

П.В. Архипов, к.т.н., **А.С. Янышкин**, д.т.н.,
О.И. Медведева, старший преподаватель, **В.Ю. Попов**, к.т.н.
(Братский государственный университет, 665709, Россия, г. Братск, ул. Макаренко, 40)
E-mail: pavded@yandex.ru, yanyushkin@brstu.ru

Повышение эффективности комбинированного электрохимического шлифования твердых сплавов алмазными кругами на металлической связке¹

В статье обозначены проблемы, связанные с применением алмазных шлифовальных кругов на металлической связке при обработке твердосплавных материалов. Представлены исследования режущей способности алмазных кругов при обработке твердых сплавов комбинированным методом электрохимического шлифования с одновременной непрерывной правкой. Получены теоретические модели зависимости коэффициента режущей способности от электрических и механических составляющих режимов комбинированного электрохимического шлифования. Определены рациональные режимы, обеспечивающие стабилизацию режущей способности алмазных кругов на металлической связке.

Ключевые слова: шлифование; металлическая связка; режущая способность алмазных кругов; твердые сплавы; алмазные шлифовальные круги.

P.V. Arkhipov, Can. Eng., **A.S. Yanyushkin**, D. Eng.,
O.I. Medvedeva, Senior Lecturer, **V.Yu. Popov**, Can. Eng.
(Bratsk State University, 40, Makarenko Str, Bratsk 665709, Russia)

Efficiency increase in combined electro-chemical grinding of hard alloys by diamond metal bonded disks

In the paper there are emphasized problems connected with the use of diamond metal bond abrasive discs at the processing of hard alloys. The reasons of cutting capacity decrease are pointed out which limit a wide-spread use of a diamond metal bond tool. It is established that for the achievement of a required productivity and quality of ready products is possible at the expense of the application of electro-chemical and electro-physical methods of stropping and also due to the improvement of abrasive disc designs. This work reports the investigations of a cutting capacity of diamond discs at the working of hard alloys by a combined method of electro-chemical grinding with simultaneous continuous stropping. As an output parameter there was accepted a cutting capacity factor of a diamond which was assessed according to the changes in effective working capacity. On the basis of the results of the experimental data processed there were obtained theoretical models of the dependence of the cutting capacity factor upon electric and mechanical constituents of the modes of combined electro-chemical grinding. A complex of investigations directed to the detection of efficient modes ensuring the stability of cutting capacity in diamond metal bond discs is carried out. It is experimentally confirmed that the application of the method of combined electro-chemical grinding with the simultaneous continuous disc stropping at working hard alloy materials allows increasing diamond disc cutting capacity by 15% in comparison with other methods of the diamond working of such materials.

Keywords: grinding; metal bond; cutting capacity of diamond discs; hard alloys; diamond abrasive disc.

Одной из главных задач современного машиностроения является комплексный подход к обеспечению качества и конкурентоспособ-

¹ Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта 16-38-00123 мол_а.

ности выпускаемой продукции, для решения которой необходима тесная связь науки с производственными условиями, поскольку отсутствие достаточно простых и надежных способов управления процессами обработки стано-

вится главной причиной повышения трудоемкости и снижения качества продукции.

В настоящее время особое внимание уделяется совершенствованию технологий обработки изделий из высокопрочных материалов [1–6]. Методы окончательной обработки с применением широко распространенных абразивных инструментов, в ряде случаев, не позволяют достигнуть требуемых качественных и эксплуатационных характеристик готовых изделий, а использование производительного инструмента из сверхтвердых абразивных материалов, ограничивается проблемами, связанными с восстановлением их режущих свойств.

Снижение производительности связано, главным образом, с засаливанием алмазосодержащего слоя продуктами обработки и, как следствие, потерей режущей способности инструмента [7–9]. Это является одной из причин повышения трудоемкости на окончательных операциях в виду необходимости восстановления и стабилизации режущей способности алмазных кругов.

В производственных условиях применяют различные способы восстановления режущих свойств и геометрической формы абразивных инструментов. В отношении алмазных кругов на металлической связке следует отметить, что использование только электрохимических и электрофизических методов правки, а также совершенствование конструкций самих абразивных кругов позволяет достигать требуемой производительности и качества готовых изделий [10, 11].

