

3. **Lasercheck.** URL: <https://optical-dimensions.com/index.html> (дата обращения: 18.04.2019).
4. **SILENOS® – Steel Inclusion Level Evaluation by Numerical Optical Systems.** URL: <https://it.mathworks.com/content/dam/mathworks/mathworks-dot-com/solutions/aerospace-defense/files/2017/expo-de/silenos-steel-inclusion-level-evaluation-by-numerical-optical-systems.pdf> (дата обращения: 18.04.2019)
5. **Петрешин, Д.И., Хандожко, В.А.** Автоматизированное обеспечение качества поверхности и контактной жесткости деталей машин // Научно-технические технологии в машиностроении. – 2018. – № 10(88). – С. 14-19.
6. **Суслов, А.Г., Петрешин, Д.И.** Обеспечение качества обработанных поверхностей с использованием самообучающейся технологической системы // СТИН. – 2006. – № 1. – С. 21-24.
7. **Суслов, А.Г., Петрешин, Д.И.** Автоматизированное обеспечение комплексного параметра качества поверхностного слоя Cx при механической обработке // Научно-технические технологии в машиностроении. – 2011. – № 2. – С. 34-40.
8. **Метод** определения нормальной контактной жесткости неподвижных стыков: методические рекомендации. – М.: ВНИИМАШ, – 1982.
9. **Медведев, Д.М., Хандожко, В.А.** Автоматизированное технологическое обеспечение контактной жесткости шлифованных поверхностей деталей машин и их стыков // Вестник Брянского государственного технического университета. – 2015. – № 2 (46). – С. 40-49.
10. **Инженерия** поверхности деталей / А.Г. Суслов [и др.]; под ред. А.Г. Суслова. – М.: Машиностроение. 2008. – 320 с.

REFERENCES

1. *Technological Condition Optimization of Aircraft Engine Parts Machining* / Beziyazychny V.F., Kozhina T.D.,

Konstantinov A.V., Nepomiluev V.V. – M.: MAI Publishers, 1993. – pp. 184.

2. *Science Intensive Technologies in Mechanical Engineering* / A.G. Suslov, B.M. Bazrov, V.F. Beziyazychny et al.; under the editorship of A.G. Suslov. – M.: Mechanical Engineering, 2012. – pp. 528.

3. **Lasercheck.** URL: <https://optical-dimensions.com/index.html> (address date: 18.04.2019)

4. **SILENOS® – Steel Inclusion Level Evaluation by Numerical Optical Systems.** URL: <https://it.mathworks.com/content/dam/mathworks/mathworks-dot-com/solutions/aerospace-defense/files/2017/expo-de/silenos-steel-inclusion-level-evaluation-by-numerical-optical-systems.pdf> (address date: 18.04.2019)

5. Petreshin, D.I., Khandozhko, V.A. Automated support of surface quality and machinery contact stiffness // *Science Intensive Technologies in Mechanical Engineering*. – 2018. – No.10 (88). – pp. 14-19.

6. Suslov, A.G., Pedtreshin, D.I. *Quality Support of Surfaces Worked Using Self-Learning Technological System* // STIN. – 2006. – No.1. – pp. 21-24.

7. Suslov, A.G., Petreshin, D.I. Automated support of Cx surface layer quality complex parameter at machining // *Science Intensive Technologies in Mechanical Engineering*. – 2011. – No.2. – pp. 34-40.

8. *Method for Normal Contact Stiffness Definition of Fixed Joints: methodical recommendations.* – M.: ARRIMACH, - 1982.

9. Medvedev, D.M., Khandozhko, V.A. Automated technological support of contact stiffness in machinery ground surfaces and their joints // *Bulletin of Bryansk State Technical University*. – 2015. – No.2 (46). – pp. 40-49.

10. *Parts Surface Engineering* / A.G. Suslov [et al.]; under the editorship of A.G. Suslov. – M.: Mechanical Engineering. 2008. – pp. 320.

Рецензент д.т.н. В.Ф. Безъязычный

УДК 678.067621.892

DOI: 10.30987/article_5d2635cb77dfd6.90010587

Ю.М. Зубарев, д.т.н.

(Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, 190121, С.-Петербург, Лоцманская ул., 3),

А.В. Приемышев, к.т.н.

(Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, 195651, С.-Петербург, Политехническая ул., 29)

E-mail: iuzubarev@mail.ru ; priemyshev52@mail.ru

Особенности стружкообразования при обработке полимерных композиционных материалов

Приведена схема равновесного состояния составляющих силы резания при ортогональном резании и определена роль каждой составляющей силы в процессе резания. Приведен анализ особенностей стружкообразования при лезвийной обработке полимерных композиционных материалов. Полученные результаты помогут оценить возможности физических моделей при резании заготовок из полимерных композитных материалов.

Ключевые слова: полимерные композиционные материалы; углепластики; лезвийная обработка; режимы резания; стружка.

Yu.M. Zubarev, Dr. Sc. Tech.

(Saint-Petersburg State Marine Technical University, 3, Lotsmanskaya Str., S-Petersburg, 190121)

A.V. Priyomyshev, Can. Sc. Tech.

(Peter the Great Polytechnic University of Saint-Petersburg, 29, Polytechnicheskaya Str., S-Petersburg, 195651)

Chips formation peculiarities at polymeric composite processing

A scheme of an equilibrium position of cutting force constituents at orthogonal cutting is shown and a role of each force constituent during cutting is defined. An analysis of chips formation peculiarities is presented at the edge processing of polymeric composites. The results obtained can assess potentialities of physical models at polymeric composite blank cutting.

Keywords: polymeric composites; carbon plastics; edge processing; cutting modes; chips.

Полимерные композиционные материалы (ПКМ) являются одним из наиболее востребованных материальных ресурсов современного промышленного производства. Особенно широко и эффективно они используются в высокотехнологичных отраслях. ПКМ обеспечивают в силовых конструкциях высокую надежность и долговечность, что помимо традиционных отраслей применения (авиация, космонавтика, судостроение) весьма актуально в строительной индустрии, энергетике, транспортном машиностроении. Однако технология обработки ПКМ резанием на данный момент ещё мало изучена и требует значительного внимания.

Как известно, понятие «обрабатываемость» включает в себя комплекс технологических свойств материала, характеризующих его влияние на различные стороны процесса резания: усилие и мощность резания, стойкость режущего инструмента, вид стружки и процесс стружкообразования, производительность обработки и качество обработанной поверхности.

Свойства композиционных материалов зависят от состава компонентов (искусственной смолы и наполнителей), их сочетания, количественного соотношения и прочности связи между ними. Армирующие материалы могут быть в виде волокон, жгутов, нитей, лент и многослойных тканей.

В качестве материала заготовок для исследований были взяты углепластики марки УГЭТ и ФУТ. Выбранный антифрикционный углепластик армирован углеродной тканью на основе эпоксидного связующего ЭД-2. Заготовки деталей трения предназначены для изготовления радиальных (опорных) и осевых (упорных) подшипников скольжения, направляющих, торцовых уплотнений различных машин и механизмов. Физико-механические характеристики образцов из УГЭТ приведены в табл.1 [1].

1. Физико-механические характеристики образцов, изготовленных из пресс-материала УГЭТ

Наименование показателя	Норма для марок	
	УГЭТ	ФУТ
Разрушающее напряжение при сжатии, МПа (не менее)	250	220
Изгибающее напряжение при разрушении, МПа (не менее)	200	200

Обработка ПКМ характеризуется не всегда контролируемым внутренним разрушением. Составляющие силы резания и вид стружки не всегда типичны, вследствие разницы механизмов внутреннего разрушения (вырывания) волокон. Таким образом, обрабатываемость ПКМ определяется физическими и механическими свойствами волокон и матрицы, содержанием (типом волокна) и его направленностью [1, 5]. Хотя полимерная матрица в армированном композите создает меньшее сопротивление обработке из-за более низкой прочности и жесткости по сравнению с армирующими волокнами, она оказывает значительное влияние на тип образования стружки.

Механическое поведение терморезактивных и термопластичных материалов под нагрузками сильно различается. Терморезактопласты характеризуются хрупкостью с очень низким коэффициентом удлинения. Термопластические матрицы, благодаря своей пластической структуре, могут иметь коэффициенты удлинения в несколько раз больше.

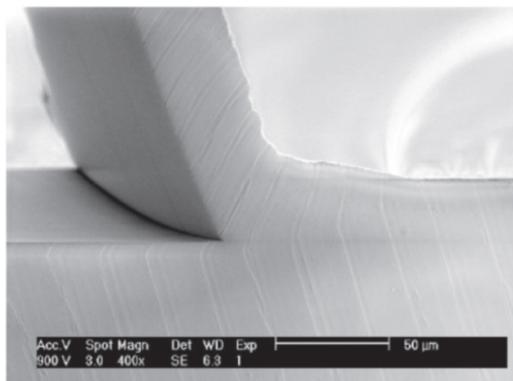
В зависимости от вязкости предельная прочность и коэффициент удлинения полимеров так же зависят от степени деформации. Прочность материала повышается, а предельное удлинение уменьшается, по мере увеличения степени деформации. Другими словами, материал «показывает» переход из мягкого состояния в хрупкое при увеличении степени деформации. Тип образуемой стружки различных полимеров будет существенно разли-

чаться при разных условиях обработки.

