

УДК 621.951.01

DOI:10.30987/2223-4608-2020-9-40-48

**В.Ф. Макаров**, д.т.н.,  
**А.А. Волковский**, аспирант,  
**А.И. Сабирзянов**, аспирант  
(Пермский национальный исследовательский политехнический университет  
614090, г. Пермь, Комсомольский пр., 29)  
E-mail: makarovv@pstu.ru

## **Повышение производительности и качества обработки композиционных материалов на основе выбора и рационального применения абразивного инструмента**

*На основе проведенных предварительных исследований динамики ортогонального резания предложена и экспериментально доказана гипотеза о возможности эффективной обработки композиционных материалов абразивным инструментом при сверлении, фрезеровании и шлифовании. Определены рациональные конструкции абразивных инструментов и оптимальные режимы обработки, обеспечивающие повышение производительности и качества поверхностного слоя деталей из полимерных композиционных материалов.*

**Ключевые слова:** полимерные композиционные материалы; абразивные круги и головки; режимы резания; засаливание инструмента; шероховатость поверхности; деламация материала.

**V.F. Makarov**, Dr. Sc. Tech.,  
**A.A. Volkovsky**, Post graduate student,  
**A.I. Sabirzyanov**, Post graduate student  
(Perm National Research Polytechnic University, 29, Komsomolsky Avenue, Perm, 614090)

## **Increase of productivity and composite abrasion quality based on choice and abrasive tool rational use**

*On the basis of the preliminary investigations on the orthogonal cutting dynamics there is offered and confirmed experimentally a hypothesis on possibility of composite efficient machining with an abrasive tool during drilling, milling and grinding. There are defined rational designs of abrasive tools and optimum machining modes ensuring the growth of productivity and quality of surface layers in polymeric composite parts.*

**Keywords:** polymeric composites; abrasive disks and heads; cutting modes; glazing (loading); surface roughness; material delamination.

### **Введение**

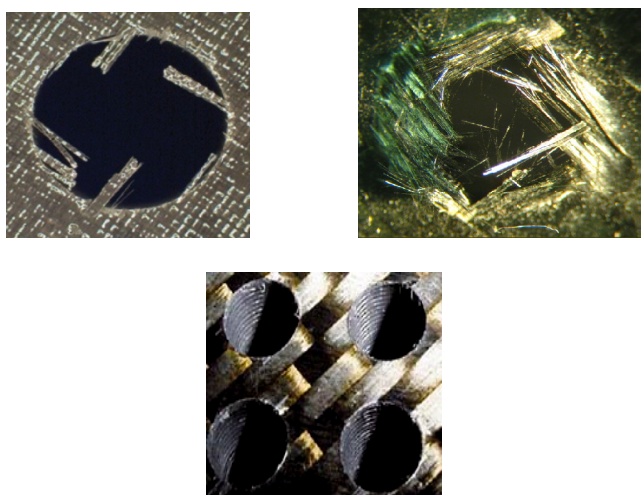
В России в последнее время разработка и применение полимерных композиционных материалов (ПКМ) в машиностроении значительно увеличивается за счет своих уникаль-

ных свойств по высокой прочности и малому удельному весу. Особенно это относится к современной авиационной и ракетно-космической технике. В условиях острой конкурентной борьбы на мировом рынке гражданской авиационной техники побеждают те

производители, которые обеспечивают наименьший расход топлива на грамм тяги и вес изделия. Поэтому при производстве таких современных перспективных самолетов, как МС-21 и газотурбинных двигателей к ним ПД14 предусматривается изготовление большой номенклатуры деталей из ПКМ [1].

В связи с этим перед технологическими службами соответствующих предприятий поставлена задача по разработке технологии высокоэффективной механической обработки различных деталей из ПКМ. В результате предварительных исследований и анализа литературных отечественных и зарубежных данных установлено [2 – 4], что высокая твердость и прочность композитов существенно снижает обрабатываемость резанием. Наблюдается повышенный износ режущих инструментов и ухудшение качества поверхностного слоя в виде расслоений, вырыва волокон, сколов и трещин.

