

УДК 621.9

## Формирование режущей кромки фрезерного инструмента для обработки слоистых композиционных материалов, армированных стеклянными волокнами

Д.А. Рычков<sup>1, a</sup>, В.А. Скрипняк<sup>2, b</sup>, А.С. Янюшкин<sup>1, c</sup>, Д.В. Лобанов<sup>1, d</sup><sup>1</sup>Братский государственный университет, Макаренко 40, Братск, Россия<sup>2</sup>Томский государственный университет, Ленина 36, Томск, Россия<sup>a</sup> dielektrik84@mail.ru, <sup>b</sup> skrp2006@yandex.ru, <sup>c</sup> yanyushkin@brstu.ru, <sup>d</sup> mf\_nauka@brstu.ru

Статья поступила 4.03.2014, принята 7.05.2014

*Рассматривается подготовка режущего инструмента для обработки композиционных материалов, в частности выбор метода затачивания с учетом особенностей геометрии и прочностных характеристик режущей части. Геометрические параметры режущего инструмента для обработки композиционных материалов отличаются невысоким значением угла заострения, что вызывает трудности при формировании режущей кромки традиционными способами затачивания. Экспериментальные исследования проведены для твердых сплавов марок TN20, VK15, VK8, VK6, VK6M, VK3M с использованием алмазного круга на металлической связке при затачивании электрохимическими методами шлифования. Исследования, проведенные в Томском государственном университете в рамках проекта «Разработка технологии подготовки режущего инструмента для обработки слоистых композиционных материалов», позволили получить математические модели шероховатости обработанных поверхностей твердых сплавов и удельного расхода алмазного круга в зависимости от режимов затачивания, на основе которых разработаны рекомендации по применению технологий затачивания режущего инструмента для обработки композиционных материалов и назначению рациональных режимов резания. Для затачивания рекомендуется применять комбинированный метод шлифования, поскольку он обеспечивает наилучшее качество поверхности при более высокой производительности, имеет меньшую склонность к образованию дефектов на режущей кромке, а также более низкую шероховатость поверхности.*

**Ключевые слова:** композиционные материалы, режущий инструмент, затачивание, качество поверхности, комбинированное шлифование.

## Formation of the cutting edge of a milling tool for machining laminated composite materials reinforced with glass fibers

D.A. Rychkov<sup>1, a</sup>, V.A. Skripnyak<sup>2, b</sup>, A.S. Yanyushkin<sup>1, c</sup>, D.V. Lobanov<sup>1, d</sup><sup>1</sup>Bratsk State University, 40 Makarenko St., Bratsk, Russia<sup>2</sup>Tomsk State University, 36 Lenin Av., Tomsk, Russia<sup>a</sup> dielektrik84@mail.ru, <sup>b</sup> skrp2006@yandex.ru, <sup>c</sup> yanyushkin@brstu.ru, <sup>d</sup> mf\_nauka@brstu.ru

Received 4.03.2014, accepted 7.05.2014

*The article explains how to prepare a cutting tool for machining composite materials, the grinding type considering specifics of geometry and strength characteristics of the cutting part, in particular. Geometric parameters of a cutting tool for machining composite materials have low value of the cutting-point angle, so it causes some difficulties when forming the traditional ways of cutting edge sharpening. Experiments were carried out for hard alloy grades TN20, VK15, VK8, VK6, VK6M, VK3M using a diamond wheel metal bond while sharpening grinding electrochemical methods. Studies have yielded mathematical models for machined surface roughness carbide and diamond circle specific consumption depending on modes of sharpening on which recommendations for the use of technology of sharpening cutting tools for machining of composite materials and rational purpose cutting have been developed. Combined method is recommended to be used for sharpening grinding because it provides the best surface quality at higher productivity and has a lower tendency to form defects on the cutting edge, and a lower surface roughness.*

**Keywords:** composite materials, cutting tool, sharpening, surface quality, combined grinding.

**Введение.** Стремительное развитие современных промышленных технологий сопровождается непрерывным поиском новых возможностей обеспечения требуемых свойств деталей и конструкций различного назначения. При проектировании деталей конструкторы чаще всего стремятся уменьшить массу

и себестоимость изделия, увеличить его прочность, твердость и модуль упругости, повысить стойкость к агрессивным средам и т. п. Обеспечить эти требования возможно за счет применения специально созданных композиционных материалов, способных сочетать в себе необходимые свойства.