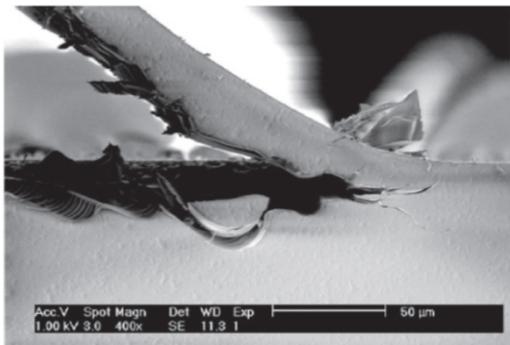
Увеличение угла в плане и уменьшение глубины резания приводит к уменьшению степени деформации, которая происходит при формировании стружки. Повышение скорости резания влияет на процесс обработки: с одной стороны, материал показывает высокую степень деформации и в результате разрушается при более низком напряжении или становится хрупким; с другой стороны, выделяемое тепло повышает температуру в зоне резания, увеличивает интенсивность диффузионных процессов в материале и повышает его текучесть [3].

ПКМ обладают малой пластической деформацией или вообще её отсутствием, а стружкообразование в основном контролируется степенью излома армирующего материала (фракцией).

Термореактивные пластики создают некоторую пластическую деформацию до момента излома, но не в той степени, которая требуется для создания направленной стружки. Поэтому они классифицируются, как хрупкие. Термопластики наоборот, показывают значительную эластичную пластическую деформацию до излома, что очень сильно влияет на обработку композитов. На рис.1 представлены типы стружек, полученные при обработке термопластов (рис. 1, а) и термореактопластов (рис. 1, б).



а)



б)

Рис. 1. Образование стружки матрицы:
а – термопласты; б – термореактопласты

Для упрощения анализа стружкообразования рассмотрим процесс двухмерного или ортогонального резания. Такая модель может внести некоторые погрешности в механику процесса стружкообразования, но позволяет значительно упростить рассмотрение и понимание данного процесса. При этом, как показывают расчеты, погрешности, которые могут возникнуть из-за такого упрощения, не превышают 10 % [4].

При ортогональном резании режущая кромка инструмента перпендикулярна вектору скорости резания v . Схематическое изображение ортогонального резания представлено на рис. 2. Силы резания, действующие на стружку: $R = R'$ – равнодействующая сила; F_c – сила резания, действующая вдоль направления скорости резания (основная сила); F_t – осевая сила, действующая перпендикулярно направлению скорости резания; F_f – сила трения на передней поверхности режущего клина; F_n – сила, действующая перпендикулярно передней поверхности.

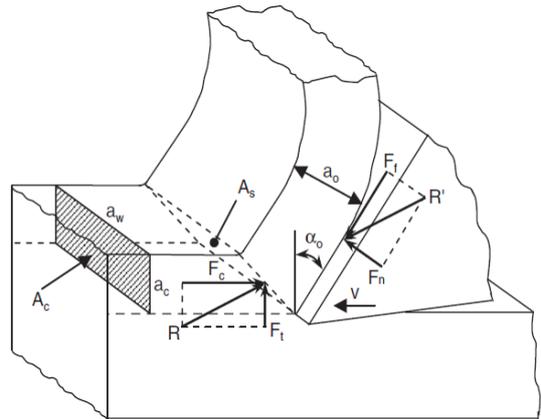


Рис. 2. Схематическое изображение ортогонального резания

Сдвиг плоскости в области A_s образуется в материале от точки режущей кромки и перемещается вверх, к корню стружки. Не срезанный материал толщиной a_s проходит через зону сдвига и подвергается сдвиговой деформации. В результате образуется стружка толщиной a_0 , которая, как правило, больше теоретической толщины стружки. Стружка удерживается в равновесии за счет равнодействующей силы R' , действующей на переднюю поверхность режущего инструмента. При ортогональном резании все силы движения и деформации находятся в плоскости, образуемой вектором скорости резания и в перпендикулярном ему направлении (см. рис. 2).

