

УДК 621.9.015

DOI: 10.30987/article\_5b0e4112e75727.70350616

**В.Ф. Макаров**, д.т.н.  
**И.И. Койнов**, аспирант,  
**Д. Кумар**, магистрант

(Пермский национальный исследовательский политехнический университет,  
614990, г. Пермь, Комсомольский пр-т, 29)

## **Особенности деформационных явлений в процессе стружкообразования при ортогональном резании композиционных материалов**

*В статье описаны проблемы процесса резания связанные с качеством поверхности при стружкообразовании. Разработан стенд компьютерной диагностики процесса резания при строгании композиционных материалов. В ходе исследования была выдвинута гипотеза упругого деформирования при резании композиционных материалов. Представлена методика на основе применения диагностического центра. Получены результаты экспериментальных исследований динамики процесса стружкообразования и качества обработки. Проведены экспериментальные исследования в программе САЕ по деформации композиционного материала в процессе стружкообразования при строгании. Получены графики зависимостей и описание выводов, рекомендаций и заключений по применению программ САЕ и центра компьютерной диагностики.*

**Ключевые слова:** полимерные композиционные материалы; диагностика; моделирование; образование стружки; закономерности деформации и разрушения; качество поверхности.

**V.F. Makarov**, D. Eng.,  
**I.I. Koynov**, Post graduate student,  
**D. Kumar**, Master degree student

(Perm National Research Polytechnic University, 29, Komsomolsky Avenue, Perm, 614990)

## **Peculiarities of deformation phenomena during chip formation at composite orthogonal cutting**

*The paper reports the description of cutting problems connected with surface quality at chip formation. There is developed a bench for computer diagnostics of a cutting process at composite planning. In the course of investigations there was adduced a hypothesis of elastic deformation at composite cutting. A procedure is presented on the basis of a diagnostic center use. The results of the experimental investigations of chip formation dynamics and machining quality are obtained. The experimental investigations in the SAE program on composite deformation during chip formation at jointing are carried out. The diagrams of dependences and descriptions of conclusions, recommendations and conclusions on the use of SAE programs and a computer diagnostic center are obtained.*

**Keywords:** polymeric composites; diagnostics; modeling; chip formation; deformation and destruction regularities; surface quality.

Развитие авиационной, ракетно-космической техники, автомобильного и химического производства, медицины, спорта неразрывно связано с созданием новых композиционных материалов (КМ), обладающих

уникальными свойствами – при малом весе достаточно большой прочностью.

Союз производителей композитов, совместно с федеральными органами исполнительной власти и различными заинтересованными

сторонами, разработал подпрограмму №14 «Развитие производства композиционных материалов (композитов) и изделий из них» в рамках государственной программы «Развитие промышленности РФ и повышение ее конкурентоспособности на период до 2020 года».

Специалистами нескольких пермских предприятий (ОДК «Авиадвигатель», ОДК «Пермские моторы», ПМ «Машиностроитель») была разработана целая программа применения композитов в конструкции семейства авиационных двигателей ПС 90А. Тогда же были спроектированы 14 типов узлов авиационного двигателя для замены их на композитные аналоги, что позволило получить значительное снижение массы двигателя.

Сейчас ОДК «Авиадвигатель» является главным разработчиком нового турбовентилаторного двухстороннего двигателя ПД -14, предназначенного для установки на новые российские самолёты МС-21-200/300/400. Существует государственная программа по разработке этого двигателя и самолёта МС-21. Первые образцы самолетов уже появились в городе Иркутск и подписаны контракты с другими странами.

Интенсивные исследования в области повышения качества обработки композиционных материалов резанием ведутся также и в МГТУ им. Н.Э. Баумана; Всероссийском научно-исследовательском институте авиационных материалов, г. Москва; Уральском государственном авиационном техническом университете, г. Уфа; Ассоциации «Некоммерческое Партнерство» Алтайский полимерный композитный кластер», г. Бийск.