Однако при обработке таких материалов резанием происходит интенсивный износ режущего инструмента, который объясняется особенностями свойств композитов, таких, как ярко выраженная анизотропия, высокие прочностные характеристики и твердость наполнителя, низкая теплопроводность, абразивное воздействие наполнителя, свойства которого во многом определяют износ режущего инструмента, деструкция полимерного связующего при резании, высокие упругие свойства композиционных материалов, что вызывает повышенный износ инструмента по задней поверхности из-за интенсивных контактных явлений [1, 2, 3, 4].

Подготовка режущего инструмента для обработки таких материалов сводится к обеспечению рациональных рабочих параметров инструмента при минимальных трудозатратах. Одним из основных этапов подготовки режущего инструмента является формирование геометрии его режущей части механическим способом – затачиванием.

К прогрессивным методам затачивания инструментов, режущая часть которых оснащена высокопрочными материалами, можно отнести комбинированные методы электроалмазного шлифования [5], в частности метод, заключающийся в одновременной непрерывной правке круга и травлении обрабатываемого изделия [6, 7], который исследован не в полной мере.

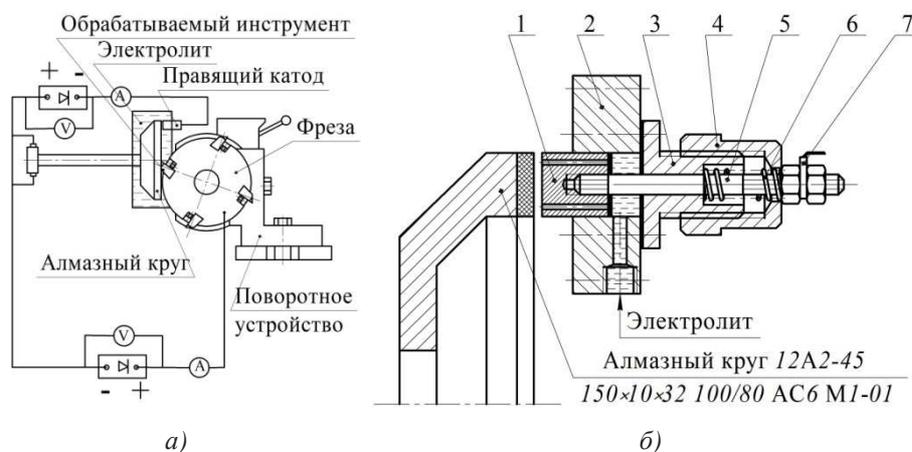
В связи с этим целью исследования является совершенствование процесса подготовки режущего инструмента для обработки композиционных материалов, включающего выбор рациональных режимов резания при затачивании режущего инструмента.

**Методика проведения исследований.** Затачивание режущего инструмента проводилось по схеме (рис. 1, а), из которой видно, что процесс включает в себя работу двух цепей. Первая цепь обеспечивает правку круга и состоит из правящего инструмента (катода) и алмазного круга (анода), подключенных к источнику

постоянного тока соответствующим образом. Между алмазонасным слоем и правящим катодом необходимо обеспечить зазор, равный 0,05...0,1 мм [8, 9, 6, 7], в котором находится электролит. Вторая цепь обеспечивает электрохимическое разупрочнение поверхности обрабатываемого изделия, что снижает силы резания и увеличивает производительность обработки. Вторая цепь включает в себя обрабатываемую деталь (анод) и алмазный круг (который в данном случае является катодом), подключенные к источнику постоянного тока соответствующим образом.

Специально разработанная конструкция правящего катода [10] обеспечивает заданную величину зазора, подачу электролита в зону правки алмазного круга и безопасность работы (рис. 1, б).

