

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ИЗГОТОВЛЕНИЯ И ВЫБОРА РЕЖУЩЕГО ИНСТРУМЕНТА ДЛЯ ФРЕЗЕРОВАНИЯ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ПОЛИМЕРНОЙ ОСНОВЕ

Д.В. Лобанов, А.С. Янюшкин, Д.А. Рычков

Обработка резанием композиционных неметаллических материалов обладает рядом особенностей, отличающих ее от аналогичной обработки металлов, возрастают требования к износостойкости и качеству режущего инструмента. Применяемые в настоящее время инструменты и режимы обработки очень часто не позволяют обеспечить требуемого качества изделий. Для решения этих проблем нами разработан комплекс мероприятий, направленных на повышение эффективности применения режущих инструментов для обработки композиционных материалов. Разработана методика моделирования сборного фрезерного инструмента для обработки композиционных материалов, позволившая математически описать конструктивные и геометрические особенности, определить характер структурных связей в системе инструмента. Предложена методика многокритериального сравнительного анализа конструктивных решений инструмента для выбора рациональной конструкции при варьируемых условиях сопоставимости. Создан программный комплекс формирования базы данных сборного фрезерного инструмента для обработки композиционных неметаллических материалов и выбора рациональной конструкции в одном программном приложении. Спроектированы новые конструкции сборного фрезерного инструмента, увеличивающие его технологические возможности, снижающие расход инструментальных материалов, простои, связанные с переналадкой инструмента и его заменой при потере режущей способности и отличающиеся повышенной точностью и надежностью при обработке композиционных материалов. Разработана физико-математическая модель процессов деформации, повреждения и разрушения инструментальных материалов типа *WC-Co* при алмазном затачивании на основе теоретических положений механики повреждаемых твердых сред. Установлены закономерности влияния комбинированных методов электроалмазной обработки на экономические и качественные параметры обработки. Научно обоснованы технологические режимы, позволяющие с гарантированным качеством затачивать твердосплавные режущие инструменты комбинированным методом электроалмазной обработки. Исследован процесс обработки композиционных неметаллических материалов инструментом, подготовленным с учетом рекомендаций по созданию, изготовлению и анализу конструктивных решений. Экспериментально обоснованы геометрические параметры инструмента и режимы, гарантирующие высокое качество обработки композиционных материалов на полимерной основе.

Ключевые слова: композиционные материалы, обработка, инструмент.

Введение. Развитие современной промышленности неразрывно связано с использованием в качестве конструкционных материалов неметаллических композитов, обладающих высокими физико-механическими характеристиками в сочетании с меньшей массой и стоимостью в сравнении с традиционными металлическими материалами. Наполнители и связующие в неметаллических композиционных материалах зачастую более доступны и не требуют использования дорогостоящего сырья, что позволяет рационально использовать природные ресурсы. Широко развивается индустрия создания новых композиционных неметаллических материалов с широкой гаммой свойств, отвечающих требованиям, предъявляемым к готовым изделиям и конструкциям в разных отраслях промышленности (машиностроение, авиастроение, судостроение, вагоностроение, строительство, автомобильная, мебельная промышленность и т. д.).

Обработка резанием композиционных неметаллических материалов обладает рядом особенностей, отличающих ее от аналогичной обработки металлов. Эти особенности объясняются ха-

рактерными свойствами и структурой обрабатываемых материалов, следовательно, прямой перенос закономерностей процесса резания металлов на эти материалы недопустим, несмотря на непрерывное совершенствование технологий в области обработки материалов [1–4]. Специфические свойства композиционных неметаллических материалов вызывают трудности при изготовлении изделий из них с применением режущего инструмента, возрастают требования к износостойкости и качеству подготовки инструмента. Применяемые в настоящее время инструменты и режимы обработки не позволяют обеспечить требуемого качества изделий. Режущий инструмент интенсивно изнашивается, теряет свою работоспособность, в результате чего возрастают затраты на его эксплуатацию. Такие трудности значительно снижают долю механической обработки при изготовлении деталей из современных композиционных материалов, что ограничивает область их применения.

Известные исследования режущих инструментов для обработки композитов носят фрагментарный характер и не сведены к формированию четких рекомендаций по выбору инструмента для обработки композиционных неметаллических материалов [5, 6]. Требуется создание эффективного инструмента, обладающего высокой работоспособностью, расширенными технологическими возможностями с учетом специфических геометрических особенностей инструмента для обработки композиционных неметаллических материалов. Таким требованиям могли бы отвечать сборные конструкции инструментов, оснащенные инструментальными материалами с повышенными эксплуатационными свойствами, однако и их использованию при обработке композиционных неметаллических материалов также не уделено должное внимание. В то же время, такой инструмент обладает множеством вариантов конструктивных исполнений, что повышает его адаптивность. В связи с этим, актуальными становятся проблемы моделирования и математического описания конструкций сборных режущих инструментов, многокритериального выбора конструктивных решений для варьируемых производственных условий, автоматизации труда конструкторов и технологов на предприятиях, занимающихся обработкой изделий из композиционных неметаллических материалов.

Применение в конструкциях режущего инструмента инструментальных материалов, обладающих высокими эксплуатационными характеристиками, ограничено в связи с трудностями, связанными с эффективным формообразованием режущего лезвия и рабочих поверхностей со специфической для обработки композиционных неметаллических материалов геометрией и повышенными требованиями к качеству их формирования. Качественно сформированное лезвие может значительно повысить ресурс инструмента в процессе резания. Традиционные способы обработки высокопрочных и труднообрабатываемых материалов малоэффективны и не позволяют достигнуть гарантированного качества режущих лезвий инструмента [2, 3, 8].

Дальнейшее совершенствование технологии обработки композиционных неметаллических материалов лезвийным инструментом сдерживается недостаточной изученностью перечисленных проблем. Появляется необходимость в исследовании методов повышения эффективности использования режущего инструмента на операциях механической обработки, создания новых конструктивных решений, обладающих высокими эксплуатационными характеристиками, рациональных условий их эксплуатации с обеспечением требуемого качества изготавливаемой продукции из композиционных неметаллических материалов. В связи с этим нами предлагается система научно обоснованных технических и технологических решений, позволяющих повысить эффективность фрезерного инструмента для обработки композиционных неметаллических материалов и расширить область применения изделий из них.

1. Методика проведения исследований. Теоретические исследования выполнены на основе теории графов, теоретической механики, сопротивления материалов и программирования. Экспериментальные исследования выполнены с использованием современных систем обработки данных и планирования эксперимента.