Непрерывная эластичная стружка образуется при небольших скоростях резания и при наличии большого положительного переднего угла инструмента; при механической обработке материалов, обладающих высокой способностью к упругой деформации. Данный тип стружки практически полностью образуется за счет упругой деформации материала (для образования неэластичной стружки необходимо разделение полимерных цепей) [5].

Сравнивая описанный процесс со стружкообразованием при резании металлов, можно отметить, что во многом он несет в себе признаки образования элементной стружки и одновременно стружки надлома [4].

В работе В.М. Ярославцева (МГТУ им. Баумана) [4] даны представления о микромеханике деформации и разрушения волокон наполнителя в зоне стружкообразования. На рис. 1, а, б, в (последовательные стадии

стружкообразования) [1] изображена схема процесса образования стружки при точении стеклопластиков. Проанализировав схему можно сделать вывод, что в этой работе принимается композиционный материал за металл, т.к. в рисунках совершенно не учтено наличие волокон композиционных материалов и их расположение. На самом же деле, сложное строение композиционных материалов является основной проблемой их механической обработки. Стружка, полученная в работе [1] возможна только при особом материале или инструменте, а также при достаточно высокой скорости резания.

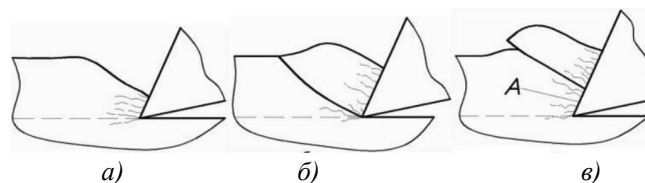


Рис. 1. Схема процесса образования стружки при точении стеклопластиков [4]

До сих пор не установлены основные закономерности теплофизики, износа, стойкости режущего инструмента, качества при резании таких материалов. Отсутствуют знания о деформации в процессе резания КМ. Авторами выдвинута гипотеза о следующем механизме деформационных явлений в процессе стружкообразования – отсутствие пластической деформации, наличие только упругой деформации, образование пучков волокон при сдвиге, разрушение пучков волокон в виде среза, поломки, вырывов и микроразрывов. Для подтверждения этой гипотезы проведены экспериментально-теоретические исследования.

Проблемы обработки резанием деталей из композиционных материалов:

- 1) низкая производительность процесса механической обработки;
- 2) интенсивное абразивное воздействие стеклянных волокон армирующей ткани пластика в комплексе с низкой теплопроводностью полимерной матрицы;
- 3) получение высокого качества обработанной поверхности;
- 4) существенно выраженная анизотропия (различие свойств среды) свойств и относительно низкая адгезионная (сцепление поверхностей разнородных тел) связь основы с матрицей;
- 5) сокращение периода стойкости режущего инструмента;
- 6) выделение мелкодисперсных частиц

пластика в процессе обработки (рис. 2).

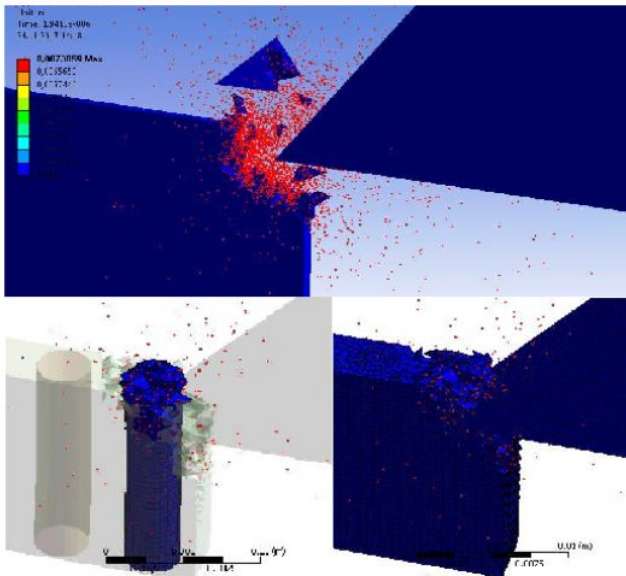


Рис. 2. Модель полученная в программе ANSYS Workbench

На рис. 3, а, б изображена зона обработки углепластика и стеклопластика после резания. Видны следующие дефекты КМ: растрескивание матрицы, расслоение, выдергивание волокон. Происхождение этих дефектов обусловлено особенностями структуры КМ. На рис. 3, в представлена зона обработки алюминиевого сплава после резания. В отличие от углепластика и стеклопластика, в зоне обработанной поверхности нет расслоения и разрыва материала. В этом и есть принципиальное отличие обработки КМ от металлов.