В связи с этим, значительный интерес представляет исследование режущей способности алмазных кругов на металлической связке для решения проблемы засаливания при комбинированном электрохимическом шлифовании с одновременной правкой.

Методика исследования. Работоспособность шлифовального круга характеризуется интенсивностью съема обрабатываемого материала, силами резания, стойкостью и износом круга, достижимой точностью и шероховатостью поверхности. В свою очередь, износ круга, точность и шероховатость поверхности непосредственно связаны с силой, прижимающей круг к обрабатываемой поверхности. Поэтому за критерий режущей способности принимается отношение съема материала в единицу времени, отнесенного к радиальной составляющей силы резания:

$$K_p = \frac{Q_M}{P_y}, \quad (1)$$

где Q_M – величина съема материала в единицу времени, $\text{мм}^3/\text{мин}$; P_y – радиальная составляющая силы резания, Н.

Так как радиальная составляющая силы резания P_y пропорциональна эффективной мощности шлифования N_3 , в данном исследовании коэффициент режущей способности принято оценивать по изменению эффективной мощности при обработке. В соответствии с принятыми допущениями, коэффициент режущей способности может быть представлен следующим образом:

$$K = \frac{Q_M}{N_3} = \frac{S \cdot t \cdot b_3}{N_3}, \quad (2)$$

где K – приведенный коэффициент режущей способности, $\text{мм}^3/(\text{Вт} \cdot \text{мин})$; S – продольная подача, $\text{м}/\text{мин}$; t – глубина шлифования, мм ; b_3 – ширина контакта шлифовального круга и заготовки, мм ; N_3 – эффективная мощность шлифования, Вт .

Исследования по определению рациональных режимов, обеспечивающих стабилизацию режущей способности алмазных кругов с металлической связкой, выполнены для метода комбинированного электрохимического шлифования с одновременной непрерывной правкой шлифовального круга.

Эксперимент поставлен по программе центрального композиционного планирования второго порядка. Основными факторами, влияющими на процесс обработки, приняты: S – скорость продольной подачи, $\text{м}/\text{мин}$; t – глубина шлифования, мм ; $i_{\text{тр}}$ – плотность тока травления, $\text{А}/\text{см}^2$; $i_{\text{пр}}$ – плотность тока правки, $\text{А}/\text{см}^2$. Скорость резания принята постоянной и составила $v = 35 \text{ м}/\text{с}$. Уровни факторов и интервалы варьирования выбраны по результатам предварительных экспериментов. Выходным параметром является режущая способность шлифовального круга K , $\text{мм}^3/(\text{Вт} \cdot \text{мин})$. Критерием оценки выходного параметра является эффективная мощность шлифования N_3 , Вт .

Материалами для проведения исследований выбраны твердосплавные пластины марки Т15К6, в виду их широкого применения на производстве в качестве инструментальных материалов. В исследованиях использовались алмазные круги на металлической токопроводящей связке марки М2-01 зернистостью 125/100. Электролитом являлся раствор солей: 0,5 % Na_2CO_3 и 1 % NaCl в воде, в качестве ингибитора коррозии использовался 0,5% NaNO_2 .

Результаты и их обсуждение. В результате обработки экспериментальных данных получена модель второго порядка, адекватно описывающая влияние электрических и механических составляющих шлифования на режущую способность шлифовального круга:

$$K = -6,85 + 1,92S + 192,18t + 0,18i_{\text{тр}} + 4,45i_{\text{пр}} - 0,37S^2 - 3041,7t^2 - 0,003i_{\text{тр}}^2 - 0,81i_{\text{пр}}^2. \quad (3)$$

По результатам исследования построена поверхность отклика (рис. 1, а) и получена зависимость коэффициента режущей способности K от электрических режимов обработки $i_{\text{пр}}$ и $i_{\text{тр}}$, которая имеет вид:

$$K = -0,995 + 0,183i_{\text{тр}} + 6,445i_{\text{пр}} - 0,002i_{\text{тр}}^2 - 29,8i_{\text{пр}}^2.$$

По результатам анализа влияния механических составляющих процесса шлифования построена поверхность отклика (рис. 1, б) и получена зависимость коэффициента режущей способности K от механических режимов обработки t , мм и S , м/мин, которая имеет вид:

$$K = -2,758 + 1,39S + 192,18t - 0,003S^2 - 29,8t^2$$

На основе полученных моделей определены интервалы, при которых коэффициент режущей способности шлифовального круга принимает наибольшее значение: продольная подача $S = 2...4$ м/мин; глубины шлифования $t = 0,01...0,0$ мм; плотность тока травления $i_{\text{тр}} = 10...40$ А/см²; плотность тока правки $i_{\text{пр}} = 0,1...0,4$ А/см².