При моделировании напряженно-деформированного состояния определяющее уравнение повреждаемой среды сформулировано с использованием модели Джонсона–Холквиста. Параметр поврежденности среды вычислялся путем суммирования приращений на дискретных интервалах времени, соответствующих шагу интегрирования. В качестве критерия пластичности использовано условие Мизеса.

Для проведения лабораторных исследований по обработке композиционных материалов в качестве инструментальных материалов выбраны вольфрамокобальтовые и безвольфрамовые твердые сплавы следующих марок: ВК15, ВК8, ВК3М, ТН20, поскольку они имеют высокую прочность, теплостойкость, твердость и рекомендуются для обработки высокопрочных композиционных материалов [7–10]. Исследования проводились на операции фрезерования стеклотекстолита СТЭФ-1. При его изготовлении используется мелкаячеистая стеклоткань, что позволяет получать детали мелких размеров, а стоимость СТЭФ-1 ниже, чем у аналогичных марок стеклотекстолита при тех же значениях прочностных характеристик.

В соответствии с рекомендациями, при обработке композиционных материалов рационально применять фрезерный инструмент, у которого угол заострения $\beta = 50...60^\circ$, передний угол $\gamma = 20...30^\circ$ и задний угол $\alpha = 10...20^\circ$ [7, 8]. В данной работе исследования проводились с использованием фрезы с углом заострения $\beta = 53^\circ$, передним углом $\gamma = 25^\circ$ и задним углом $\alpha = 12^\circ$. Для повышения вариативности геометрических параметров инструмента и оснащения его различными марками инструментальных материалов использованы новые конструктивные решения инструментов, разработанные на кафедре «Технология машиностроения» БрГУ [11–13].

Обработка стеклотекстолита СТЭФ-1 проводилась на экспериментальном стенде на базе станка модели 3Д642Е, дополнительно оснащенном гидроприводом для автоматизации движения подачи, со специальной оснасткой для базирования заготовки, вытяжным устройством для удаления пыли и стружки и модернизированным в направлении увеличения скорости резания приводом главного движения [7, 8, 14]. Осуществлялось встречное фрезерование стеклотекстолита с варьированием режимов резания: глубина резания $t = 0,5...1,5$ мм, подача на зуб $S_z = 0,16...0,33$ мм/зуб, скорость резания $V = 46...48$ м/с. Диапазоны варьирования выбраны в соответствии с результатами предварительных исследований и рекомендаций по обработке композиционных материалов [8, 14]. При исследовании работоспособности инструмента за критерий технологической стойкости режущего инструмента принята ширина фаски износа по задней поверхности $h_3 = 0,35$ мм, дальнейшее увеличение которой ведет к ухудшению качества обработанной поверхности и росту мощности резания. Износ фиксировался с использованием оптической микроскопии через определенные промежутки времени.

Лабораторные испытания качественных и количественных характеристик методов затачивания проводились с применением пластин твердых сплавов марок ТН20, ВК15, ВК8, ВК6, ВК6М, ВК3М. В качестве формообразующего инструмента использовался алмазный круг на металлической связке, имеющий следующие характеристики: форма круга – 12А2-45, типоразмер – $150 \times 10 \times 3 \times 40 \times 32$, марка алмазов – АС6, связка – М1-01, зернистость – 100/80, относительная концентрация алмазов в алмазоносном слое – 100 %. Затачивание твердосплавных пластин проводилось на заточном станке модели 3Д642Е, модернизированном под процессы комбинированного электроалмазного шлифования с одновременной правкой круга и травлением поверхности детали при помощи специального устройства [15–18]. При этом применялся электролит, представляющий 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 настоящей работе исследовалась зависимость удельного расхода круга и шероховатости обработанной поверхности от электрических параметров комбинированного электроалмазного затачивания: плотности тока правки круга $i_{\text{пр}}$ и плотности тока травления детали $i_{\text{тр}}$.

Значения плотности тока травления и плотности тока правки круга варьировались в следующих пределах: $i_{\text{пр}} = 0...0,06$ А/см², $i_{\text{тр}} = 0...4,0$ А/см². Механические режимы обработки следующие: $S_{\text{пр}} = 1,5$ м/мин; $S_{\text{поп}} = 0,02$ мм/дв.ход; $V = 19,6$ м/с [8].

Формирование режущей кромки твердосплавных пластин осуществлялось обработкой образцов по передней и задней поверхностям с образованием угла заострения $\beta = 55^\circ$, в результате чего для каждой марки твердого сплава получено по 4 образца, заточенных разными способами алмазного шлифования: без электрохимии ($i_{\text{пр}} = 0$ А/см², $i_{\text{тр}} = 0$ А/см²), с правкой круга ($i_{\text{пр}} = 0,06$ А/см², $i_{\text{тр}} = 0$ А/см²), с травлением детали ($i_{\text{пр}} = 0$ А/см², $i_{\text{тр}} = 4,0$ А/см²) и комбинированным ($i_{\text{пр}} = 0,06$ А/см², $i_{\text{тр}} = 4,0$ А/см²) [8].

2. Мероприятия по повышению эффективности применения режущего инструмента.

Для оценки конструктивных решений режущих инструментов необходима их систематизация, которая осуществляется в настоящем исследовании на основе моделирования с использованием

теории графов. На примере сборного фрезерного инструмента построена обобщенная графовая модель и выявлены основные характеристики, позволяющие описать любую конструкцию режущего инструмента. Фреза рассматривается как совокупность структурных, геометрических, конструктивных и эксплуатационных характеристик, объединенных в трех основных частях: режущей (X_1), корпусной (X_2) и крепежной (X_3), каждая из которых описывает присущие ей параметры (рис. 1).



Рис. 1. Графовая модель конструкции фрезерного инструмента

Разбив графовую структуру на ряд связанных между собой таблиц, среди которых выделяется главная, определяющая дальнейшие связи, можно построить информационную базу данных режущих инструментов посредством программного обеспечения [7, 8, 19–21]. Оно обеспечивает работу с базой данных, не предполагая прямого взаимодействия пользователя с таблицами, и представляет собой инструмент для ввода данных.

Для оценки целесообразности применения режущего инструмента в зависимости от производственных условий проводится сравнительный анализ конструкторских решений по методике, позволяющей выявить рациональную конструкцию инструмента в зависимости от требований по его работоспособности, производительности обработки, качеству обработанной поверхности и экономичности [7, 10, 19–21].