Углепластики – полимерные композицион-

ные материалы из переплетённых нитей углеродного волокна, расположенных в матрице из полимерных (например, эпоксидных) смол. Материалы отличаются высокой прочностью, жёсткостью и малой массой, часто прочнее стали, но гораздо легче.

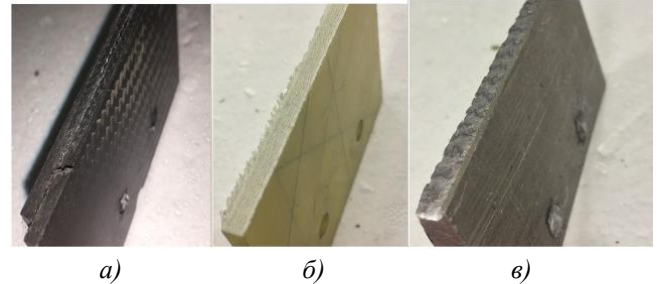


Рис. 3. Образцы после обработки резанием: а – углепластик ВКУ39; б – стеклопластик ВПС33; в – алюминиевый сплав АК5

Стеклопластики – вид композиционных материалов – пластические материалы, состоящие из стекловолнистого наполнителя (стеклянное волокно, волокно из кварца и др.) и связующего вещества (термореактивные и термопластичные полимеры).

Специфическая структура и характерные физико-механические свойства [2] полимерных композиционных материалов (ПКМ) определяют существенные особенности обработки их резанием. Специфика композиционных материалов как объекта обработки резанием выделяет их в особую группу труднообрабатываемых материалов, которая характеризуется особым характером протекания процесса резания [3].

### 1. Сравнительные характеристики КМ и алюминия

Материал Характеристика	Алюминий	Стеклопластик	Углепластик (карбон)
Предел прочности, МПа	250...500	1700	1600
Плотность, г/см <sup>3</sup>	2,6...2,8	1,8...1,9	1,75
Подверженность износу (коррозия, усталость и др.)	Высокая	Низкая	Низкая
Ремонтопригодность в походных условиях	Низкая	Отсутствует	Отсутствует
Ориентировочная жесткость	Высокая	недостаточная	Практически любая, в зависимости от задач
Толщина нити, мм	—	0,0001...0,019	0,003...0,010
Вес	От низкого до среднего	Низкий	Очень низкий
Цена	От очень низкой до высокой	От средней до очень высокой	От средней до очень высокой

В ходе исследования была проверена гипотеза, что в процессе резания возможно такое явление: под действием упругой деформации внутри материала собирается пучок из волокон, который дает значительное сопротивление резанию (рис. 4). При этом, т.к. пластическая деформация отсутствует, происходит упругое деформирование и сбор волокон. Затем при достижении необходимой нагрузки на расстоянии  $Lx$  происходит перерезание, вырыв или поломка прочных волокон. Это может привести к резкому скачку силы резания, вибрации, шуму. Возможен микровзрыв в виде микродисперсных частиц, при котором ухудшается качество обработанной поверхности.