Для уточнения рациональных режимов шлифования проведены дополнительные эксперименты. Исследование влияния плотности тока правки на режущую способность шлифовального круга показало, что в рамках полученной модели (3) режущая способность достигает наибольшего значения $i_{\text{пр}} = 0,4$ А/см² (рис. 2, а).

Анализ полученных данных позволил установить, что при значениях плотности тока правки менее $i_{\text{пр}} = 0,4$ А/см², коэффициент режущей способности снижается, поскольку в этом случае на поверхности круга образуется засаленный слой, препятствующий обновлению рабочей поверхности круга, и в результате удаление припуска сопровождается повышением силы резания и, следовательно, эффективной мощности.

Следует отметить, что при максимальном значении плотности тока правки не происходит засаливания, но при этом наблюдается по-

вышение расхода круга, поскольку вместе с засаленным слоем дополнительно растворяется связка, ослабляя алмазные зерна. Такой режим правки рекомендуется использовать при черновой обработке с большими припусками.

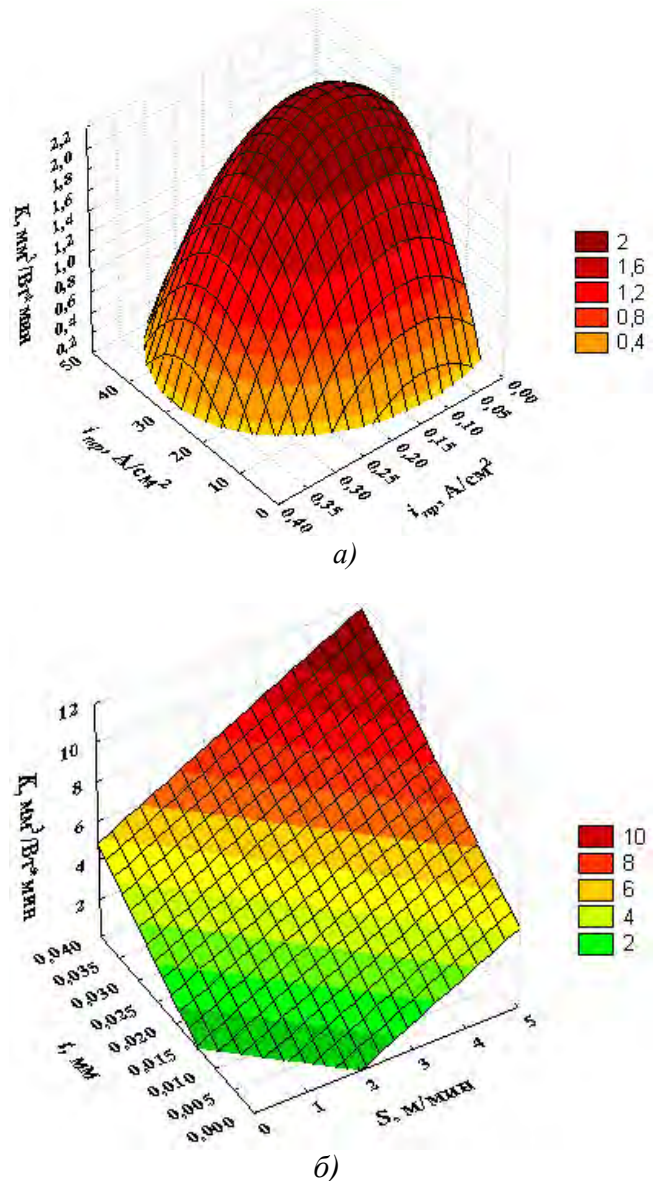


Рис. 1. Поверхность отклика коэффициента K режущей способности алмазного круга:

а – от электрических режимов обработки тока правки $i_{\text{пр}}$ и тока травления $i_{\text{тр}}$; б – от механических режимов обработки t и S

Таким образом, для обеспечения стабильности режущих свойств и удовлетворительного расхода алмазных кругов следует считать рациональной плотность тока правки $i_{\text{пр}} = 0,4$ А/см².