Одним из параметров, влияющих на значения перечисленных критериев, является период стойкости инструмента. Сложность определения этой величины заключается в том, что затруднительно получить достоверное значение при варьировании обрабатываемого и инструментального материалов без проведения экспериментов и разработки математической модели, что приводит к неоправданным затратам времени и средств. Поэтому нами создана методика, позволяющая произвести расчет периода стойкости режущего инструмента с учетом различных факторов процесса резания. При этом в системе «режущий инструмент – деталь» значительное влияние на режущий клин инструмента оказывают составляющие силы резания и силы трения, возникающие при контакте инструмента и детали. Сопrotивление инструмента этим силам зависит от свойств как обрабатываемого, так и инструментального материалов. На величину составляющих силы резания оказывают влияние режимы резания, а также конструктивные и геометрические особенности инструмента.

Имея в качестве исходных данных результаты исследований стойкости инструмента при определенном сочетании инструментального и обрабатываемого материалов, можно представить расчетный период стойкости режущего инструмента при любом другом сочетании материалов в виде:

$$T = T_{\Sigma} \cdot K_T, \text{ мин,}$$

где T_{Σ} – период стойкости инструмента, полученный экспериментально при известном сочетании материалов, мин; K_T – коэффициент изменения периода стойкости, зависящий от свойств инструментального и обрабатываемого материалов, исследуемых и полученных экспериментально.

$$K_T = K_E \cdot K_{ТВ} \cdot K_{пр} \cdot K_{изг} \cdot K_{сж},$$

где K_E – коэффициент, учитывающий изменение величины модуля упругости инструментального материала в сравнении с ранее исследованным; $K_{ТВ}$ – коэффициент, учитывающий влияние твердости инструментального и обрабатываемого материалов в расчетной системе «инструмент – деталь» и системе, в которой получен экспериментальный период стойкости; $K_{пр}$ – коэффициент, учитывающий отношение прочности на сжатие к прочности на изгиб в инструментальном материале; $K_{изг}$ – коэффициент, учитывающий сопротивление инструментального материала изгибающим усилиям при резании; $K_{сж}$ – коэффициент, учитывающий сопротивление инструментального материала сжимающим усилиям при резании.

Каждый коэффициент определяется в зависимости от параметров механической обработки и рекомендаций по геометрии режущей части инструмента.

Следующим критерием, который учитывается при выборе оптимальной конструкции фрезерного инструмента, является производительность обработки, которая определяется по формуле:

$$П = S_z \cdot z \cdot t \cdot b \cdot \frac{V}{\pi \cdot D_{фр}}, \text{ м}^3/\text{мин,}$$

где S_z – подача на зуб, м/зуб; z – число режущих элементов; t – глубина резания, м; b – ширина режущих элементов, м; V – скорость резания, м/мин; $D_{фр}$ – диаметр резания, м.

Другим параметром, влияющим на выбор оптимальной конструкции инструмента, является качество обработанной поверхности, определяющим фактором которого является шероховатость. В данном случае для упрощения расчетов можно определять высоту микронеровностей h , которая математически выражается функцией:

$$h = f(S_z, t, V, z), \text{ м.}$$

Методика сравнительного анализа конструкций режущих инструментов включает в себя оценку экономической целесообразности применения определенного вида инструмента и его конструктивных особенностей для задаваемых условий производства. Экономичность конструкции зависит от многих параметров, учитывающих стоимость инструмента, его качество и целесообразность применения в каждом конкретном случае. Для оценки этого параметра по каждой конструкции режущего инструмента определяются приведенные затраты по формуле:

$$ПЗ = \frac{C_{фр} + N_{рем} \cdot C_{рем} + Ц_{ок} + (t_{з.п} + t_{уст}) \cdot C_{ч} \cdot i}{T \cdot z \cdot i}, \text{ руб./мин,}$$

где $C_{фр}$ – стоимость фрезы, руб.; $N_{рем}$ – число перестановок или ремонта режущих элементов; $C_{рем}$ – цена ремонта режущих элементов, руб.; $Ц_{ок}$ – цена одного комплекта режущих элементов, руб.; $t_{з.п}$ – время на заточку одной фрезы, поворот или замену пластин; $t_{уст}$ – время на установку фрез и настройку станка, ч; $C_{ч}$ – часовая ставка рабочего, руб./ч; T – период стойкости режущей кромки инструмента, мин; z – число режущих элементов; i – допустимое число переточек режущих элементов или поворотов режущих пластин.

Методика сравнительного анализа реализована в программном модуле, где в диалоговом режиме предлагается задать обрабатываемый материал, критерии для расчета и режимы резания. В зависимости от введенной информации производится расчет, результат которого выводится в нижней части диалогового окна в виде информации об оптимальном варианте конструкции режущего инструмента с описанием его номера в базе данных, стоимости и конструктивного исполнения режущей части. Информационную основу расчетов составляют: база данных, составленная на основе моделирования конструкций режущего инструмента и база знаний программы, которая содержит свыше 100 марок инструментальных материалов и 500 различных конструктивных и композиционных обрабатываемых материалов, имеет возможность редактирования и обновления при появлении новых сведений [19].

Для увеличения технологических возможностей режущего инструмента и повышения адаптивности при изменяющихся условиях обработки, снижения расхода инструментальных мате-

риалов и простое, связанных с переналадкой инструмента и его заменой при потере режущей способности, нами предложены новые конструктивные решения инструментов, позволяющие повысить качество выпускаемой продукции и эффективность производства [11–13].

При подготовке к работе режущего инструмента для обработки композиционных неметаллических материалов значение имеет качество формирования режущего лезвия, сведение к минимуму дефектов, особенно вблизи режущей кромки. Кроме того, существенным фактором, влияющим на износостойкость инструмента, является уровень остаточных напряжений на поверхностях инструмента и в приповерхностных слоях. Практический интерес представляет изучение закономерностей формирования напряженно-деформированного состояния в элементах режущего инструмента для обработки композиционных неметаллических материалов, оснащенного высокопрочными инструментальными материалами, при затачивании алмазным кругом. Для исследования формирования напряженно-деформированного состояния в зоне затачивания пластины из твердого сплава создана вычислительная модель, разработанная в рамках подхода механики повреждаемых сред [7, 8].