Конструкция содержит катод 1 из токопроводящего материала, поперечное сечение которого имеет форму трапеции. Катод размещен в корпусе 2, не проводящем электрический ток, который имеет отверстия для крепления его на станок, отверстие для подачи электролита и отверстие для крепления направляющей втулки 3, имеющей наружную резьбу для перемещения регулировочной гайки 4, и отверстие для размещения пружины 6. Для передачи электрического тока катод находится в соединении со штоком 5, который фиксируется пружиной, позволяющей возвращать катод в исходное положение. Подвод электрического тока на шток осуществляется через клемму 7. Рабочее положение катода задается посредством давления, создаваемого электролитом, который подается через отверстие, расположенное в корпусе. При этом электролит проникает через отверстия в катоде и попадает в зону правки алмазного круга. Достоинство разработанного катода заключается в том, что он обеспечивает равномерное вскрытие алмазных зерен, поддерживает поверхность круга в рабочем состоянии до конца срока службы и является безызносным.



**Рис. 1.** Способ затачивания режущего инструмента комбинированным методом: а – схема затачивания; б – конструкция катода

В качестве формообразующего инструмента использовался алмазный круг на металлической связке, имеющий следующие характеристики: форма круга:

12A2-45, типоразмер: 150×10×3×40×32, марка алмазов: AC6, связка: M1-01, зернистость: 100/80,

относительная концентрация алмазов в алмазоносном слое: 100 %.

Для исследований выбраны твердые сплавы марок ТН20, ВК15, ВК8, ВК6, ВК6М, ВК3М, поскольку они имеют высокую прочность, теплостойкость и твердость и рекомендуются для обработки высокопрочных материалов, к которым относятся композиционные материалы, а также широко применяются в промышленности при оснащении режущей части сборных инструментов.

В качестве электролита применялся раствор солей: 0,5 %  $Na_2CO_3$  и 1 %  $NaCl$  в воде с добавлением ингибитора коррозии 0,5 %  $NaNO_2$ . Проводимость электролита составила 26 мСм/см, содержание солей – 20 г/л.

В качестве выходных параметров исследовались удельный расход круга, потребляемая мощность и шероховатость обработанной поверхности.

Согласно рекомендациям [7] плотность тока правки круга должна быть не более  $i_{пр} < 0,3$  А/см<sup>2</sup>, плотность тока травления детали –  $i_{тр} < 20$  А/см<sup>2</sup>, продольная подача –  $S_{пр} < 2,5$  м/мин, поперечная подача –  $S_{поп} < 0,04$  мм/дв.ход, скорость резания –  $V < 52$  м/с, поскольку в противном случае возрастает удельный расход алмазного круга, появляются прижоги на поверхности инструмента и детали. Отмечено, что данные режимы нуждаются в корректировке в зависимости от обрабатываемого материала.

Проведенные предварительные исследования затачивания исследуемых твердых сплавов комбинированным способом электроалмазной обработки показывают, что ухудшение качества поверхности и увеличение удельного расхода алмазного круга происходит при режимах обработки, превышающих следующие значения:  $i_{пр} > 0,07$  А/см<sup>2</sup>,  $i_{тр} > 5$  А/см<sup>2</sup>. Также целесообразно снижение скорости резания, продольной и поперечной подачи, поскольку рекомендуемые значения этих величин оказывают негативное влияние на процесс обработки твердых сплавов из-за наличия у них высокой прочности и хрупкости.

Таким образом, для лабораторных исследований использовалось ортогональное планирование первого порядка, значения плотности тока травления и плотности тока правки круга варьировались в следующих пределах:  $i_{пр} = 0...0,06$  А/см<sup>2</sup>,  $i_{тр} = 0...4,0$  А/см<sup>2</sup>. Остальные режимы обработки следующие:  $S_{пр} = 1,5$  м/мин;  $S_{поп} = 0,02$  мм/дв.ход;  $V = 19,6$  м/с.

Для оценки качественных и количественных параметров электроалмазного затачивания твердых сплавов использованы методы статистической обработки данных и следующее оборудование Томского государственного университета: сканирующий электронный микроскоп SEM 515 (Philips), микроскоп оптический металлографический Olimpus BX-51.