На рис. 1 показаны примеры образования дефектов поверхностей при сверлении отверстий в панелях шумоглушения газотурбинного двигателя из композиционных материалов. Видно, что на торцевой поверхности плетеная структура композита разрушается режущими инструментами с вырывом волокон из матрицы. Внутри отверстий шероховатость также не удовлетворяет условиям [5]. В связи с этим растет трудоемкость по доводке этих отверстий на слесарных операциях вручную.



**Рис. 1.** Общий вид качества торцевых и внутренних поверхностей деталей из композиционных материалов при сверлении отверстий

Аналогичные дефекты возникают и при других видах обработки композиционных материалов резанием – при точении, фрезерова-

нии, протягивании.

Проведенный анализ дефектов на ряде предприятий показал, что основные причины их возникновения при механической обработке, следующие:

- анизотропия свойств композиционных материалов. Волокнистое строение материала с твердой, но хрупкой матрицей не позволяет передавать по слоям упругие деформации в процессе резания. В результате на обработанной поверхности в матрице образуются трещины, а волокна вырываются из матрицы. При этом режущие кромки инструмента подвергаются повышенному абразивному износу от взаимодействия с весьма твердым углеволокном;

- низкая теплопроводность композитов отрицательно сказывается на состоянии режущего инструмента вследствие нарушения теплового баланса, характерного для классической металлообработки. Установлено, что при резании композитов 90 % выделяемой теплоты распределяется в режущем инструменте (РИ), 5 % – в стружке и 5 % – в обрабатываемой заготовке. По мере износа режущего инструмента температура на режущих кромках может достигать порядка 600 °С;

- обработка ПКМ не позволяет использовать СОЖ для отвода тепла. Жидкость, попадая на границу разделения матрицы с армирующими волокнами, выступает в роли клина и усиливает деламинацию слоев композита;

- образование пыли и ее дальнейшее рассеивание несет в себе опасность для рабочего станочника. Как следствие, обработка КМ должна сопровождаться выполнением высоких требований техники безопасности и применением средств защиты здоровья.

Проведенный анализ литературы по обработке композиционных материалов показал, что четкого научно обоснованного ответа на решение проблемы низкой обрабатываемости резанием нет. Есть практические предложения различных инструментальных фирм по применению режущих инструментов из сверхтвердых материалов и инструментов с прерывистой режущей кромкой. Анализ процессов стружкообразования практически не проводился.

В связи с этим в ПНИПУ (г. Пермь) проведены предварительные экспериментальные исследования механики процесса резания и процесса стружкообразования при ортогональном резании и сверлении образцов ПКМ с применением различных лезвийных режущих инструментов [6].

В результате визуального анализа и записи изменения силы резания композиционных материалов при строгании и сверлении установлено, что процесс резания носит дискретный прерывистый характер. Это наглядно можно видеть при записи изменения силы резания  $P_z$  при ортогональном резании (рис. 2). Через определенные промежутки времени происходит рост  $P_z$  и ее падение. На видеозаписи процесса резания углепластика видны периодические вспышки выброса пылевидной стружки по ходу движения резца.



Рис. 2. Запись изменения составляющей силы резания  $P_z$  углепластика ВКУЗ9 с подачей 90 мм/мин и глубиной 0,1 мм при строгании

### Гипотеза динамики процесса резания

Предложена следующая гипотеза механики процесса резания и стружкообразования. Рассмотрены пять стадий стружкообразования при ортогональном резании – строгании композита (рис. 3):

1. Момент контакта – упругая деформация связки и волокон.
2. Начало трещинообразования в местах концентрации упругой деформации на границах зерен, в местах повышенной плотности дислокаций, вытягивание и сжатие армирующих волокон в пучок. Пластическая деформация отсутствует. Плоскости сдвига нет.
3. Расширение поля трещинообразования и трещин, сдвиг пучка волокон со срезанием, обрывом и вытягиванием волокон из матрицы.
4. Образование пылевидной стружки из срезанных сколотых частиц матрицы и срезанных разорванных и вытянутых частей армирующих волокон.
5. На последней пятой стадии происходит образование дефектов поверхностного слоя – трещин в обработанной поверхности из-за растягивающих напряжений и обрывки армирующих волокон.