Модель позволяет проводить оценку формирующегося при затачивании напряженно-деформированного состояния в обрабатываемой пластине и может быть адаптирована при необходимости для других композиционных высокопрочных и труднообрабатываемых материалов. Таким образом, имеется возможность оценить напряженно-деформированное состояние при различных сочетаниях абразивного инструмента и обрабатываемых композиционных материалов.

Анализ численных исследований режущего элемента, выполненных на основе модели, позволил выявить следующее. Зоной опасных, с точки зрения разрушений, напряжений является контактная площадка затачиваемой поверхности с абразивным инструментом. С удалением от режущей кромки на величину, превышающую вдвое размер контактирующих поверхностей, напряжения постепенно затухают и не представляют в дальнейшем опасности с точки зрения возникновения серьезных дефектов. При силах резания до 100 Н серьезных разрушений режущей кромки не наблюдается. Зонами наибольшей концентрации напряжений являются участки по краям режущей кромки, где могут проследиваться частичные разрушения твердого сплава. При достижении сил резания свыше 100 Н наблюдается разрушение режущей кромки на протяжении всей длины лезвия. Для затачивания алмазным абразивным инструментом режущих элементов из инструментальных материалов (WC-Co), имеющих специфические геометрию и габаритные размеры, присущие для инструмента, обрабатывающего композиционные неметаллические материалы, рекомендуется устанавливать скорости резания в пределах от 33 до 45 м/с.

Анализ данных по распределению параметра поврежденности в обрабатываемой пластине свидетельствует о том, что при температуре 1000 °С критические условия для возникновения микроповреждений в приповерхностных слоях возникают при более низких силах резания, чем при температуре 430 °С.

Для достижения удовлетворительного качества подготовленных режущих поверхностей и лезвия инструмента для обработки композиционных материалов из твердых сплавов необходимо применять методы и условия обработки, гарантирующие силы резания, не превышающие 100 Н. Согласно результатам предварительных исследований сил резания при различных методах затачивания твердосплавного инструмента, таким требованиям отвечают современные комбинированные методы электроалмазной обработки [7, 8, 22–24]. Такие методы шлифования способны повысить эффективность формообразования режущих элементов инструментов для обработки композиционных материалов за счет сочетания механического резания с электрохимическими и электрофизическими процессами.

Для выявления особенностей комбинированного алмазного шлифования проведены лабораторные исследования, по результатам которых получены зависимости удельного расхода круга q (рис. 2) и шероховатости R_a (рис. 3) от плотности тока правки и плотности тока травления при затачивании твердых сплавов.

Удельный расход круга (рис. 2) с повышением электрических режимов обработки увеличивается вследствие растравливания образовавшегося засаленного слоя и связки алмазного круга и при максимальных значениях плотности тока правки и плотности тока травления ($i_{тр} = 4 \text{ А/см}^2$; $i_{пр} = 0,06 \text{ А/см}^2$) составляет не более $2,3 \text{ мм}^3/\text{мм}^3$.

Шероховатость обработанной поверхности в большей степени зависит от плотности тока травления детали (рис. 3), поскольку электрохимическое разупрочнение поверхности способст-

ует сглаживанию микронеровностей. В этом случае наименьшая шероховатость наблюдается при комбинированном методе электроалмазного шлифования с одновременным разупрочнением поверхности обрабатываемой заготовки и правкой алмазного круга.

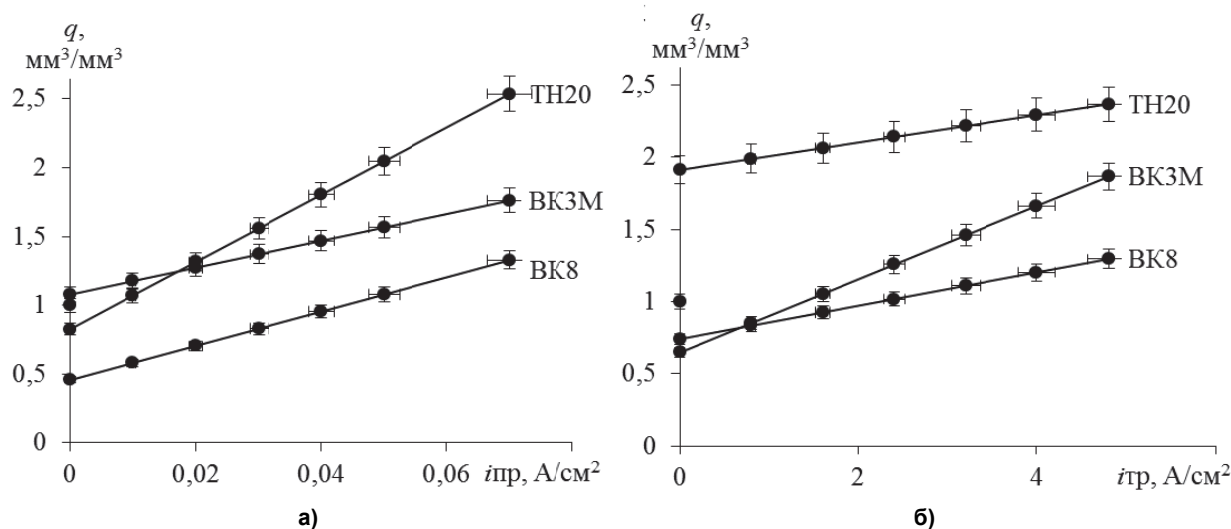


Рис. 2. Зависимость удельного расхода алмазного круга от плотности тока правки при $i_{гр} = 4 \text{ A/cm}^2$ (а) и плотности тока травления при $i_{пр} = 0,06 \text{ A/cm}^2$ (б)