**Результаты и обсуждение.** При затачивании режущего инструмента на качество полученной поверхности и производительность обработки оказывают влияние множество параметров, среди которых можно выделить удельный расход алмазного круга, шероховатость поверхности и мощность.

По результатам лабораторных исследований с применением методов статистической обработки данных получены математические модели зависимости удельного расхода круга  $q$  и шероховатости  $R_a$  от плотности тока правки и плотности тока травления при затачивании твердых сплавов:

для ВК8:

$$q = 0,49 + 4,20 \cdot i_{пр} - 0,01 \cdot i_{тр} + 2,07 \cdot i_{пр} \cdot i_{тр},$$

$$R_a = 0,39 + 1,73 \cdot i_{пр} - 0,05 \cdot i_{тр} - 0,18 \cdot i_{пр} \cdot i_{тр}, \text{ мкм};$$

для ВК15:

$$q = 0,20 + 8,39 \cdot i_{пр} + 0,12 \cdot i_{тр} + 12,50 \cdot i_{пр} \cdot i_{тр},$$

$$R_a = 0,55 + 2,48 \cdot i_{пр} - 0,06 \cdot i_{тр} - 0,69 \cdot i_{пр} \cdot i_{тр}, \text{ мкм};$$

для ВК3М:

$$q = 0,56 + 1,47 \cdot i_{пр} + 0,13 \cdot i_{тр} + 2,07 \cdot i_{пр} \cdot i_{тр};$$

$$R_a = 0,16 - 12,08 \cdot i_{пр} - 0,19 \cdot i_{тр} - 1,06 \cdot i_{пр} \cdot i_{тр}, \text{ мкм};$$

для ТН20:

$$q = 0,63 + 21,31 \cdot i_{пр} + 0,05 \cdot i_{тр} + 0,78 \cdot i_{пр} \cdot i_{тр},$$

$$R_a = 0,22 + 0,47 \cdot i_{пр} + 0,01 \cdot i_{тр} + 0,27 \cdot i_{пр} \cdot i_{тр}, \text{ мкм}.$$

Стоит отметить, что наименьшая шероховатость и удельный расход круга наблюдаются при комбинированном методе шлифования с одновременным разупрочнением поверхности обрабатываемой заготовки и правкой алмазного круга.

Оптические исследования были направлены на изучение изменения качества режущей кромки при затачивании различными методами алмазного шлифования. Далее представлены результаты исследования затачивания твердосплавных пластин на примере сплава ВК3М, для остальных марок твердых сплавов получены аналогичные результаты.

На рис. 2-3 представлены фотографии с оптического микроскопа и растрового электронного микроскопа режущей кромки твердосплавных пластин марки ВК3М, заточенных различными методами: традиционным, комбинированным, с правкой круга и с травлением детали.