Оценивая влияние плотности тока травления и глубины резания на коэффициент режущей способности, следует отметить, что

повышение эффективности удаления припуска достигается при $i_{np} = 30 \text{ А/см}^2$ и $t = 0,03 \text{ мм}$.

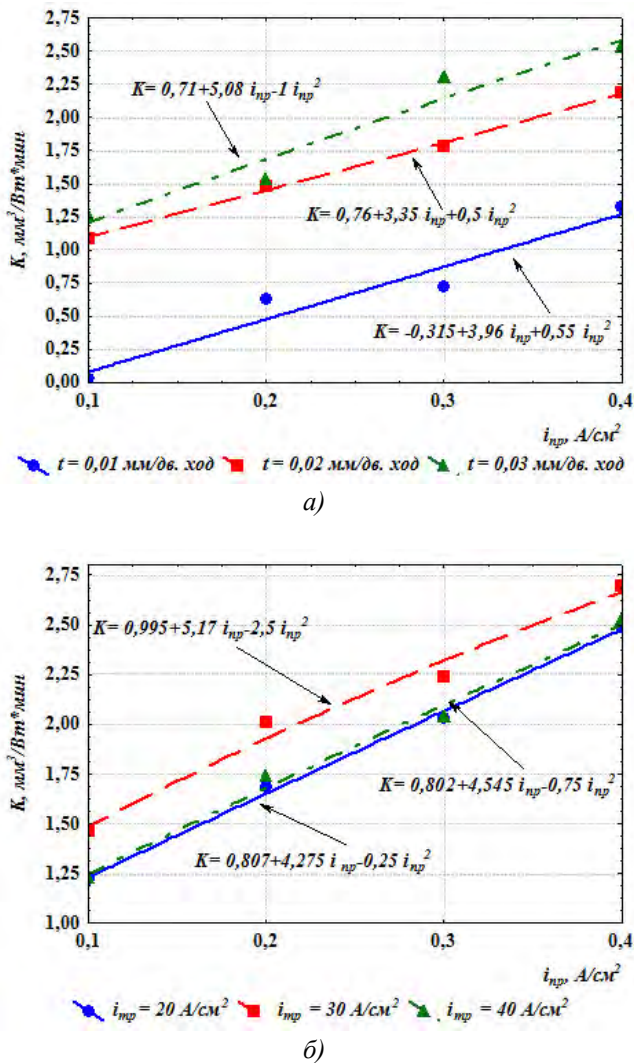


Рис. 2. Зависимость коэффициента режущей способности шлифовального круга от плотности тока правки:

а – $S = 3 \text{ м/мин}$; $i_{np} = 40 \text{ А/см}^2$;

б – $t = 0,03 \text{ мм}$; $S = 3 \text{ м/мин}$

Дальнейший анализ показал, что увеличение продольной подачи до 2 м/мин при глубине резания $0,03 \text{ мм}$ приводит к повышению режущей способности алмазных кругов в $1,5\text{--}2$ раза, поскольку на соответствующих режимах увеличивается объем снимаемого припуска. Однако при назначении большой глубины резания происходит повышение эффективной мощности, что приводит к снижению коэффициента режущей способности круга (рис. 3, а).

При продольной подаче в интервале $2\text{--}4 \text{ м/мин}$ отмечается значительное снижение режущей способности круга в виду того, что скорость перемещения детали относи-

тельно инструмента существенно превышает интенсивность электрохимического разрушения обрабатываемой поверхности, в результате увеличивается площадь сечения механически срезаемого припуска и возрастает радиальная составляющая силы резания (рис. 3, б).

