b <https://orcid.org/0000-0002-4273-5107>, lobanovdv@list.ru;

^c <https://orcid.org/0000-0002-8242-2295>, skeebe_vadim@mail.ru; ^d <https://orcid.org/0009-0006-3656-394X>, nadezhkina_oksana@mail.ru

ARTICLE INFO

Article history:

Received: 26 November 2024

Revised: 12 December 2024

Accepted: 28 December 2024

Available online: 15 March 2025

Keywords:

Electrochemical grinding

Combined processing

Modeling

Abrasive tool

Hybrid technology

Funding

This study was supported by a NSTU grant (project No. TP-PTM-1_25).

Acknowledgements

The research was carried out at the equipment of the Engineering Center "Design and Production of High-Tech Equipment" and the shared research facility "Structure, mechanical and physical properties of materials".

ABSTRACT

Introduction. When manufacturing critical parts from high-strength and difficult-to-process steels in various industries, the final quality is usually formed during finishing operations. The efficiency of the process is significantly higher when using combined, hybrid methods of influencing the surface being processed. When processing some complex-shaped parts, more attention in finishing operations is usually paid to reducing roughness while maintaining previously achieved dimensional accuracy indicators. For this purpose, abrasive tools on a rigid base are often used, placing it in a less rigid technological system. To increase the efficiency of the process, it is necessary to establish optimal modes of mechanical and electrochemical processing of parts. In the absence of the possibility of using industrial equipment for hybrid technologies at the initial stage, taking into account the need to modernize existing technological equipment for the implementation of the electrochemical grinding process, it is advisable to study this process by simulating it on simulator devices. **The purpose of the work** is to develop a device for studying and simulating the process of electrochemical grinding of conductive parts with abrasive heads on a metal bond. **Research methodology.** To simulate the process of electrochemical grinding of conductive parts using abrasive heads on a metal bond, we have developed a special device. It allows for the basing of the workpiece and the tool, implementation the electrochemical grinding process, its kinematic and electrical conditions: main motion, linear displacement of working bodies, mechanical and electrical modes, ensuring the necessary conditions for the implementation of the technology, and implementing a control system. **Results and discussion.** To determine the influence of mechanical cutting modes on the roughness of the machined surface of a part made of corrosion-resistant steel 0.12 C-18Cr-10 Ni-Ti, empirical studies were carried out on the designed device. Planning and processing of experimental results were carried out using standard methodology for preparing and conducting a full factorial experiment. The resulting model makes it possible to determine rational mechanical cutting conditions and evaluate its influence on the quality of the surface being processed.

For citation: Borisov M.A., Lobanov D.V., Skeebe V.Y., Nadezhkina O.A. Development of a device for studying and simulating the electrochemical grinding process. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science*, 2025, vol. 27, no. 1, pp. 93–105. DOI: 10.17212/1994-6309-2025-27.1-93-105. (In Russian).

References

1. Borisov M.A., Lobanov D.V., Yanyushkin A.S., Skeebe V.Yu. Investigation of the process of automatic control of current polarity reversal in the conditions of hybrid technology of electrochemical processing of corrosion-resistant steels. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science*, 2020, vol. 22, no. 1, pp. 6–15. DOI: 10.17212/1994-6309-2020-22.1-6-15. (In Russian).

* Corresponding author

Lobanov Dmitry V., D.Sc. (Engineering), Associate Professor
 I.N. Ulyanov Chuvash State University,
 15 Moskovsky Ave,
 428015, Cheboksary, Russian Federation
 Tel.: +7 908 303-47-45, e-mail: lobanovdv@list.ru