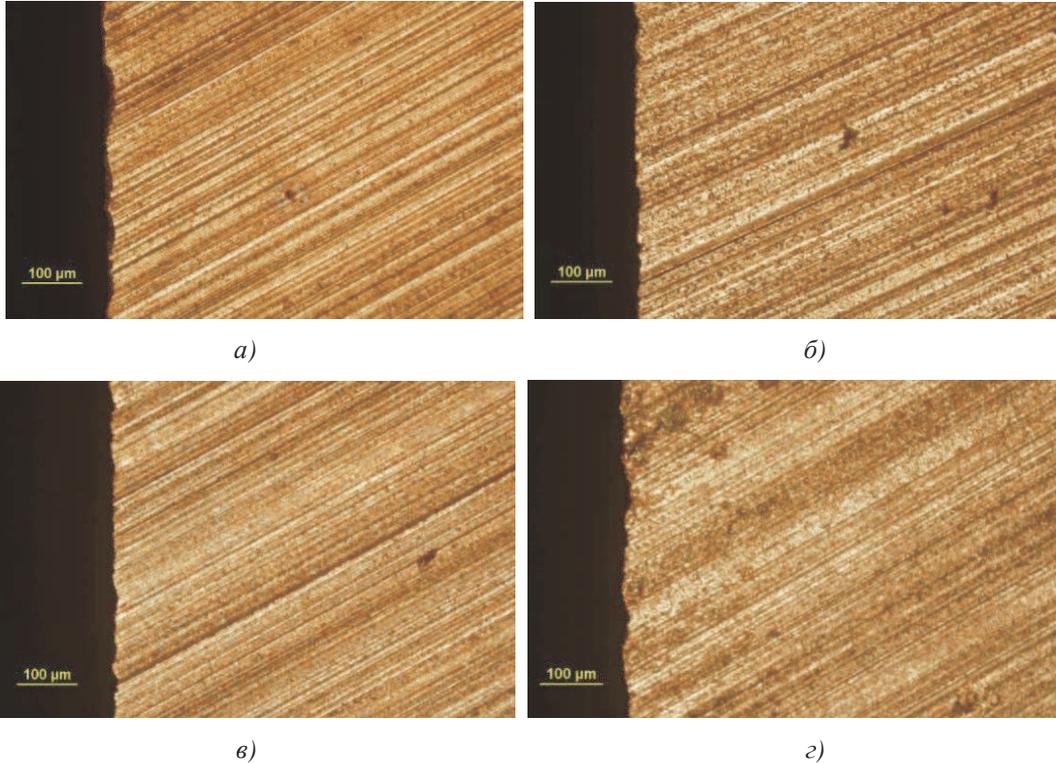
Исследования показывают, что после затачивания твердых сплавов традиционным методом наблюдается более высокая склонность к образованию дефектов, чем при обработке другими методами, а величина сколов на режущей кромке составляет порядка 30...85 мкм. Растровая микроскопия при этом показывает наличие следов трения рабочей поверхности алмазного круга о поверхность детали, о чем свидетельствует полное или частичное сглаживание неровностей на обработанной поверхности.

Затачивание с электрохимическим травлением детали показывает более удовлетворительный результат, величина сколов на режущей кромке имеет меньшие значения, на поверхности отчетливее видна структура материала вследствие его растворения под действием электрохимии, однако проявление

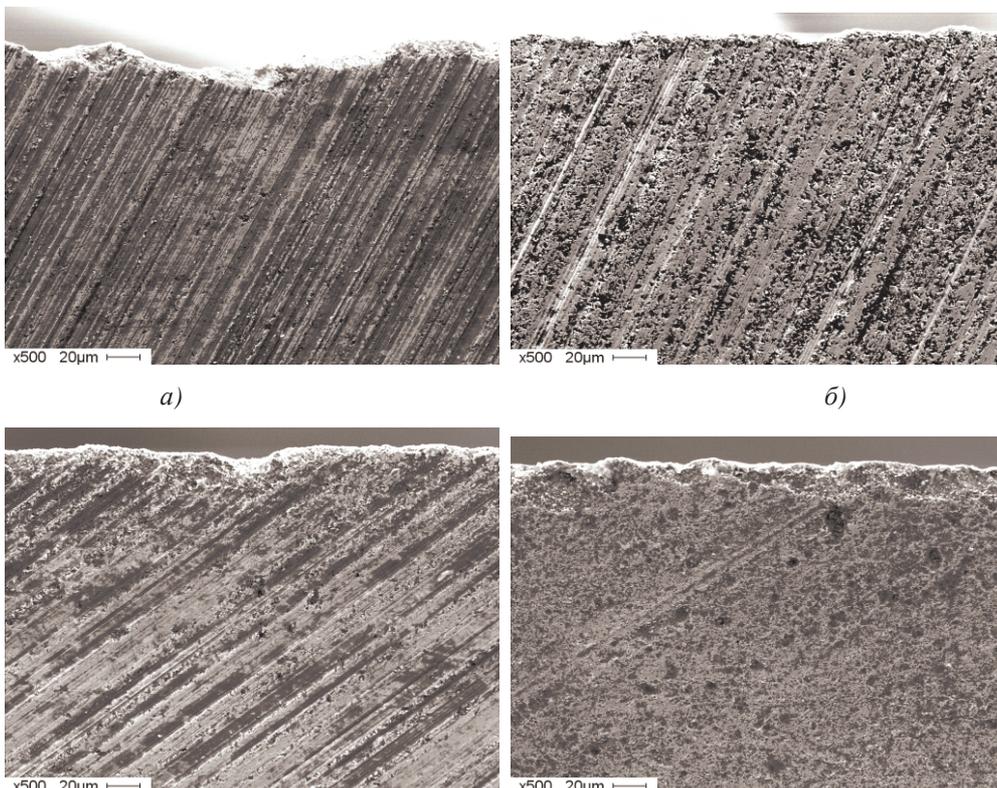
электроэрозионных процессов, происходящих в результате контакта детали с засаленным слоем алмазного круга, приводит к образованию кратеров в местах локализации электрической энергии.