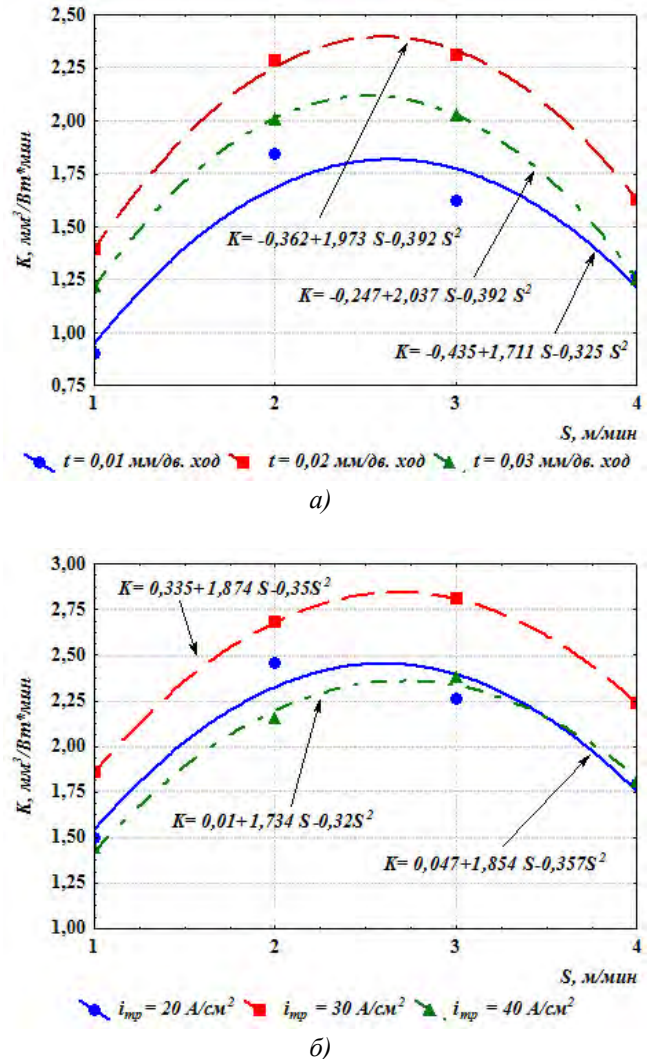


Рис. 3. Зависимость коэффициента режущей способности шлифовального круга от продольной подачи:

а – $i_{np} = 0,2 \text{ А/см}^2$; $i_{np} = 30 \text{ А/см}^2$;

б – $t = 0,03 \text{ мм}$; $i_{np} = 0,2 \text{ А/см}^2$

Следовательно, для поддержания высокой режущей способности круга целесообразным является обработка при подаче $S = 2 \text{ м/мин}$ и глубине резания $t = 0,02 \text{ мм}$.

Плотность тока травления при комбинированном электрохимическом шлифовании позволяет значительно снизить силы резания и, следовательно, эффективную мощность за счет анодного разрушения обрабатываемой поверхности, поэтому при плотности тока травления в диапазоне $10\text{--}30 \text{ А/см}^2$ отмечается повышение коэффициента режущей спо-

способности в 1,5 раза (рис. 4).

Тем не менее, при плотности тока травления более 30 А/см² режущая способность алмазного круга снижается, поскольку электрохимическое разупрочнение обрабатываемой поверхности в этом случае превышает фактическое значение снимаемого припуска при неизменных соответствующих режимах. При этой плотности тока правки $i_{пр} = 0,2$ А/см² недостаточно для обновления поверхности круга, в результате происходит засаливание и повышение силы резания (см. рис. 4).

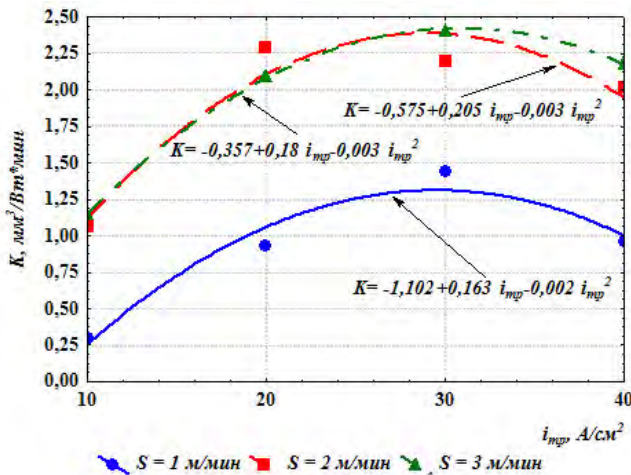


Рис. 4. Зависимость коэффициента режущей способности шлифовального круга от плотности тока травления при $t = 0,02$ мм; $i_{пр} = 0,2$ А/см²

Использовать повышенные значения плотности тока травления также рекомендуется на черновых операциях и только в сочетании с высокой плотностью тока правки для обеспечения удовлетворительных режущих свойств алмазного круга и максимального объема снимаемого припуска.