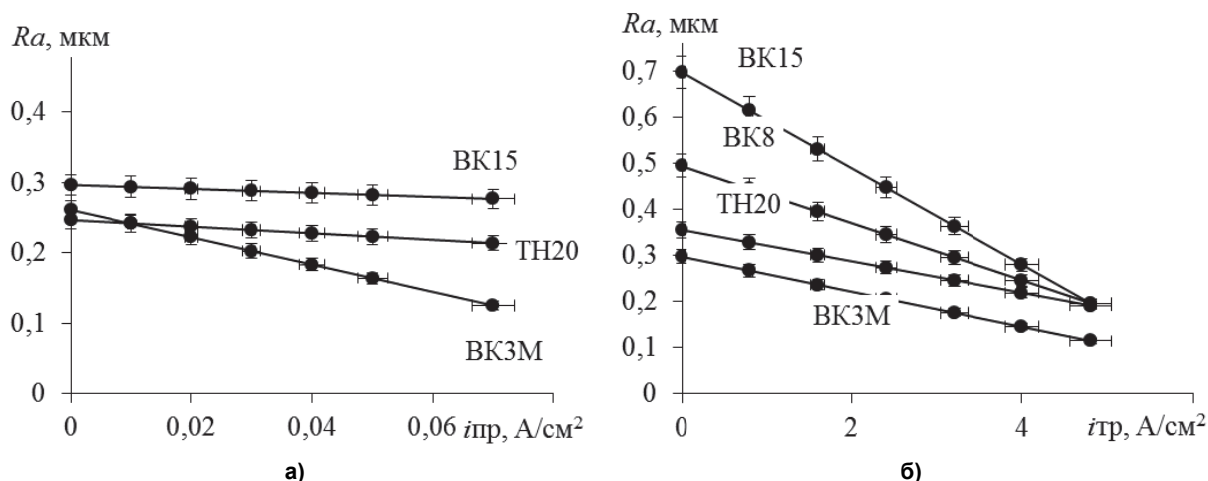


Рис. 3. Зависимость шероховатости обработанной поверхности от плотности тока правки при $i_{гр} = 4 \text{ A/cm}^2$ (а) и плотности тока травления при $i_{пр} = 0,06 \text{ A/cm}^2$ (б)

После затачивания режущих инструментов, оснащенных твердыми сплавами, проводились испытания их работоспособности в условиях обработки композиционных материалов [14, 25]. Уже на начальных этапах исследований стойкости инструменты, оснащенные твердым сплавом марки TH20 показали невысокие стойкостные характеристики, в связи с чем в дальнейших исследованиях не использовались. Статистический анализ экспериментальных данных позволил получить математические зависимости периода технологической стойкости инструмента от величины подачи на зуб S_z и глубины резания t при максимально допустимой оборудованном скоростью резания:

$$\text{для BK8: } T = 0,82 \cdot S_z^{4,75+2,94 \ln S_z + 2,38 \ln t} \cdot t^{0,46+1,13 \ln t}, \text{ мин};$$

$$\text{BK15: } T = 0,66 \cdot S_z^{2,08+1,11 \ln S_z + 3,02 \ln t} \cdot t^{2,54+0,65 \ln t}, \text{ мин};$$

$$\text{BK3M: } T = 0,64 \cdot S_z^{3,49+2,42 \ln S_z + 3,44 \ln t} \cdot t^{2,05+1,04 \ln t} \text{ мин.}$$

Для оценки влияния факторов на величину периода стойкости инструментов, оснащенных различными марками твердых сплавов, рассмотрим частные случаи, когда один из факторов является постоянным (рис. 4).

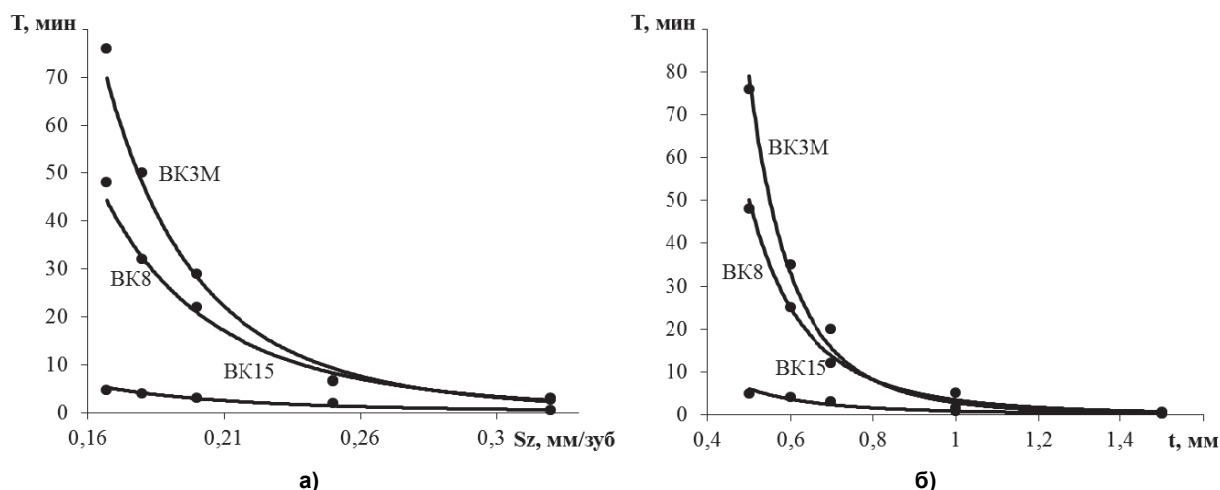


Рис. 4. Зависимость периода стойкости фрез от подачи на зуб при $t = 0,5$ мм (а); глубины резания при $S_z = 0,16$ мм/зуб (б)

Оснащение режущего инструмента твердым сплавом BK15 приводит к низкой работоспособности фрезы при обработке композиционного материала СТЭФ-1. При $S_z = 0,16$ мм/зуб и $t = 0,5$ мм период стойкости составляет около 10 мин.

При обработке композита СТЭФ-1 инструментом, оснащенный твердым сплавом BK8 с режимами: $S_z = 0,16$ мм/зуб и $t = 0,5$ мм, период стойкости режущего инструмента составил порядка 50 мин.

Обработка инструментом, оснащенным твердым сплавом BK3M, при $S_z = 0,16$ мм/зуб и $t = 0,5$ мм показывает лучший результат по сравнению с другими материалами. Период стойкости в этих условиях составил порядка 76 мин.

Увеличение подачи S_z и глубины резания t приводит к резкому снижению работоспособности режущего инструмента, даже при оснащении твердыми сплавами BK3M и BK8 [8].

3. Выводы

1. Разработаны теоретические положения и научно обоснованная методика моделирования и систематизации сборного фрезерного инструмента для обработки композиционных материалов, позволившие математически описать конструктивные и геометрические особенности, определить характер структурных связей в системе инструмента.

2. Предложена методика многокритериального сравнительного анализа конструктивных решений инструмента для выбора рациональной конструкции при варьируемых условиях сопоставимости. Создан программный комплекс формирования базы данных сборного фрезерного инструмента для обработки композиционных неметаллических материалов и выбора рациональной конструкции в одном программном приложении.