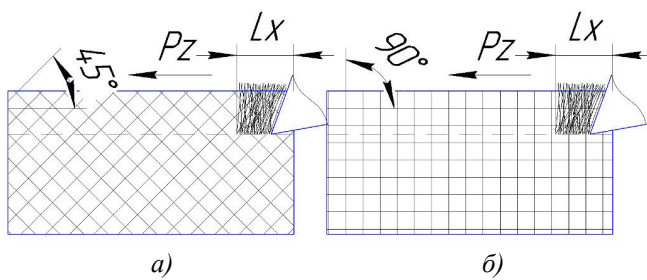


Рис. 4. К анализу деформации углепластика ВКУ-39 (а) и стеклопластика ВПС-33 (б)

Для проверки гипотезы проведены экспериментальные исследования при строгании образцов из композиционного материала и металла.

Процесс резания материалов проводился на универсальном фрезерном станке мод. JET JMD-1452 TS DRO с использованием разработанного комплексного компьютерного центра диагностики (рис. 5) в Пермском национальном исследовательском политехническом университете на кафедре «Инновационные технологии машиностроения». Обработывались образцы 60x30x6 мм из материалов: углепластик ВКУ-39 с разнонаправленными волокнами под  $45^\circ$ , стеклопластик ВПС-33 с разнонаправленными волокнами под  $90^\circ$  по ТУ К55/13-615 и для сравнения алюминиевый сплав АК5 (рис. 6).

Каждый опыт повторялся от 2 до 3 раз в зависимости от величины разброса получаемых данных. Использовался резец канавочный (ширина кромки 5мм; длина резца  $L = 125$  мм, державка 25x25 мм, пластинка напайная из материала ВК8). Геометрия резца: передний угол  $\gamma = 5^\circ$ ; задний угол  $\alpha = 5^\circ$ . Режимы обработки: подача 90 мм/мин; глубина резания 0,1 мм. Обработка образцов производилась без СОЖ.

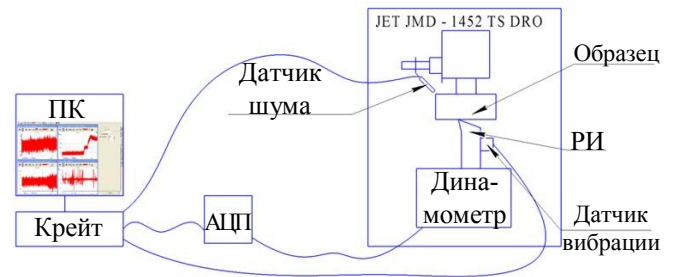


Рис. 5. Принципиальная схема для измерения и анализа физических параметров процесса резания при сверлении композиционных материалов

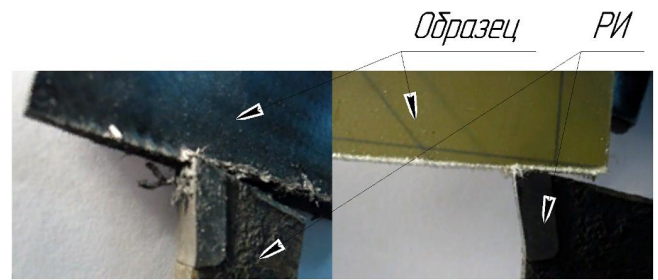


Рис. 6. Характер деформации при обработке резанием образцов из углепластика ВКУ-39 и стеклопластика ВПС-33

В состав комплексного центра входят следующие элементы:

- 1) динамометр УДМ-400 с тензометрическими датчиками – обеспечивает измерение составляющих силы резания  $P_z, P_x, P_y$ ;
- 2) резец (РИ), на который устанавливался датчик вибрации ВД-03, предназначенный для измерения вибрации процесса резания при строгании;
- 3) датчик шума – микрофон предназначен для измерения характеристик шума резания;
- 4) крейт – предназначен для коммутации входных сигнальных линий, платы аналоговой фильтрации, выходных сигнальных линий, АЦП, обеспечения их электропитанием;
- 5) аналого-цифровой преобразователь – предназначен для преобразования аналоговых сигналов в цифровой вид;
- 6) «камертон» – пульт управления системой регистрации и контроля параметров оборудования включает в себя персональный компьютер, который через АЦП производит регистрацию и анализ технических параметров оборудования;
- 7) система регистрации и анализа сигналов. Представляет собой компьютерную программу, которая выполняет регистрацию, обработку и оценку сигналов от датчиков, с отображением всех результатов на мониторе и оповещением персонала.