Анализируя полученные результаты, следует отметить, что рациональным значением плотности тока травления для принятых режимов – продольной подачи, плотности тока правки и глубины резания следует считать $i_{пр} = 30$ А/см², при этом обеспечивается высокая режущая способность алмазного круга с металлической связкой.

Выводы

Экспериментально подтверждено, что применение метода комбинированного электрохимического шлифования с одновременной непрерывной правкой круга при обработке твердосплавных материалов позволяет повысить режущую способность алмазного круга на 15 % в сравнении с другими методами ал-

мазной и абразивной обработки таких материалов.

По результатам экспериментальных данных получены модели зависимости приведенного коэффициента режущей способности алмазных кругов от электрических и механических режимов комбинированного шлифования.

Определены рациональные электрические режимы комбинированной обработки $i_{пр} = 0,3$ А/см² и $i_{тр} = 30$ А/см², а также механические режимы: продольная подача $S = 2$ м/мин и глубина резания $t = 0,02$ мм, обеспечивающие высокую режущую способность алмазного круга и удовлетворительное качество готовых изделий при постоянной скорости резания 35 м/с.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Попов, А.Ю., Реченко, Д.С., Васильев, Е.В., Сергеев, В.С., Кольцов, А.Г. Технология алмазного шлифования твердосплавных изделий // Вестник Уфимского государственного авиационного технического университета. – 2012. – Т. 16. – № 4 (49). – С. 24–29.
2. Васильев, Е.В., Попов, А.Ю., Реченко, Д.С. Алмазное шлифование твердосплавных пластин // Вестник машиностроения. – 2012. – Т. 32. – № 11–12. – С. 730–732.
3. Сулов А.Г. Совершенствование и разработка конкурентоспособных технологий, обеспечивающих повышение качества изделий машиностроения // Вестник Брянского государственного технического университета. – 2006. – № 2. – С. 24–29.
4. Янюшкин, А.С., Лобанов, Д.В., Ковалевский, С.В. Повышение качества подготовки твердосплавного инструмента // Системы. Методы. Технологии. – 2009. – № 1. – С. 95–98.
5. Рычков, Д.А., Скрипняк, В.А., Янюшкин, А.С., Лобанов, Д.В. Формирование режущей кромки фрезерного инструмента для обработки слоистых композиционных материалов, армированных стеклянными волокнами // Системы. Методы. Технологии. – 2014. – № 2 (22). – С. 42–46.
6. Лобанов Д.В., Янюшкин А.С., Кузнецов А.М. Недостатки традиционных методов затачивания твердосплавного инструмента и пути их совершенствования // Труды Братского государственного университета. Серия: Естественные и инженерные науки. – 2004. – Т. 2. – С. 95–98.
7. Yanyushkin A., Lobanov D., Arkhipov P., Ivancivsky V. Contact processes in grinding // Applied Mechanics and Materials. 2015. Т. 788. С. 17–21.
8. Архипов, П.В., Янюшкин, А.С., Ковалевский, С.В. О природе засаливания шлифовальных кругов // Труды Братского государственного университета. Серия: Естественные и инженерные науки. – 2008. – № 2. – С. 169–174.
9. Янюшкин, А.С., Лобанов, Д.В., Батаев, В.А., Архипов, П.В., Медведева, О.И. Исследования работоспособности алмазных кругов при обработке композицион-

ных материалов // Системы. Методы. Технологии. – 2010. – № 7. – С. 87–91.

10. Янюшкин, А.С., Попов, В.Ю., Янюшкин, Р.А. Элементы модернизации станков шлифовальной группы под процессы электроалмазной обработки // Труды Братского государственного университета. Серия: Естественные и инженерные науки. – 2000. – Т. 1. – С. 189–190.