2. Lobanov D.V., Arkhipov P.V., Yanyushkin A.S., Skeebe V.Yu. The research into the effect of conditions of combined electric powered diamond processing on cutting power. *Key Engineering Materials*, 2017, vol. 736, pp. 81–85. DOI: 10.4028/www.scientific.net/KEM.736.81.
3. Bratan S.M., Kharchenko A.O., Vladetskaya E.A., Kharchenko A.A. Analysis and synthesis of vibration isolation system of a grinding machine with account of the operational reliability of its elements. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science*, 2019, vol. 21, no. 1, pp. 35–49. DOI: 10.17212/1994-6309-2019-21.1-35-49. (In Russian).
4. Kharchenko A., Chasovitina A., Bratan S. Modeling of regularities of change in profile sizes and wear areas of abrasive wheel grains during grinding. *Materials Today: Proceedings*, 2021, vol. 38 (4), pp. 2088–2091. DOI: 10.1016/j.matpr.2020.10.154.
5. Nosenko S.V., Nosenko V.A., Kremenetskii L.L. The condition of machined surface of titanium alloy in dry grinding. *International Conference on Industrial Engineering, ICIE 2017*, Saint-Petersburg, 16–19 May 2017, pp. 115–120. DOI: 10.1016/j.proeng.2017.10.446.
6. Gusev V.V., Roshchupkin S.I., Moiseev D.A., Melnikova E.P. Analysis of grinding process with the use of field theory. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2019, vol. 709 (2), p. 022001. DOI: 10.1088/1757-899X/709/2/022001.
7. Rechenko D.S. The study of the process of difficult-to-machine materials cutting at the micro-level. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science*, 2019, vol. 21, no. 2, pp. 18–25. DOI: 10.17212/1994-6309-2019-21.2-18-25. (In Russian).
8. Rechenko D.S., Popov A.Y., Titov Y.V., Balova D.G., Gritsenko B.P. Ultra-high-speed sharpening and hardening the coating of carbide metal-cutting tools for finishing aircraft parts made of titanium alloys. *Journal of Physics: Conference Series*, 2019, vol. 1260 (6), p. 062020. DOI: 10.1088/1742-6596/1260/6/062020.
9. Kozlov A.M., Kozlov A.A. Shaping the surface topology of cylindrical components by means of an abrasive tool. *Russian Engineering Research*, 2009, vol. 29 (7), pp. 743–746. DOI: 10.3103/S1068798X09070223.
10. Soler Ya.I., Kazimirov Yu.D. Predicting the supporting area of microrelief in machine parts of variable rigidity during plane grinding. *Journal of Machinery Manufacture and Reliability*, 2006, vol. 35 (3), pp. 260–265.
11. Niu L., Jin Z., Zhou Z., Dong Z., Zhu X. Study on electrochemical effect in electrochemical grinding of tungsten alloy. *ISAAT 2018 – 21st International Symposium on Advances in Abrasive Technology*, Toronto, 14–16 October 2018.
12. Bratan S.M., Sidorov D.E., Bogutskii V.B. [Synthesis of a Kalman-Bussy filter for assessing the state of a grinding operation]. *Sovremennye napravleniya i perspektivy razvitiya tekhnologii obrabotki i oborudovaniya v mashinostroenii* [Modern directions and prospects for the development of processing technologies and equipment in mechanical engineering]. Materials of the International Scientific and technical conference, Sevastopol, September 14–15, 2015, pp. 87–91. (In Russian).
13. Nosenko V.A., Belukhin R.A., Fetisov A.V., Morozova L.K. Ispytatel'nyi kompleks na baze pretsizionnogo profilshlifoval'nogo stanka s ChPU CHEVALIER modeli smart-B1224 III [Test complex based on a precision CNC profile grinding machine CHEVALIER model smart-B1224 III]. *Izvestiya Volgogradskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Izvestia of Volgograd State Technical University*, 2016, no. 5 (184), pp. 35–39.
14. Gusev V.V., Moiseev D.A. Otsenka parametrov rabochey poverkhnosti almaznogo shlifoval'nogo kruga [Estimation of parameters of the working surface of a diamond grinding wheel]. *Progressivnye tekhnologii i sistemy mashinostroeniya = Progressive Technologies and Systems of Mechanical Engineering*, 2017, no. 4 (59), pp. 11–17.
15. Makarov V.F., Nikitin S.P. Povyshenie effektivnosti profil'nogo glubinnogo shlifovaniya lopatok turbin na mnogokoordinatnykh stankakh s ChPU [Increasing the efficiency of profile deep-depth grinding of turbine blades on multi-axis CNC machines]. *Naukoemkie tekhnologii v mashinostroenii = Science Intensive Technologies in Mechanical Engineering*, 2018, no. 4 (82), pp. 21–29.
16. Makarov V.F., Zhukotsky V.A., Bychina E.N. Problemy avtomatizatsii finishnoi obrabotki slozhnoprofil'nykh poverkhnostey lopatok GTD [Problems of automation of finishing processing of difficult profile surfaces of blades GTE]. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki = News of Tula State University. Technical Sciences*, 2016, no. 8-2, pp. 52–55.
17. Yanyushkin A.S., Popov V.Yu., Sur'ev A.A., Yanpol'skii V.V. *Prisposoblenie dlya izmereniya malykh sil pri elektroalmaznom shlifovanii* [Device for measuring small forces during electric diamond grinding]. Patent RF, no. 2215641 C2, 2003.
18. Yanyushkin A.S., Popov V.Yu., Sur'ev A.A., Yanpol'skii V.V. *Tenzometricheskaya vstavka dlya izmereniya malykh sil pri elektroalmaznom shlifovanii* [Strain gauge insert for measuring small forces during electric diamond grinding]. Patent RF, no. 2210749 C2, 2003.