На рис. 3 показано влияние направления действия силы R в зависимости от угла ориентации волокон ПКМ. В этих случаях сила резания F_c и осевая сила F_t могут проецироваться силой сдвига F_s , действующей вдоль плос-

кости сдвига и силой F_n , действующей перпендикулярно к плоскости сдвига. При резании ПКМ с углом направленности волокон $\Theta = 0$ образуется стружка расслаивания.

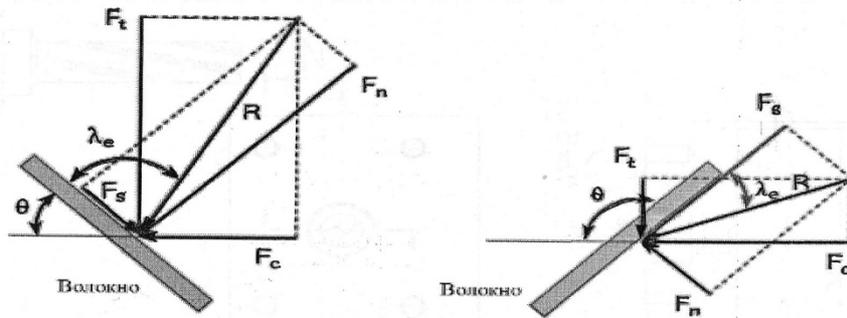
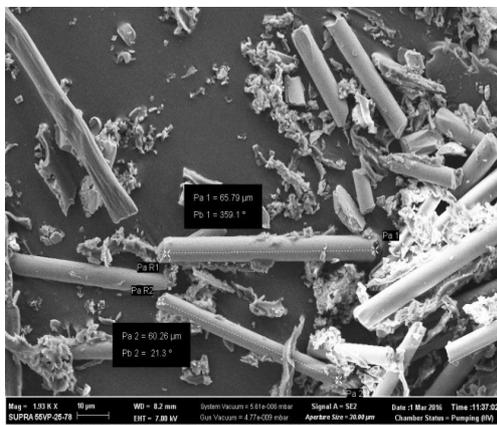
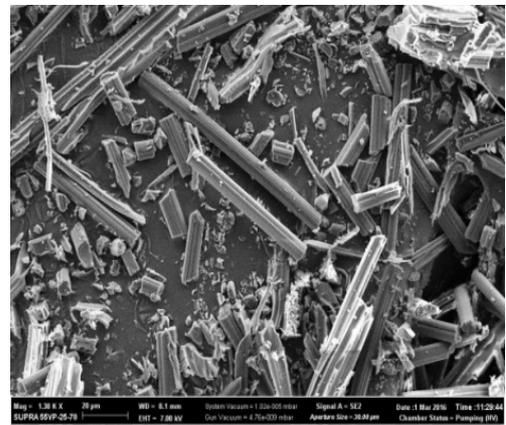


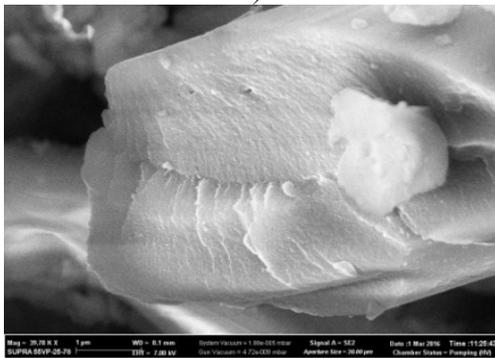
Рис. 3. Влияние направления действия силы R в зависимости от угла ориентации волокон ПКМ



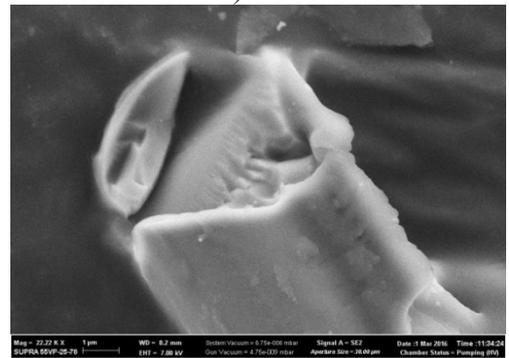
a)