3. Спроектированы новые конструкции сборного фрезерного инструмента, увеличивающие его технологические возможности, снижающие расход инструментальных материалов, простои, связанные с переналадкой инструмента и его заменой при потере режущей способности и отличающиеся повышенной точностью и надежностью при обработке композиционных материалов.

4. Разработана физико-математическая модель процессов деформации, повреждения и разрушения инструментальных материалов типа *WC-Co* при алмазном затачивании на основе теоретических положений механики повреждаемых твердых сред. Реализована возможность оценки формирующегося при алмазном затачивании напряженно-деформированного состояния в затачиваемой пластине с определенными размерными и геометрическими параметрами при различных сочетаниях абразивного инструмента и обрабатываемых инструментальных материалов; разных скоростях и силах резания; в условиях изменения температур в зоне резания. Выявлено при анализе результатов численного моделирования, что для качественного затачивания твердосплавного режущего инструмента рекомендованы комбинированные методы электроалмазного шлифования.

5. Установлены закономерности влияния комбинированных методов электроалмазной обработки на экономические и качественные параметры обработки.

6. Разработаны рекомендации по модернизации технологического оборудования под процессы комбинированной электроалмазной обработки, выбору абразивного инструмента и технологических сред.

7. Исследован процесс обработки композиционных неметаллических материалов инструментом, подготовленным с учетом рекомендаций по созданию, изготовлению и анализу конструктивных решений.

8. Экспериментально обоснованы геометрические параметры инструмента и режимы, гарантирующие высокое качество обработки композиционных материалов на полимерной основе.

4. Обсуждение и применение. Дальнейшее развитие тематики исследования предполагает изучение обрабатываемости резанием широкой гаммы современных российских и зарубежных композиционных материалов: полимерных, древесных, углерод-углеродных, керамических и металлических. Планируется изучить особенности, производительность и качество обработки изделий из композиционных материалов инструментом, оснащенным широкой гаммой высокопрочных, износостойких инструментальных материалов, выпускаемых отечественной и зарубежной промышленностью.

Исследования условий получения качественных режущих элементов комбинированными методами электроалмазной обработки ведут к необходимости создания модели режущего клина инструмента как в процессе его формирования, так и в процессе обработки им композиционных материалов с учетом всех влияющих факторов, что является перспективой развития тематики исследования.

Методика моделирования сборного инструмента для обработки композиционных материалов, представленная в работе на примере одного из видов инструмента – фрезерного, в результате дальнейших исследований может быть адаптирована под другие виды сборных инструментов. Это расширит возможности реализации методик, представленных в работе, и созданного на их основе программного обеспечения для формирования, хранения и использования информационной базы данных по видам сборного инструмента.

Для более широкой оценки и анализа конструкции режущего инструмента при варьируемых условиях сопоставимости целесообразно введение в представленную в работе методику большего числа факторов и характеристик. Это позволит оперативно реагировать на вероятностные изменения в условиях и методах обработки изделий разной номенклатуры и типоразмеров на любом виде технологического оборудования.

Становится актуальной задача исследования таких операций механической обработки композитов как сверление, зенкерование, развертывание, внутреннее и наружное точение и другие. Это даст возможность оптимизировать процессы получения деталей любой конфигурации, что значительно расширит область применения изделий из композиционных материалов.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации в рамках Федеральной целевой программы по проекту № 927 «Разработка теоретических основ контактного взаимодействия при обработке новых нанопропрочненных материалов».

Литература

1. Malikov, A.A. Cutting and plastic deformation in the shaving and rolling of cylindrical gears with round teeth / A.A. Malikov, A.V. Sidorkin, A.S. Yamnikov // *Russian Engineering Research*. – 2013. – No. 6. – P. 363–366.
2. Mokritskii, B.Y. Effective manufacture of a cutting tool for specific operating conditions / B.Y. Mokritskii, A.M. Shpilev // *Russian Engineering Research*. – 2013. – No. 1. – P. 39–45.
3. Acoustic assessment of tool quality / B.Y. Mokritskii, A.M. Shpilev, D.A. Pustovalov et al. // *Russian Engineering Research*. – 2013. – No. 2. – P. 74–78.
4. Matolygin, A.A. Computer simulation of deformation of two-component compacts under liquid-phase sintering / A.A. Matolygin, V.A. Skripnyak // *Russian Physics Journal*. – 1999. – No. 3. – P. 299–303.
5. Mokritskii, B.Y. Control of tool performance by means of coatings / B.Y. Mokritskii // *Russian Engineering Research*. – 2011. – No. 2. – P. 164–167.
6. Senichev, A.N. Cutting conditions in deep diamond grinding of aluminum alloys / A.N. Senichev, V.N. Kiselev, A.S. Yamnikov // *Russian Engineering Research*. – 2011. – No. 5. – P. 502–504.