После затачивания твердых сплавов с непрерывной электрохимической правкой круга прослеживается воздействие абразивных частиц алмазного круга на

обработанной поверхности, что свидетельствует о высокой степени режущей способности круга, однако на режущей кромке, являющейся концентратором внутренних напряжений, присутствуют следы адгезионного износа в виде вырванных с поверхности детали частиц обрабатываемого материала.



**Рис. 2.** Поверхность твердого сплава ВКЗМ, заточенная: *а)* традиционным методом; *б)* комбинированным методом; *в)* с правкой круга; *з)* с травлением детали



в)

з)

**Рис. 3.** Поверхность твердого сплава ВКЗМ, заточенная: а) традиционным методом; б) комбинированным методом; в) с правкой круга; з) с травлением детали

Наилучшие результаты показывают образцы твердосплавных пластин, заточенных комбинированным методом электроалмазного шлифования. Величина сколов варьируется в пределах 5...10 мкм, на режущей кромке нет следов адгезионного износа, обработанная поверхность имеет равномерную структуру со слабым проявлением эрозионных процессов. В этом случае растровая микроскопия показывает, что поверхность образца ВКЗМ растравлена хуже, чем у других материалов, что может быть следствием более низкой электрической проводимости данного сплава.

### Выводы

Проведенные исследования позволили получить математические модели шероховатости обработанных поверхностей твердых сплавов и удельного расхода алмазного круга в зависимости от режимов затачивания, на основе которых разработаны рекомендации по применению технологий затачивания режущего инструмента для обработки композиционных материалов и назначению рациональных режимов резания.

Для затачивания рекомендуется применять комбинированный метод шлифования, поскольку он обеспечивает наилучшее качество поверхности при более высокой производительности, имеет меньшую склонность к образованию дефектов на режущей кромке, а также более низкую шероховатость поверхности. При этом рекомендуется устанавливать следующие режимы обработки:  $i_{\text{пр}} = 3,5...4,0 \text{ А/см}^2$ ,  $i_{\text{пр}} = 0,05...0,06 \text{ А/см}^2$ ,  $S_{\text{пр}} = 1,5...2,0 \text{ м/мин}$ ,  $S_{\text{лоп}} = 0,02...0,04 \text{ мм/дв.ход}$ ,  $V = 19...20 \text{ м/с}$ .