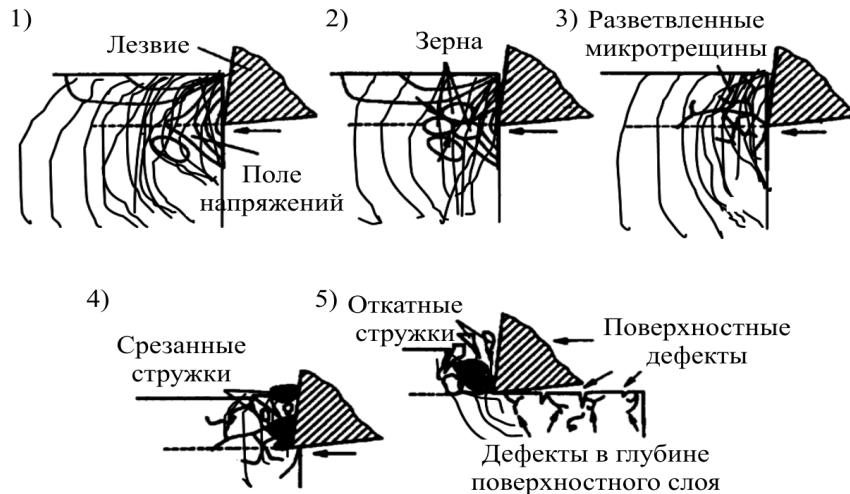


Рис. 3. Основные стадии стружкообразования при резании композиционных материалов

Аналогичные явления прерывистого резания наблюдаются при исследовании и записи осевой силы резания в процессе сверления композитов. Осевая сила в начале резания нарастает, затем уменьшается, затем снова нарастает. Физически это периодическое падение осевой силы сопротивления резанию ощущает рабочий-сверловщик при ручной подаче сверла.

Таким образом, основной причиной деляминации композиционного материала при резании лезвийным инструментом является периодическое циклическое сжатие армирующих волокон, затем срез, разрыв или вырыв волокон из разрушенной матрицы. Явление дискретности наблюдается при всех видах лезвийной обработки резанием: точении, фрезеровании, сверлении, строгании и протяги-

вании.

Решение проблемы повышения производительности, стойкости режущих инструментов и обеспечения требуемого качества обработки композитов можно найти, изменив сам механизм процесса резания и стружкообразования.

Для резания ПКМ, армированных углеволокном или стекловолокном, рекомендуется использовать инструментальные материалы, обладающие высокой твердостью, прочностью и устойчивостью к абразивному износу. Кроме того, режущие кромки инструментов должны быть весьма острыми, твердыми и соизмеримыми с толщиной армирующих волокон или их плетений. К таким материалам наряду с твердыми сплавами относятся абразивные материалы, кубический нитрид бора (КНБ) и поликристаллические алмазы (ПКД). При этом необходимо обеспечить достаточно высокую скорость перерезания армирующих волокон, чтобы они не успевали собираться в пучки под действием упругой деформации режущего инструмента.

### **Обоснование эффективности абразивной обработки ПКМ**

Основываясь на опыте абразивной обработки металлов можно предположить, что за счет высокоскоростного резания ПКМ малыми и острыми твердыми абразивными частицами можно получить наилучшее качество поверхностного слоя, при этом, не образуя больших деформаций и трещин в обрабатываемой поверхности. Эффективное резание абразивным инструментом обеспечивается за счет соизмеримости размера зерна с размерами волокон. В отличие от лезвийной обработки, резание абразивным инструментом исключает возникновение упругой деформации волокон наполнителя за счет высокой скорости перерезания волокон в пределах 20...25 м/с твердыми абразивными частицами. Такие скорости резания на порядок превосходят другие альтернативные методы обработки резанием, такие как фрезерование, точение, сверление и строгание.

В результате анализа литературы установлено, что в настоящее время в стране и за рубежом проведены отдельные исследования абразивной обработки углепластика и стеклопластика при сверлении сверлами с алмазными вставками и алмазным напылением и при шлифовании поверхности «гибкими» лепестковыми шлифовальными кругами [7 – 9]. Утверждается, что обработка такими инструмен-

тами позволяет достигать высокого качества поверхностного слоя без вырывов, деламинации и при отсутствии трещин в поверхностном слое.