7. Лобанов, Д.В. Подготовка режущего инструмента для обработки композиционных материалов: моногр. / Д.В. Лобанов, А.С. Янюшкин. – Братск: БрГУ, 2011. – 192 с.
8. Лобанов, Д.В. Технология инструментального обеспечения производства изделий из композиционных неметаллических материалов: моногр. / Д.В. Лобанов, А.С. Янюшкин. – Старый Оскол: Тонкие наукоемкие технологии, 2012. – 296 с.
9. Лобанов, Д.В. Организационно-технологическая подготовка инструмента для обработки композиционных неметаллических материалов / Д.В. Лобанов, А.С. Янюшкин // *Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии*. – 2012. – № 2-2 (292). – С. 17–23.
10. Лобанов, Д.В. Анализ конструктивных решений фрезерного сборного инструмента для обработки композиционных материалов / Д.В. Лобанов, А.С. Янюшкин // *Технология машиностроения*. – 2011. – № 5. – С. 20–25.
11. Пат. 2228261 Российская Федерация. Сборная фреза для деревообработки / А.С. Янюшкин, Д.В. Лобанов; заявитель и патентообладатель БрГУ. – № 2002117387/02, заявл. 28.06.2002; опубл. 10.05.2004. – 4 с.
12. Пат. 2257289 Российская Федерация. Сборная фреза для деревообработки / А.С. Янюшкин, Д.В. Лобанов, А.М. Кузнецов; заявитель и патентообладатель БрГУ. – № 2004109804/02, заявл. 30.03.2004; опубл. 27.07.2005, Бюл. 21. – 5 с.
13. Пат. 2325272 Российская Федерация. Сборная фреза для деревообработки / А.С. Янюшкин, Д.В. Лобанов, А.А. Сурьев и др.; заявитель и патентообладатель БрГУ. – № 2006124008/03, заявл. 04.07.2006; опубл. 27.05.2008, Бюл. 15. – 4 с.
14. Особенности фрезерования полимерных композиционных материалов / А.С. Янюшкин, Д.А. Рычков, Д.В. Лобанов и др. // *Системы. Методы. Технологии*. – 2013. – № 2. – С. 88–90.
15. Пат. 2446039 Российская Федерация. Конструкция катода для правки круга при комбинированной электроалмазной обработке / А.С. Янюшкин, Д.В. Лобанов, Д.А. Рычков и др.; заявитель и патентообладатель БрГУ. – № 2010111574/02; заявл. 25.03.2010; опубл. 27.03.2012, Бюл. № 9. – 4 с.
16. Пат. 2304504 Российская Федерация. Метод автоматического управления процессом непрерывной электрохимической правки круга и устройство для его осуществления / А.С. Янюшкин, А.А. Сурьев, Р.А. Иващенко и др.; заявитель и патентообладатель БрГУ. – № 2005102264/02; заявл. 31.01.2005; опубл. 20.08.2007, Бюл. 23. – 7 с.
17. Архипов, П.В. Совершенствование оборудования под процессы комбинированной обработки / П.В. Архипов, Д.В. Лобанов, А.С. Янюшкин // *Вестник Таджик. техн. ун-та*. – 2013. – № 2 (22). – С. 32–37.
18. Янюшкин, А.С. Элементы модернизации станков шлифовальной группы под процессы электроалмазной обработки / А.С. Янюшкин, В.Ю. Попов, Р.А. Янюшкин // *Труды Братского гос. ун-та. Серия «Естественные и инженерные науки»*. – 2000. – Т. 1. – С. 189–190.
19. Лобанов, Д.В. Автоматизированная система создания баз данных и многокритериального сравнительного анализа конструкций сборного фрезерного инструмента для обработки композиционных материалов / Д.В. Лобанов, А.С. Янюшкин, Д.А. Рычков // *САПР и графика*. – 2011. – № 3. – С. 71–73.
20. Лобанов, Д.В. Повышение производительности фрезерования на основе автоматизации проектирования сборного инструмента / Д.В. Лобанов, А.С. Янюшкин, Д.А. Рычков // *Системы. Методы. Технологии*. – 2011. – № 2 (10). – С. 91–94.
21. *Optimal organization of tools for machining composites* / D.V. Lobanov, A.S. Yanyushkin, D.A. Rychkov, N.P. Petrov // *Russian Engineering Research*. – 2011. – No. 2. – P. 156–157.
22. *The effect of diamond tool performance capability on the quality of processed surface* / P.V. Arkhipov, A.S. Yanyushkin, D.V. Lobanov, S.I. Petrushin // *Applied mechanics and materials*. – 2013. – Vol. 379. – P. 124–130.
23. *Yanyushkin, A.S. Mechanism of Protective Membrane Formation on the Surface of Metal-Bonded Diamond Disks* / A.S. Yanyushkin, O.I. Medvedeva, N.A. Saprykina // *Applied Mechanics and Materials*. – 2014. – Vol. 682. – P. 327–331.
24. *Lobanov, D.V. Influence of sharpening on the quality of hard-alloy tools for the cutting of composite* / D.V. Lobanov, A.S. Yanyushkin // *Russian Engineering Research*. – 2011. – No. 3. – P. 236–239.
25. *Yuanyushkin, A.S. Surface quality of the fiberglass composite material after milling* / A.S. Yanyushkin, D.A. Rychkov, D.V. Lobanov // *Applied mechanics and materials*. – 2014. – Vol. 682. – P. 183–187.

Лобанов Дмитрий Владимирович. Доктор технических наук, профессор кафедры «Технология машиностроения», Братский государственный университет, mf_nauka@brstu.ru.

Янюшкин Александр Сергеевич. Доктор технических наук, профессор кафедры «Технология машиностроения», Братский государственный университет, yanyushkin@brstu.ru.

Рычков Даниил Александрович. Кандидат технических наук, доцент кафедры «Технология машиностроения», Братский государственный университет, dielektrik84@mail.ru.

Поступила в редакцию 14 ноября 2014 г.

*Bulletin of the South Ural State University
Series "Mechanical Engineering Industry"
2015, vol. 15, no. 1, pp. 35–46*

TECHNOLOGICAL MANUFACTURING METHODS AND SELECTION OF CUTTING TOOLS FOR MILLING OF COMPOSITE MATERIALS BASED ON POLYMERS

D.V. Lobanov, Bratsk State University, Bratsk, Russian Federation, mf_nauka@brstu.ru,

A.S. Yanyushkin, Bratsk State University, Bratsk, Russian Federation, yanyushkin@brstu.ru,

D.A. Rychkov, Bratsk State University, Bratsk, Russian Federation, dielektrik84@mail.ru

Machining of composite nonmetallic materials has several features that distinguish it from similar treatment of metals, increased requirements for durability and quality of the training tool. Currently used tools and modes of processing can't provide the required quality of the products. To solve these problems, we have developed a set of measures aimed at improving the efficiency of cutting tools for the processing of composite materials. The technique of modeling precast milling tools for machining of composite materials, which allowed mathematically describe the structural and geometrical characteristics, to determine the nature of the structural relationships in the system tool. The technique of multi-criteria comparative analysis of design solutions tool for selecting rational design at varying conditions of comparability. The program complex formation of databases collecting milling tools for machining of composite and non-metallic materials of choice in the rational design of a software application. Design new constructions of precast milling tool, enhancing its technological capabilities, reduces the cost of tool materials, downtime associated with the readjustment of the instrument and its replacement with the loss of cutting ability and characterized by high accuracy and reliability in the processing of composite materials. The physical and mathematical model of the processes of deformation, damage and time-violations tool materials such as WC-Co in diamond sharpening based on theoretical principles of mechanics damaged solid media. The regularities of the influence of the combined methods of electro diamond processing on economic and quality of the treatment. Scientifically based technological modes that enable guaranteed quality sharpening carbide cutting tools combined method electro diamond processing. The process of composite non-metallic materials processing tools, prepared with the advice on the creation, production and analysis of design solutions. Experimentally proved the geometric parameters of the tool and to ensure high quality processing of composite materials based on polymers.

Keywords: composite materials, machining, tool.