### Литература

1. Лобанов Д.В., Янюшкин А.С., Рычков Д.А., Петров Н.П. Организация инструментального хозяйства при обработке композиционных материалов // СТИН. 2010. № 11. С. 2-4.
2. Лобанов Д.В., Янюшкин А.С. Подготовка режущего инструмента для обработки композиционных материалов: моногр. Братск: Изд-во БрГУ, 2011. 191 с.
3. Лобанов Д.В., Янюшкин А.С. Технология инструментального обеспечения производства изделий из композиционных неметаллических материалов: моногр. Старый Оскол: Изд-во ТНТ, 2012. 296 с.
4. Янюшкин А.С., Попов В.Ю., Петров Н.П., Рычков Д.А. Повышение эффективности обработки высокопрочных композиционных материалов // Труды Братского государственного университета. Сер. Естественные и инженерные науки. 2013. Т. 1. С. 146-149.
5. Лобанов Д.В., Янюшкин А.С. Влияние методов затачивания на качество твердосплавного инструмента для обработки композиционных материалов // Вестн. машиностроения. 2011. № 3. С. 50-53.
6. Янюшкин А.С., Попов В.Ю., Васильев Е.В., Попов А.Ю. Комбинированная электроалмазная обработка инструментальных сталей: моногр. Братск: БрГУ, 2009. 228 с.
7. Янюшкин А.С. Технология электроалмазного затачивания режущих инструментов и методы ее реализации: моногр. Старый Оскол: Изд-во ТНТ, 2013. 336 с.
8. Солер Я.И., Казимиров Д.Ю., Прокопьева А.В. Оптимизация процесса шлифования быстрорежущих пластин инструментом из

CBN по критериям точности формы поверхности // Metalloobrabotka. 2006. № 5-6. С. 21-24.

9. Янюшкин А.С., Архипов П.В., Ереско С.П. Качество поверхности твердого сплава при комбинированном электроалмазном шлифовании с непрерывной правкой круга // Научные технологии в машиностроении. 2012. № 5. С. 26-31.

10. Янюшкин А.С., Лобанов Д.В., Рычков Д.А., Попов В.Ю., Сурьев А.А., Архипов П.В., Лосев Е.Д., Яковец А.В., Черемных А.С. Конструкция катода для правки круга при комбинированной электроалмазной обработке: пат. 2446039. Рос. Федерация № 2004109804; заявл. 30.03.04; опубл. 27.03.2012. Бюл. № 21.

### References

1. Lobanov D.V., Yanyushkin A.S., Rychkov D.A., Petrov N.P. Tool maintenance organization in the processing of composite materials // STIN. 2010. № 11. P. 2 – 4.
2. Lobanov D.V., Yanyushkin A.S. Preparation of the cutting tool for processing the composite materials: monogr. Bratsk: Izd-vo BrGU, 2011. 191p.
3. Lobanov D.V., Yanyushkin A.S. Technology of tool support production for composite nonmetallic materials: monogr. Stary Oskol: Izd-vo TNT, 2012. 296 p.
4. Yanyushkin A.S., Popov V.Y., Petrov N.P., Rychkov D.A. Increasing efficiency in the processing of high-composite material // Trudy Bratskogo gosudarstvennogo universiteta. Ser. Estestvennye i inzhenernye nauki. 2013. Vol. 1. P. 146 – 149.
5. Lobanov D.V., Yanyushkin A.S. Impact of sharpening methods on the quality of carbide tools for processing the composite materials // Vestn. mashinostroeniya. 2011. № 3. P. 50 – 53.
6. Yanyushkin, A.S. Popov V.Y., Vasiliev E.V., Popov A.Y. Combined electric-and-diamond processing of the tool steels: monogr. Bratsk: BrGU, 2009. 228 p.
7. Yanyushkin A.S. Electric-and-diamond technology of sharpening cutting tools and methods of its realization: monogr. Stary Oskol: Izd-vo TNT, 2013. 336 p.
8. Soler Ya.I. Kazimirov D.Y., Prokopeva A.V. Optimization of the process of high-speed grinding plates by using a tool from CBN on the criteria of accuracy of the surface shape // Metalloobrabotka. 2006. № 5-6. P. 21 – 24.
9. Yanyushkin A.S. Arkhipov P.V., Eresko S.P. Quality carbide surface when combined with continuous electric-and-diamond grinding with wheel dressing // Nauchnye tehnologii v mashinostroenii. 2012. № 5. P. 26 – 31.
10. Yanyushkin A.S., Lobanov D.V. Rychkov D.A. Popov, V.Y., Surev A.A. Arkhipov P.V., Losev E.D., Yakovets A.V. Chermnykh A.S. Cathode design for wheel dressing with combined electric-and-diamond processing // pat. № 2446039. Rus. Federation. № 2004109804; decl. 30.03.04; publ.27.03.2012 Bul. № 21.