В то же время отсутствуют исследования процессов шлифования ПКМ жесткими абразивными кругами и головками, резания высокоскоростной гидроабразивной струей. Не приведены и технологические рекомендации по режимам, характеристикам и конструкциям применяемых абразивных инструментов, отсутствуют научно обоснованные и экспериментально подтвержденные зависимости и закономерности в виде математических моделей, позволяющих контролировать и управлять процессами абразивной обработки.

В связи с этим, в качестве цели настоящей работы выдвигается установление влияния режимов и характеристик абразивных инструментов на параметры производительности и качества обработки ПКМ из углепластика и стеклопластика для таких процессов абразивной обработки, как гидроабразивная резка, шлифование жестким абразивным инструментом, сверление и фрезерование специально изготовленными абразивными кольцевыми головками.

### **Методика проведения экспериментальных исследований**

В качестве образцов для проведения экспериментов подготовлены прямоугольные образцы углепластика ВКУ-39 размерами 50x25x5 мм и стеклопластика (препрег ВПС-34 на основе стеклоткани Т-10-14) размерами 50x50x7 мм. Эти материалы применяются для деталей шумоглушения, обечаек, корпусов газотурбинных двигателей ПС90А, ПД14 и др.

Гидроабразивная обработка отверстий диаметром 6 мм проводилась на гидроабразивной установке фирмы DeKart W1313L по программе ЧПУ на следующих режимах: давление жидкости 4075 атм.; подача рабочей головки 30 мм/мин. В качестве абразива использовался гранатовый песок.

Шлифование жесткими кругами образцов из ПКМ проводилось на плоскошлифовальном станке фирмы JET мод. JPSG 1224AH. Для исследований использованы высокопористые шлифовальные круги из электрокорунда белого 25А и электрокорунда нормального 14А Лужского абразивного завода, характеристика которых представлена в табл.1.

Режимы шлифования: скорость круга  $v = 25$  м/с; подача стола  $S = 5...10$  м/мин; глы-

бина резания  $t = 0,05 \dots 0,1$  мм. Для устранения расслоения ПКМ при шлифовании в зону резания предусмотрена подача сжатого воздуха под давлением 6 бар вместо применения СОЖ.

**1. Абразивный режущий инструмент для проведения опытов**

Материал	Маркировка
Электрокорунд белый	300×30×76,2 25А F60 G 14 V2250
Электрокорунд нормальный	300×30×76.2 14А F60 G 7 V2250

Определение температуры в зоне резания проводилось с использованием протарированных искусственных хромель-алюминиевых термопар типа К, мод. ТР01-А с диапазоном измерений от минус 50 до 350 °С и мультиметра DT-838. Для получения достоверных результатов температуры в зоне резания предварительно проведена тарировка термопар.

Для определения значений шероховатости и записи профилограмм применялся профилометр MarSurf-PS1 фирмы Mahr. Для получения наиболее достоверного результата выполнялось по три измерения для каждой поверхности каждого образца.

Визуальная диагностика образцов после обработки на наличие дефектов и дальнейшее исследование обработанной поверхности проводилось при помощи цифрового LCD-микроскопа BM 200, который имеет хорошую чёткость изображения с увеличением от 40 до 1600 крат.

Установление эмпирических моделей по влиянию скорости подачи и глубины шлифования на шероховатость обработанной поверхности проводились с использованием известного метода планирования экспериментов.

Абразивная обработка ПКМ фрезерованием и сверлением специально изготовленными в ПНИПУ кольцевыми абразивными головками проводилась на универсальном вертикально фрезерном станке JDM-1452TS DRO.

В качестве основы абразивного инструмента для сверления и фрезерования изготовлены специальные трубчатые металлические стержни, на концы которых по специальной технологии Лужского абразивного завода нанесено покрытие из различных абразивных материалов (рис. 4).