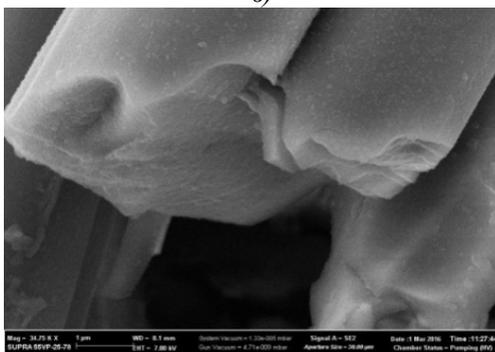
б)



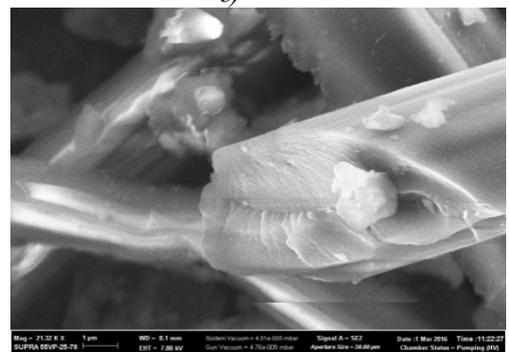
в)



г)



д)



е)

Рис. 4. Виды стружек при обработке ПКМ

Как показали исследования, на процесс стружкообразования основное влияние оказывают следующие факторы: передний угол режущего инструмента [3], материал волокна и материал матрицы (рис. 4).

Элементарная стружка образуется при обработке хрупких материалов, например, термореактопластов (рис. 4, а, б) и некоторых терморепластов с большим передним углом и большой глубиной резания (рис. 4, в, г). При обработке данных материалов перед плоскостью сдвига по наклонной образуется трещина; стружка генерируется посредством изгибающего момента, который влияет на образование стружки с момента достижения трещиной определенной длины. Это приводит к низкому качеству поверхности после обработки. На рис. 4, д, е показан тип стружки, полученной при обработке термопластов.

Выводы

1. При обработке ПКМ могут быть образованы несколько типов стружки в зависимости от типа полимера, геометрии инструмента и условий резания.

2. Для материалов, которые имеют высокую пластичность, образуется сливная стружка при условии малой скорости резания и большом положительном переднем угле инструмента. При этом шероховатость поверхности уменьшается.

3. Если полимеры не обладают высокой пластичностью, особенно это проявляется с терморепактивной матрицей, то образуется элементарная стружка. При этом толщина стружки равна глубине резания ($t = 1,0$).

4. Элементарная стружка образуется при обработке хрупких материалов, таких как термореактопласты и некоторые термопласты

с большим передним углом и большой глубиной резания. При этом наблюдается ухудшение качества поверхности после обработки.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Биков, Ю.А. Структура и свойства конструкционных наноматериалов // Справочник. Инженерный журнал. Приложение. – 2010. – №7. – С. 1-24.
2. Бобров, В.Ф. Основы теории резания материалов. – М.: Машиностроение, 1975. – 344 с.
3. Зубарев, Ю.М., Приемышев, А.В., Заостровский, А.С. Особенности технологии механической обработки углепластиков // Научно-технические технологии в машиностроении. – 2016. – №5(59). – С. 30-33.
4. Зубарев, Ю.М., Приемышев, А.В. Инновационные технологии обработки полимерных композиционных материалов // Научно-технические технологии в машиностроении. – 2017. – №8(74). – С. 36-42.
5. Зубарев, Ю.М. Механическая обработка композиционных материалов при сборке летательных аппаратов. – Сумы: Изд-во ИТД «Университетская книга», 2013. – 97 с.

REFERENCES

1. Bikov, Yu.A. Structure and properties structural nanomaterials // *Reference Book. Engineering Journal. Appendix.* – 2010. – No.7. – pp. 1-24.
2. Bobrov, V.F. *Fundamentals of Material Cutting Theory.* – M.: Mechanical Engineering, 1975. – pp. 344.
3. Zubarev, Yu.M., Priyomyshev, A.V., Zaostrovsky, A.S. Peculiarities of carbon plastic machining technology // *Science Intensive Technologies in Mechanical Engineering.* – 2016. – No.5 (59). – pp. 30-33.
4. Zubarev, Yu.M., Priyomyshev, A.V. Innovation technologies of polymeric composite processing // *Science Intensive Technologies in Mechanical Engineering.* – 2017. – No.8 (74). – pp. 36-42.
5. Zubarev, Yu.M. *Composite Machining at Aircraft Assembly.* – Sumy: Publishing House of ITD “University Book”, 2013. – pp. 97.

Рецензент д.т.н. В.Ф. Макаров