11. Янюшкин, А.С., Лобанов, Д.В., Архипов, П.В., Попов В.Ю. Исследование влияния электрических режимов на качественные и экономические показатели комбинированной электроалмазной обработки твердосплавных материалов // Научные технологии в машиностроении. – 2015. – № 3(45). – С. 22–29.

REFERENCES

1. Popov, A.Yu., Rechenko, D.S., Vasiliev, E.V., Sergeev, V.S., Koltsov, A.G. Diamond grinding technology for hard alloy products // *Bulletin of Ufa State Aircraft Technical University*. – 2012. – Vol. 16. – № 4 (49). – pp. 24–29.

2. Vasiliev, E.V., Popov, A.Yu., Rechenko, D.S. Diamond grinding of hard alloy plates // *Bulletin of Mechanical Engineering*. – 2012. – Vol. 32. – № 11–12. – pp. 730–732.

3. Suslov A.G. Improvement and development of competitive techniques ensuring quality increase of engineering products // *Bulletin of Bryansk State Technical University*. – 2006. – № 2. – pp. 24–29.

4. Yanyushkin, A.S., Lobanov, D.V., Kovalevsky, S.V. Quality increase in preparation of hard alloy tool // *Systems. Methods. Techniques*. – 2009. – № 1. – pp. 95–98.

5. Rychkov, D.A., Skripnyak, V.A., Yanyushkin, A.S., Lobanov, D.V. Cutting edge formation in milling tool for work-

ing laminated composites armored with glass fibers // *Systems. Methods. Techniques*. – 2014. – № 2 (22). – pp. 42–46.

6. Lobanov D.V., Yanyushkin A.S., Kuznetsov A.M. Drawbacks in common methods of hard alloy tool sharpening and ways for their improvement // *Proceedings of Bratsk State University. Series: Engineering Sciences*. – 2004. – Vol. 2. – pp. 95–98.

7. Yanyushkin A., Lobanov D., Arkhipov P., Ivancivsky V. Contact processes in grinding // *Applied Mechanics and Materials*. 2015. T. 788. C. 17–21.

8. Arkhipov, P.V., Yanyushkin, A.S., Kovalevsky, S.V. On nature of abrasive disc glazing // *Proceedings of Bratsk State University. Series: Natural and Engineering Sciences*. – 2008. – № 2. – pp. 169–174.

9. Yanyushkin, A.S., Lobanov, D.V., Bataev, V.A., Arkhipov, P.V., Medvedeva, O.I. Investigations of diamond disc operational capacity at composites processing // *Systems. Methods. Technologies*. – 2010. – № 7. – pp. 87–91.

10. Yanyushkin, A.S., Popov, V.Yu., Yanyushkin, R.A. Elements of grinding machine updating for electro-diamond processing // *Proceedings of Bratsk State Technical University. Series: Natural and Engineering Sciences*. – 2000. – Vol. 1. – pp. 189–190.

11. Yanyushkin, A.S., Lobanov, D.V., Arkhipov, P.V., Popov V.Yu. Investigations of electric mode impact upon qualitative and economic indices of combined electro-diamond processing of hard alloy materials // *Science Intensive Technologies in Mechanical Engineering*. – 2015. – № 3(45). – pp. 22–29.

Рецензент д.т.н. П.М. Огар

УДК 621.7.024

DOI: 10.12737/24545

А.Н. Неверов, к.т.н.

(Московский автомобильно–дорожный государственный технический университет (МАДИ)

Москва, 125319, Ленинградский пр., 64)

E-mail: neverov_an@mail.ru

О возможности реализации режима слабой кавитации при ультразвуковой очистке РЭА

Представлены результаты экспериментального исследования нестационарных кавитационных явлений при ультразвуковой очистке кавитационно нестойких изделий. Наблюдались кратковременные импульсы звукового давления в жидкости и связанные с ними релаксационные колебания питающего электрического напряжения. Показана возможность реализации режима слабой кавитации при ультразвуковой очистке кавитационно нестойких изделий.

Ключевые слова: ультразвук; кавитация; колебательная скорость; импульсы; релаксационные колебания; режим слабой кавитации.