а)



б)

**Рис. 4. Сверло кольцевое (а) и фрезы (б) с нанесенным абразивным зерном**

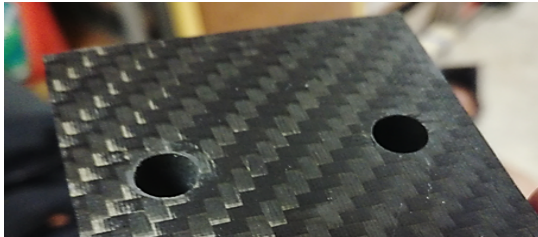
Для исследований подготовлены концевые трубчатые сверла и фрезы следующих характеристик: диаметр 10 мм, зернистость F120(10), F90(16), F60(25), покрытие электрокорунд белый 25А и карбид кремния зеленый 63С производства Лужского абразивного завода. Режимы резания при сверлении:  $v = 1,0$  м/с;  $S = 0,2$  мм/об;  $t = 3,0$  мм. Режимы резания при фрезеровании:  $v = 2,3 \dots 2,8$  м/с;  $S = 0,3$  мм/об;  $t = 1,0$  мм

**Результаты экспериментальных исследований**

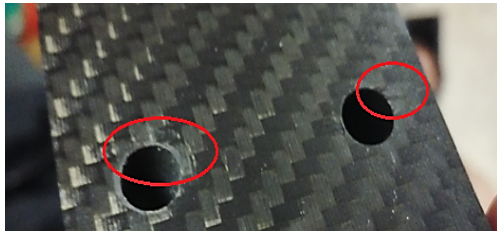
Обработка отверстий в ПКМ высоконапорной гидроабразивной струей выбрана не случайно, т.к. здесь присутствуют все необходимые условия для высококачественного резания: высокая скорость, размер твердых острых абразивных зерен соизмерим с размерами волокон, температура резания низкая. В результате обработки установлено, что, по сравнению с операцией сверления спиральными сверлами (см. рис.3), гидроабразивная обработка позволяет получить лучшее качество входной и выходной кромок. На образце из углепластика дефектов, связанных с расслоением материала и трещинами, не наблюдается (рис. 5).



Отмечается незначительная конусность отверстий в пределах допуска после гидроабразивной резки. Внутри отверстий наблюдается незначительная ворсистость поверхности, что является допустимым для черновой обработки. Достаточно схожий характер заключает в себе и гидроабразивная обработка образцов из стеклопластика (рис. 6).



а)

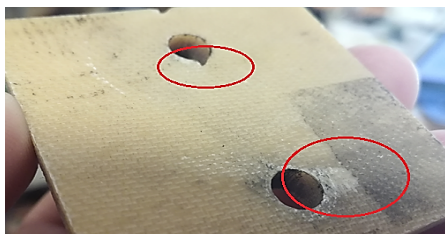


б)

Рис. 5. Фотографии входной (а) и выходной (б) кромки в образцах из углепластика после гидроабразивной обработки



а)



б)

Рис. 6. Фотографии входной (а) и выходной (б) кромок образцов из стеклопластика после гидроабразивной обработки

Входная и выходная кромки при обработке стеклопластика так же имеют достаточно ровный контур без образования деламинации и ворсистости. Однако обнаружено расслоение

слоев препрега при обработке стеклопластика под действием высоконапорной струи жидкости с абразивом.

В процессе проведения исследований установлено, что генерируемое в процессе резания тепло практически мгновенно уносится водой. В результате не происходит заметного повышения температуры в заготовке. Небольшие сила (до 100 Н) и температура (60...90 °С) в зоне резания исключают деформацию заготовки, оплавление и пригорание материала в прилегающей зоне. Кромки среза не требуют дополнительной слесарной обработки.

По результатам исследований процесса гидроабразивной резки можно сделать следующие положительные выводы:

1. Гидроабразивная резка (ГАР) при обработке углепластика позволяет получить поверхность без наличия критических дефектов по всей площади поверхности, включая входную и выходную кромку. При получении отверстий полностью исчез дефект отслоения – деламинации (является основным дефектом при сверлении);

2. Расслоение слоев препрега при обработке стеклопластика под действием высоконапорной струи жидкости требует проведения дополнительных исследований по снижению режимов обработки.

Кроме того, применение ГАР возможно только при обработке сквозных отверстий, что существенно ограничивает номенклатуру обрабатываемых деталей.

В результате экспериментальных исследований по возможности применения шлифования ПКМ жесткими шлифовальными кругами установлено, что температура резания на приведенных режимах шлифования находится в пределах 48...121 °С (табл. 2), что не должно формировать различные дефекты, трещины и оплавление матрицы ПКМ.