При анализе полученных результатов обработки данных составляющей силы резания, виброскорости, шума резания на графиках (рис. 7, 8) были отмечены обрывы и скачкообразное возрастание сил и шума резания. Это можно объяснить тем, что резец тянет за собой пучок волокон, вырывает их, а затем пе-

резает. Проявляется непостоянством глубины резания.

При резании алюминиевого сплава (рис. 9) нет резких скачков силы резания, вибрации и шума и получается сливная стружка. Сила резания возрастает до максимальной и стабилизируется.

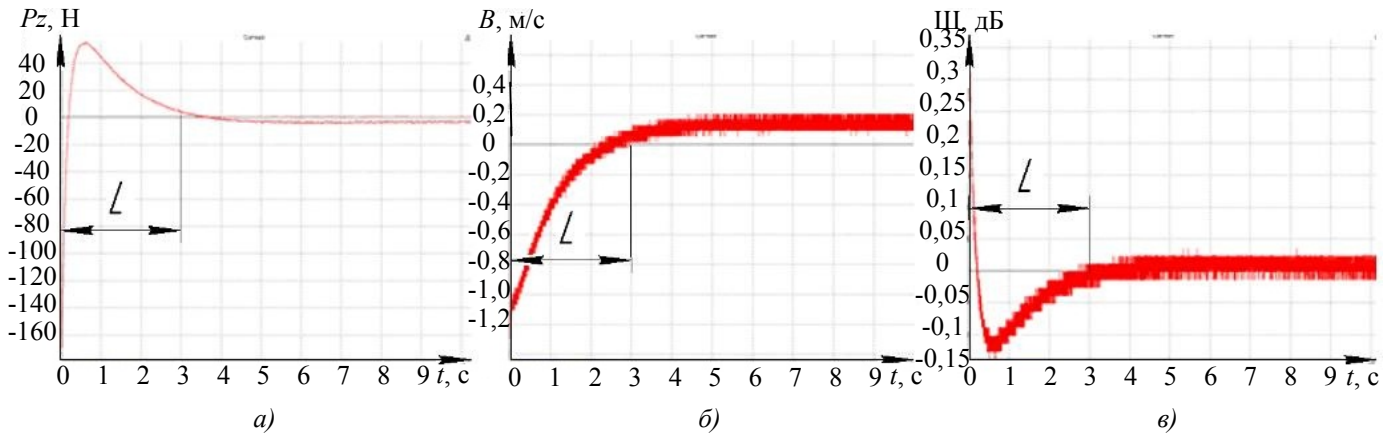


Рис. 7. Графики изменения физических параметров углепластика ВКУ-39:

а – составляющая силы резания  $P_z$ , Н; б – виброскорость  $V$ , м/с; в – шум резания  $\text{Ш}$ , дБ