19. Nosenko V.A., Nosenko S.V. *Tekhnologiya shlifovaniya metallov* [Metal grinding technology]. 4th ed. Saryi Oskol, Tonkie naukoemkie tekhnologii Publ., 2022. 616 p.
20. Lobanov D., Borisov M., Yanyushkin A., Skeebe V. Influence of the duration of current pulses on the roughness in the combined processing of corrosion steel 12H18N10T. *Key Engineering Materials*, 2022, vol. 910, pp. 397–402. DOI: 10.4028/p-gu270a.
21. Zaborski S., Łupak M., Poroś D. Wear of cathode in abrasive electrochemical grinding of hardly machined materials. *Journal of Materials Processing Technology*, 2004, vol. 149 (1–3), pp. 414–418. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2004.02.015.
22. Mogilnikov V.A., Chmir M.Y., Timofeev Y.S., Poluyanov V.S. Diamond – ECM grinding of ceramic-metal tungsten. *Proceedings of the Seventeenth CIRP Conference on Electro Physical and Chemical Machining (ISEM)*, Leuven, 08–12 April 2013, pp. 407–409. DOI: 10.1016/j.procir.2013.03.104.
23. Gusev V.V., Poltavets V.V., Molchanov A.D. [Technological support for processing hard-to-cut materials by diamond grinding by controlling the cutting ability of wheels]. *Innovatsionnye perspektivy Donbassa* [Innovative prospects of Donbass]. Materials of the 5th International Scientific and Practical Conference, Donetsk, May 21–23, 2019. Donetsk, 2019, vol. 3, pp. 119–123. (In Russian).
24. Gantsev R.Kh., Gunderov D.V., Atroshchenko V.V., Taimasova L.A., Vatiev M.V. Povysenie kachestva abrazivnogo elektrokhimicheskogo shlifovaniya zharoprochnykh splavov na nikelvoi osnove [Improving the quality of abrasive electrochemical grinding of nickel-based heat-resistant alloys]. *Neftegazovye tekhnologii i novye materialy. Problemy i resheniya* [Oil and gas technologies and new materials. Problems and solutions]. Ufa, 2019, iss. 8 (13), pp. 322–326.
25. Zhetesova G.S., Bulatov D.Zh. Opredelenie naibolee optimal'nykh parametrov i uslovii elektromekhanicheskoi obrabotki [Determination of the most optimal parameters and conditions for electromechanical processing]. *Trudy Universiteta = University Proceedings*, 2014, no. 1 (54), pp. 24–26.
26. Yanyushkin A.S., Medvedeva O.I., Arkhipov P.V., Popov V.Yu. Mekhanizm obrazovaniya zashchitnykh plenok na almaznykh krugakh s metallicheskoj svyazkoj [The mechanism of formation of protective films on diamond wheels with a metal bond]. *Sistemy. Metody. Tekhnologii = Systems. Methods. Technologies*, 2010, no. 1 (5), pp. 132–138.
27. Popov V.Yu., Yanyushkin A.S. Formirovanie poverkhnostnogo sloya rezhushchego instrumenta pri almaznoi obrabotke krugami na metallicheskoj svyazke [Developing a surface layer of cutting tools in diamond grinding wheels on a metal bond]. *Reshetnevskie chteniya = Reshetnev readings*, 2014, vol. 1, pp. 306–308.
28. Kozlov A.M., Ambrosimov S.K., Kozlov A.A. Modeling abrasive grain interaction with machined surface. *Proceedings of the 6th International Conference on Industrial Engineering (ICIE 2020)*, Sochi, Russia, 18–22 May 2020. Springer, 2021, pp. 953–960. DOI: 10.1007/978-3-030-54817-9_110.
29. Bratan S., Bogutsky B., Roshchupkin S. Development of mathematical model of material removal calculation for combined grinding process. *Proceedings of the 4th International Conference on Industrial Engineering ICIE 2018*, Moscow, 15–18 May 2018. Springer, 2019, pp. 1759–1769. DOI: 10.1007/978-3-319-95630-5_189.
30. Gutsalenko Y., Bratan S., Roshchupkin S., Dyadichev V., Menyuk S. Investigation of the structure and properties of copper-tin bonding M2-01 in diamond grinding wheel introducing additional energy in the form of electric discharges into the processing zone. *Materials Today: Proceedings*, 2019, vol. 11 (1), pp. 586–590. DOI: 10.1016/j.matpr.2019.01.033.
31. Kozlov A.M., Bolgov D.V. Modelirovanie sovmeshchennoi abrazivnoi obrabotki [Modelling of fetch abrasive filtering]. *Fundamental'nye i prikladnye problemy tekhniki i tekhnologii = Fundamental and Applied Problems of Engineering and Technology*, 2010, no. 2 (280), pp. 50–53.
32. Lobanov D., Borisov M., Yanyushkin A., Skeebe V. Ways to implement hybrid finishing technology with a hand-held rotary tool. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2020, vol. 709 (4), p. 044075. DOI: 10.1088/1757-899X/709/4/044075.

Conflicts of Interest

The authors declare no conflict of interest.