## 2. Результаты исследований температуры в зоне резания

Материал шлифовального круга	$S$ , м/мин	$t$ , мм	$\tau$ , °С
14AF60G7 V2250	5	0,05	121
	10		51
25AF60G14V2250	5		87
	10		48

В результате анализа видно, что при обработке обеими марками абразивного инструмента наблюдается общая закономерность:

увеличение скорости подачи стола приводит к снижению температуры в зоне резания. Это связано с сокращением времени контакта абразивных зерен с обрабатываемой поверхностью.

Установлено, что увеличение глубины шлифования в диапазоне от 0,05 до 0,2 мм практически не влияет на изменение температуры. Кроме того установлено, что повышение пористости шлифовального круга с 7 до 14 снижает значение температуры с 121 до 87 °С.

В результате исследования параметров качества обработанной поверхности ПКМ после шлифования при помощи микроскопа PCE-MM200 USB установлено, что на обработанной поверхности из углепластика в зоне резания инструмента наличие дефектов не обнаружено. На боковых кромках образца не наблюдается ворсистой, деламинации и не-

прорезов, характерных для таких видов механической обработки лезвийным инструментом, как точение, фрезерование, сверление и строгание. Так же следует отметить отсутствие прижогов и трещин, вследствие невысоких температур в зоне резания.

Следовательно, плоское шлифование композиционных материалов из углепластика жесткими шлифовальными кругами позволяет получить поверхность без дефектов.

Результаты исследования влияния режимов обработки на шероховатость поверхности ПКМ из углепластика приведены в табл. 3. Установлено, что плоское шлифование углепластика жесткими кругами обеспечивает требуемую шероховатость обработанной поверхности в пределах  $Ra = 0,404 \dots 0,894$  мкм, что весьма трудно обеспечить при фрезеровании или строгании лезвийным инструментом.

**3. Результаты измерения шероховатости обработанной поверхности углепластика**

Марка круга	v, м/с	№ поверхности образца	S, м/мин	t, мм	Ra, мкм			$\bar{Ra}$
					1	2	3	
14A	25	1	5	0,05	0,664	0,404	0,521	0,530
		2	10		0,732	0,662	0,565	0,653
25A		3	5		0,490	0,560	0,616	0,555
		4	10		0,858	0,850	0,766	0,825
14A		0,1	5	5	0,461	0,551	0,441	0,484
			6	10	0,766	0,545	0,572	0,628
25A			7	5	0,521	0,511	0,480	0,571
			8	10	0,755	0,894	0,682	0,710

Из анализа табл. 3 можно сделать вывод, что с увеличением подачи стола от 5 до 10 м/мин высота микронеровностей повышается на 15...30 %. Установлено, что увеличение глубины шлифования от 0,05 до 0,1 мм практически не влияет на изменение шероховатости поверхности.

В табл. 4 представлены результаты измерений шероховатости поверхностного слоя образца из стеклопластика после абразивной обработки шлифовальным кругом 14AF60G7 V2250.

**4. Результаты измерения шероховатости поверхностного слоя образца из стеклопластика**

S, м/мин	t, мм	Ra, мкм			$\bar{Ra}$ мкм
		1	2	3	
5	0,05	2,986	3,136	3,095	3,072
10		6,398	5,330	5,671	5,799

Анализ табл. 4 показал, что шероховатость поверхности при шлифовании стеклопластика в 3 – 4 раза больше, чем при шлифовании углепластика, что свидетельствует о разнородности процессов, протекающих при резании.

Установлено, что увеличение подачи стола в два раза приводит к пропорциональному возрастанию шероховатости в два раза.

Таким образом, можно сделать вывод, что абразивная обработка углепластика шлифовальными кругами из электрокорунда белого и электрокорунда нормального позволяет получить поверхность без явных признаков дефектов, а также обеспечить требуемое значение параметра шероховатости поверхности.

Обработка шлифованием стеклопластика на аналогичных режимах приводит к образованию микротрещин в поверхностном слое и не обеспечивает требуемых показателей шероховатости. В то же время применение шлифовальных кругов из карбида кремния зелено-

го, имеющего более твердые и острые абразивные зерна, позволяет исключить образование трещин и пор на обработанной поверхности.