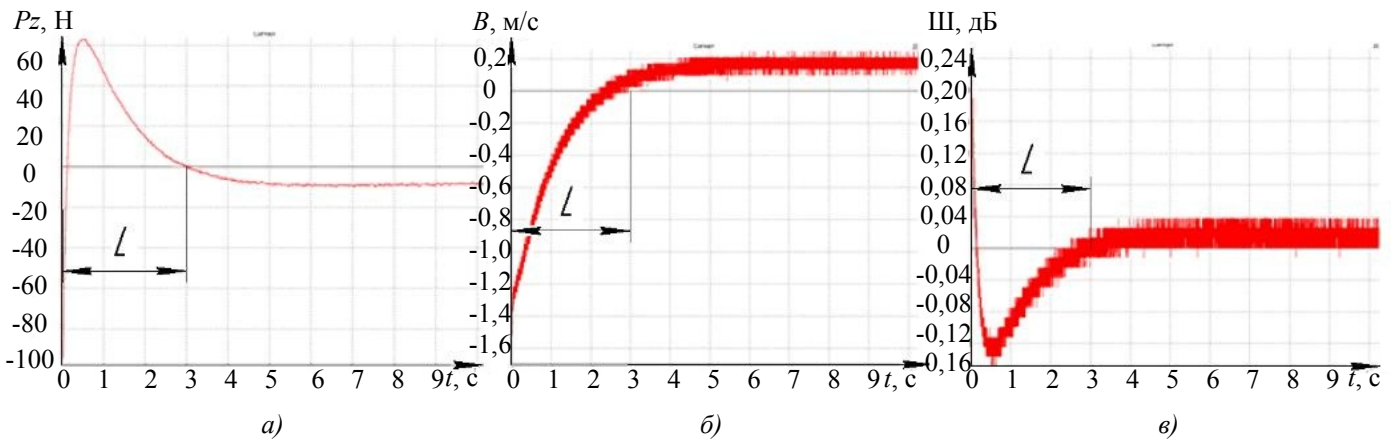


Рис. 8. Графики изменения физических параметров стеклопластика ВПС-33

а – составляющая силы резания  $P_z$ , Н; б – виброскорость  $V$ , м/с; в – шум резания  $\text{Ш}$ , дБ

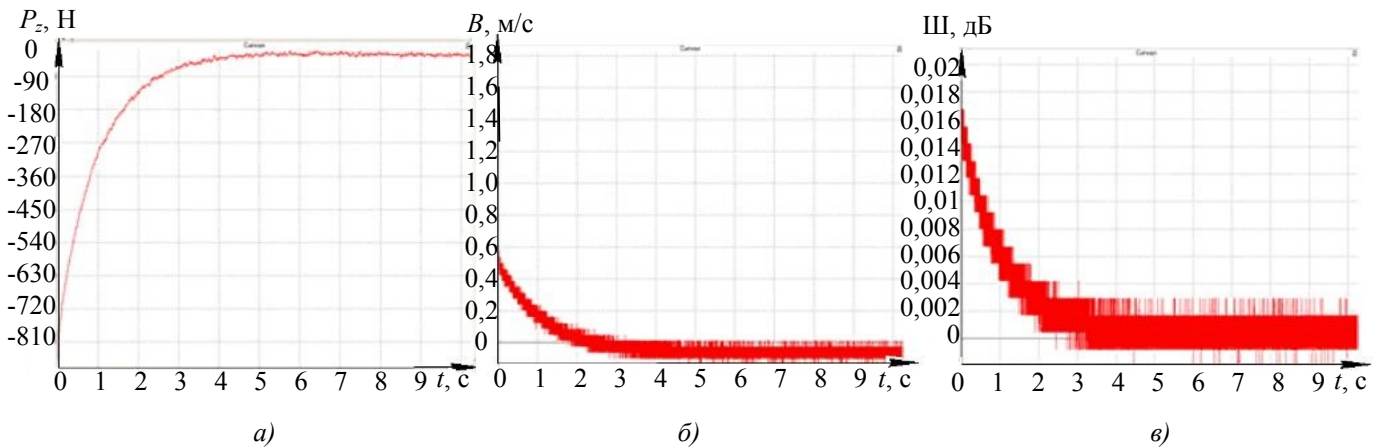


Рис. 9. Графики изменения физических параметров алюминиевого сплава АК 5:

а – составляющая силы резания  $P_z$ , Н; б – виброскорость  $V$ , м/с; в – шум резания  $\text{Ш}$ , дБ

Для подтверждения предложенной гипотезы вычислим на какой длине собирается пучок волокон, а затем разрывается. Для этого нужно найти скорость резания:

$$S = v \cdot t;$$

где  $v = 90 \text{ мм/мин} = \frac{90}{60} = 1,5 \text{ мм/с}$  – скорость резания;  $t$  – время резания ( $t = 3 \text{ с}$ , т.к. скачок физических параметров происходит одинаково у стеклопластика и углепластика за  $3 \text{ с}$ );  $S = 1,5 \cdot 3 = 4,5 \text{ мм}$ . Это объясняется тем, что пучок волокон собирается на расстоянии  $4,5 \text{ мм}$ . Обозначим его как  $L_{\text{упр.деформ.}}$ ;  $b = 5 \text{ мм}$  – ширина реза.