References

1. Malikov A.A., Sidorkin A.V., Yamnikov A.S. Cutting and Plastic Deformation in the Shaving and Rolling of Cylindrical Gears with Round Teeth. *Russian Engineering Research*, 2013, no. 6, pp. 363–366.
2. Mokritskii B.Y., Shpilev A.M. Effective Manufacture of a Cutting Tool for Specific Operating Conditions. *Russian Engineering Research*, 2013, no. 1, pp. 39–45.
3. Mokritskii B.Y., Shpilev A.M., Pustovalov D.A., Sablin P.A., Kirichek A.V. Acoustic Assessment of Tool Quality. *Russian Engineering Research*, 2013, no. 2, pp. 74–78.

4. Matolygin A.A., Skripnyak V.A. Computer Simulation of Deformation of Two-Component Compacts under Liquid-Phase Sintering. *Russian Physics Journal*, 1999, no. 3, pp. 299–303.
5. Mokritskii B.Y. Control of Tool Performance by Means of Coatings. *Russian Engineering Research*, 2011, no. 2, pp. 164–167.
6. Senichev A.N., Kiselev V.N., Yamnikov A.S. Cutting Conditions in Deep Diamond Grinding of Aluminum Alloys. *Russian Engineering Research*, 2011, no. 5, pp. 502–504.
7. Lobanov D.V., Yanyushkin A.S. *Podgorovka rezhushchego instrumenta dlya obrabotki kompozitsionnykh materialov* [Preparation of Cutting Tools for Machining Composite Materials]. Bratsk, BrSU Publ., 2011. 192 p.
8. Lobanov D.V., Yanyushkin A.S. *Tekhnologiya instrumentalnogo obespecheniya proizvodstva izdeliy is kompozitsionnykh materialov* [Technology Instrumental Support the Production of Products from Composite Nonmetallic Materials]. Stary Oskol, High technologies Publ., 2012. 296 p.
9. Lobanov D.V., Yanyushkin A.S. [Organizational and Technological Training Tool for Processing Composite Nonmetallic Materials]. *Fundamental and applied problems of engineering and technology*, 2012, no. 2-2 (292), pp. 17–23. (in Russ.).
10. Lobanov D.V., Yanyushkin A.S. [Analysis of Structural Precast Solutions Milling Tools for Machining Composite Materials]. *Engineering technology*, 2011, no. 5, pp. 20–25. (in Russ.)
11. Yanyushkin A.S., Lobanov D.V. *Sbornaya freza dlya derevoobraborki* [Built-Up Milling Cutter for Wood-Working]. Patent RF, no. 2228261, 2004.
12. Yanyushkin A.S., Lobanov D.V., Kuznetsov A.M. *Sbornaya freza dlya derevoobraborki* [Built-Up Milling Cutter for Wood-Working]. Patent RF, no. 2257289, 2005.
13. Yanyushkin A.S., Lobanov D.V., Suryev A.A., Kuznetsov A.M., Stalidzan M.V. *Sbornaya freza dlya derevoobraborki* [Prefabricated Cutter for WoodWork]. Patent RF, no. 2325272, 2008.
14. Yanyushkin A.S., Rychkov D.A., Lobanov D.V., Tkachenko E.V., Tkachenko N.A. [Features Milling Polymer Composites]. *Systems. Methods. Technologies*, 2013, no. 2, pp. 88–90.
15. Yanyushkin A.S., Lobanov D.V., Rychkov D.A., Popov V.Yu., Suryev A.A., Arkhipov P.V., Losev E.D., Yakovets A.V., Cheremnyh A.S. *Konstruktsiya katoda dlya pravki kruga pri kombinirovannoy elektroalmaznoy obrabotke* [Cathode for Wheel Dressing in Combined Electro Diamond Processing]. Patent RF, no. 2446039, 2012.
16. Yanyushkin A.S., Suryev A.A., Ivashenko R.A., Arkhipov P.V., Yakimov S.A., Losev A.B. *Metod avtomaticheskogo upravleniya protsessom nepreryvnoy elektrokhimicheskoy pravki kruga i ustroystvo dlya ego osushchestvleniya* [Automatic Control Method for Electrochemical Dressing of Grinding Wheel and Apparatus for Performing the Same]. Patent RF, no. 2304504, 2007.
17. Arkhipov P.V., Lobanov D.V., Yanyushkin A.S. [Improvement of Equipment under the Combined Treatment Processes]. *Bulletin of the Tajik Technical University*, 2013, no. 2 (22), pp. 32–37. (in Russ.)
18. Yanyushkin A.S., Popov V.Yu., Yanyushkin R.A. [The Elements of the Modernization of Machines Grinding Group Processes under Electro Diamond Processing]. *Proceedings of the Bratsk State University. Ser. Natural and engineering sciences*, 2000, vol. 1, pp. 189–190. (in Russ.)
19. Lobanov D.V., Yanyushkin A.S., Rychkov D.A. [An Automated System for Creating Databases and Multi-Criteria Analysis of Comparative Constructions Precast Milling Tool for Machining Composite Materials]. *CAD and Graphics*, 2011, no. 3, pp. 71–73. (in Russ.)
20. Lobanov D.V., Yanyushkin A.S., Rychkov D.A. [Increased Productivity Milling Based Design Automation Tool Precast]. *Systems. Methods. Technologies*, 2011, no. 2, pp. 156–157. (in Russ.)
21. Lobanov D.V., Yanyushkin A.S., Rychkov D.A., Petrov N.P. Optimal Organization of Tools for Machining Composites. *Russian Engineering Research*, 2011, no. 2, pp. 156–157.
22. Arkhipov P.V., Yanyushkin A.S., Lobanov D.V., Petrushin S.I. The Effect of Diamond Tool Performance Capability on the Quality of Processed Surface. *Applied mechanics and materials*, 2013, vol. 379, pp. 124 – 130.
23. Yanyushkin A.S., Medvedeva O.I., Saprykina N.A. Mechanism of Protective Membrane Formation on the Surface of Metal-Bonded Diamond Disks. *Applied Mechanics and Materials*, 2014, vol. 682, pp. 327–331.
24. Lobanov D.V., Yanyushkin A.S. Influence of Sharpening on the Quality of Hard-Alloy Tools for the Cutting of Composite. *Russian Engineering Research*, 2011, no. 3, 236–239.
25. Yuanyushkin A.S., Rychkov D.A., Lobanov D.V. Surface Quality of the Fiberglass Composite Material after Milling. *Applied mechanics and materials*, 2014, vol. 682, pp. 183–187.

Received 14 November 2014