Математическая обработка полученных результатов влияния режимов обработки на шероховатость поверхности углепластика при использовании шлифовального высокопористого круга 25AF60G14 V2250 проведена с использованием метода планирования экспериментов. В результате обработки данных получено адекватное и значимое уравнение зависимости шероховатости поверхности  $Ra$  от скорости подачи стола  $S$  и глубины резания  $t$  для шлифования углепластика:

$$Ra = 0,319 + 0,027 S + 0,72 t.$$

Сравнение результатов экспериментальных исследований и результатов, полученных при помощи математической модели, показало, что погрешность между значениями составляет не более 10 % или не более 0,03 мкм.

Таким образом, абразивная обработка жесткими шлифовальными кругами изделий из углепластика и стеклопластика может выступать альтернативным фрезерованию методом обработки, позволяющим исключить ряд дефектов, образованных в процессе резания и получить высокое качество поверхности.

В результате экспериментальных исследований обработки углепластика с применением сверл и фрез с цилиндрическим наконечником с абразивным напылением установлено, что при сверлении полимерных композиционных материалов с применением кольцевого сверла с покрытием электрокорундом белым (зернистость F120), абразивное покрытие сгорает в момент захода инструмента в обрабатываемый материал, внутренняя полость кольцевого сверла забивается стружкой и качество обработанной поверхности отверстия ухудшается. Аналогичные явления получены при сверлении углепластика с применением покрытия карбидом кремния зеленого (зернистость F120). Однако наблюдается более высокая стойкость абразивного инструмента и лучшее качество обработанной поверхности, отсутствуют вырывы волокон на выходе инструмента. С увеличением зернистости карбида кремния зеленого (F60(25)) наблюдаются вырывы волокон на выходе инструмента.

В результате экспериментальных исследований влияния процесса фрезерования абразивными головками с различными покрытиями на качество обработанных поверхностей установлено, что применение концевой фрезы с покрытием карбидом кремния зеленого (зер-

нистость F60) абразивное покрытие стойкое, качество обработанной поверхности хорошее, дефектов поверхности не наблюдается. При этом обеспечивается требуемая шероховатость поверхности  $Ra = 1,18$  мкм.

При фрезеровании углепластика с применением концевой фрезы с покрытием электрокорундом белым (зернистость F120) установлено, что абразивное покрытие стойкое, процесс фрезерования стабильный ровный, обеспечивает хорошее качество обработанной поверхности  $Ra = 1,65$  мкм.

## Выводы

1. Гидроабразивная резка при обработке углепластика позволяет получить поверхность без наличия критических дефектов по всей площади поверхности, включая входную и выходную кромку. При получении отверстий полностью исчез дефект отслоения – деламинация (является основным дефектом при сверлении).

2. Шлифование изделий из ПКМ жесткими шлифовальными кругами может выступать альтернативным фрезерованию, точению, строганию, протягиванию лезвийным инструментом методом обработки, позволяющим исключить ряд дефектов, образованных в процессе резания, и получить высокое качество поверхности.

3. Фрезерование изделий из ПКМ с применением концевых фрез с покрытием карбидом кремния зеленого (зернистость F60) обеспечивает достаточную стойкость инструмента и требуемое качество обработанной поверхности без дефектов, присущих лезвийной обработке.

4. Результаты проведенных экспериментальных исследований подтвердили предложенную гипотезу о дискретности механизма резания ПКМ лезвийным инструментом и целесообразности применения абразивной обработки для повышения производительности и качества поверхностного слоя изделий из композиционных материалов.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Рубцов, С.М. Полимерные волокнистые композиты в конструкции турбовентиляторного авиационного двигателя ПС-90А // Конверсия в машиностроении. – 2007. – № 3. – С. 19–26.
2. Марков, А.М. Технологические особенности механической обработки деталей из композиционных материа-



лов // Научные технологии в машиностроении». – 2014. – №7(37). – С. 3-8.

3. Ярославцев, В.М. Новые технологии повышения качества поверхностного слоя при резании волокнистых полимерных композиционных материалов // Вестник МГТУ им. Баумана. Серия Машиностроение. – 2017. – № 6. С.15-18.