Рассчитаем касательное напряжение деформационного среза  $\tau$ ,  $\text{Н/мм}^2$ , которое нужно преодолеть для разрыва пучка волокон.

$$\tau = \frac{P}{F},$$

где по данным диагностического стенда  $P = 50 \text{ Н}$  – для углепластика;  $P = 60 \text{ Н}$  – для стеклопластика.

$$F = L_{\text{упр.деформ.}} \cdot b \text{ – площадь сечения,}$$

где  $b = 5 \text{ мм}$  – ширина реза.

$$F = 4,5 \cdot 5 = 22,5 \text{ мм}^2;$$

$\tau = \frac{50}{22,5} = 2 \text{ Н/мм}^2$  – сопротивление углепластика;

$\tau = \frac{60}{22,5} = 2,6 \text{ Н/мм}^2$  – сопротивление стеклопластика.

### Выводы:

Проанализировав результаты экспериментальных исследований, можно сделать вывод:

1. У композитов отдельные элементы и частицы удаляемого материала, как правило, остаются связанными между собой обрывками волокон и наполнителя. Формированию стружки сопутствует образование мелких частиц материала и пыли. Образуются трещины на обработанной поверхности. Такое явление теоретически возможно только при особом материале инструмента, его геометрии, а также при достаточно высокой скорости резания.

2. Гипотеза подтверждена. При проведении испытаний действительно происходит упругое сжатие волокон композиционных материалов внутри деталей из КМ.

3. Связующее растрескивается, не сопротивляется резанию.

4. Пластическая деформация в КМ отсутствует, по сравнению с обработкой металла.

5. На расстоянии  $4,5 \text{ мм}$  для структуры композиционных материалов собирается пучок волокон, и сила резания достигает значения, способного прервать сопротивление  $\tau = 2,0 \text{ Н/мм}^2$  – для углепластика и  $\tau = 2,6 \text{ Н/мм}^2$  – для стеклопластика.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Макаров, В.Ф. Выбор и назначение оптимальных условий протягивания заготовок из труднообрабатываемых материалов: учеб. пособ. – Пермь: Изд-во Перм. гос. техн. ун-та, 2008. – 396 с.
2. Степанов, А.А. Обработка резанием высокопрочных композиционных полимерных материалов. – Л.: Машиностроение, 1987. – 176 с.
3. Марков, А.М. Технологические особенности механической обработки деталей из композиционных материалов // Научные технологии в машиностроении. – 2014. – № 7(..). – С. 3–5.
4. Ярославцев, В.М. Процесс образования стружки при резании полимерных композиционных материалов с волокнистыми наполнителями // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. «Машиностроение». – 2012. – № 2. – С. 81–87.
5. 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. Makarov, V.F. *Choice and Purpose of Optimum Conditions for Stretching Hard-to-Machine Blanks*: manual. – Perm: Publishing House of Perm State Technical University, 2008. – pp. 396.
2. Stepanov, A.A. *High-tensile Polymeric Composite Cutting*. – L.: Mechanical Engineering, 1987. – pp. 176.
3. Markov, A.M. Technological peculiarities of composite part machining // *Science Intensive Technologies in Mechanical Engineering*. – 2014. – No.7(..). – pp. 3-5.
4. Yaroslavtsev, V.M. Chip formation process at cutting polymeric composites with fiber fillers // *Bulletin of Bauman STU of Moscow. Series "Mechanical Engineering"*. – 2012. – No.2. – pp. 81-87.
5. Zubarev, Yu.M., Priyomyshev, A.V., Zaostrovsky, A.S. Peculiarities of polymeric composite blank edge cutting // *Science Intensive Technologies in Mechanical Engineering*. – 2018. – No.2(80). – pp. 40-48.

Рецензент д.т.н. В.И. Свирицев