4. Зубарев, Ю.М., Приемышев, А.В. Инновационные технологии обработки полимерных композиционных материалов в машиностроении // Научные технологии в машиностроении. – 2017. – № 8(74). – С. 36-42.

5. Макаров, В.Ф. Особенности диагностики процесса резания при сверлении композиционных материалов // Научные технологии в машиностроении. – 2016. – № 12(66). – С. 20-27.

6. Макаров, В.Ф., Койнов, И.И., Кумар, Д. Особенности деформационных явлений в процессе стружкообразования при ортогональном резании композиционных материалов // Научные технологии в машиностроении. – 2018. – №6 (84). – С. 38-43.

7. Янюшкин, А.С. Сравнительный анализ конструкций фрезерного инструмента для обработки композиционных материалов / А.С. Янюшкин, Д.В. Лобанов, Д.А. Рычков // Системы. Методы. Технологии. – 2009. – №3. – С. 83-85.

8. Макаров, В.Ф. Современные методы высокоэффективной абразивной обработки жаропрочных сталей и сплавов: учебное пособие. – СПб.: Издательство «Лань», 2013. – 320 с.

9. Зубарев, Ю.М., Приемышев, А.В., Заостровский, А.С. Особенности лезвийной обработки резанием заготовок из полимерных композиционных материалов // Научные технологии в машиностроении. – 2018. – №2(80). – С. 40-48.

## REFERENCES

1. Rubtsov, S.M. Polymeric fibrous composites in design of PS-90A turbofan aircraft engine // *Conversion in Mechanical Engineering*. – 2007. – No.3. – pp. 19-26.

2. Markov, A.M. Technological peculiarities in composite parts machining // *Science Intensive Technologies in Mechanical Engineering*. – 2014. – No.7 (37). – pp. 3-8.

3. Yaroslavtsev, V.M. New technologies for surface layer quality increase during fibrous polymeric composite cutting // *Bulletin of Bauman STU of Moscow. Mechanical Engineering Series*. – 2017. – No.6. pp. 15-18.

4. Zubarev, Yu.M., Priyomyshev, A.V. Innovation technologies of polymeric composite processing in mechanical engineering // *Science Intensive Technologies in Mechanical Engineering*. – 2017. – No.8(74). – pp.36-42.

5. Makarov, V.F. Cutting diagnostics peculiarities during composite drilling // *Science Intensive Technologies in Mechanical Engineering*. – 2016. – No.12 (66). – pp. 20-27.

6. Makarov, V.F., Koinov, I.I., Kumar, D. Deformation phenomenon peculiarities during chip formation at composite orthogonal cutting // *Science Intensive Technologies in Mechanical Engineering*. – 2018. – No.6 (84). – pp.

7. Yanyushkin, A.S. Comparative analysis of milling cutter design for composite milling / A.S. Yanyushkin, D.V. Lobanov, D.A. Rychkov // *Systems. Methods. Technologies*. – 2009. – No.3. – pp. 83-85.

8. Makarov, V.F. *Modern Methods for Heat-Resistant Steel and Alloy Abrasion*: manual. – S-Pb.: “Lan” Publishers, 2013. – pp. 320.

9. Zubarev, Yu.M., Priyomyshev, A.V., Zaostrovsky, A.S. Peculiarities in polymeric composite billet edge cutting // *Science Intensive Technologies in Mechanical Engineering*. – 2018. – No.2 (80). pp. 40-48.

Рецензент д.т.н. Д.И. Волков

Учредитель и издатель: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Брянский государственный технический университет"

Адрес редакции и издателя: 241035, Брянская область, г. Брянск, бульвар 50 лет Октября, 7

ФГБОУ ВО «Брянский государственный технический университет»

Телефон редакции журнала (4832) 51-51-38, 8-903-592-87-39. E-mail: naukatm@yandex.ru

Вёрстка А.А. Алисов. Технический редактор А.А. Алисов.

Сдано в набор 14.09.2020. Выход в свет 30.09.2020.

Формат 60 × 84 1/8. Бумага офсетная. Усл. печ. л. 5,58.

Тираж 500 экз. Свободная цена.

Отпечатано в лаборатории оперативной полиграфии

Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования

"Брянский государственный технический университет"

241035, Брянская область, г. Брянск, ул. Институтская, 16

12+