

УДК 621.923.4

В.Ф. Макаров

Пермский национальный исследовательский политехнический университет,
г. Пермь, Россия

А.Е. Мешкас, В.В. Ширинкин

ОАО «Пермский завод «Машиностроитель»», г. Пермь, Россия

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОБЛЕМ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ СОВРЕМЕННЫХ ВЫСОКОПРОЧНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ, ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА ДЕТАЛЕЙ АВИАЦИОННОЙ И РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКОЙ ТЕХНИКИ

Описаны основные проблемы, возникающие при механической обработке (сверлении, разрезке, точении, фрезеровании) современных высокопрочных полимерных композиционных материалов в машиностроении. Проведено сравнение особенностей обработки полимерных композиционных материалов и обработки металлов и выполнено изучение процесса образования стружки при точении, фрезеровании и сверлении полимерных композиционных материалов на основе стеклоэпоксидных наполнителей. Проведены исследования применения современных методов обработки полимерных композиционных материалов. Выполнен анализ свойств полимерных композиционных материалов на основе стеклоэпоксидных, углерод-углеродных композиционных материалов. Представлены пути решения современных проблем механической обработки полимерных композиционных материалов. Проведен анализ качественной оценки результатов механической обработки полимерных композиционных материалов сс стеклоэпоксидными наполнителями и углерод-углеродными волокнами.

Ключевые слова: полимерные композиционные материалы, качество, сверление, разрезка, точение, фрезерование, дефекты, проблемы, анизотропия свойств, волокна, режущий инструмент, стойкость инструмента.

V.F. Makarov

Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation

A.E. Meshkas, V.V. Shirinkin

JSC "PZ "Mashinostroitel", Perm, Russian Federation

RESEARCH PROBLEMS MACHINING HIGH STRENGTH COMPOSITE MATERIALS USED FOR THE PRODUCTION OF DETAILS OF AVIATION AND SPACE-ROCKET TECHNICIANS

This paper aims to present the major contemporary issues that arise when machining (drilling, cut, turning, milling) of modern high-strength polymeric composite materials in mechanical engineering. A comparison of the features of processing of polymeric composite materials with metals and performed the study of the formation of chips when turning, milling and drilling of polymer composite materials based on glass-filled epoxy. Studied the use of modern methods of processing of polymer composite materials. The analysis of the properties of polymer composites based on glass epoxy, carbon-carbon composites. Presented solutions to contemporary problems of machining of polymeric composite materials. The analysis of the qualitative evaluation of machining of polymeric composite materials with glass-filled epoxy and carbon-carbon fiber.

Keywords: polymer composite materials, quality, drilling, cutting, turning, milling, defects, problems, anisotropic properties, fiber, cutting tools, resistance tooling.

Современные предприятия изготавливают продукцию гражданского и специального назначения для авиационной и ракетно-космической отрасли. Развитие этой наукоемкой техники неразрывно связано с разработкой новых конструктивных решений, прогрессивных технологий, совершенствованием существующих или созданием новых материалов. Среди новых материалов в последнее время большое внимание уделяется композиционным, обладающим уникальными свойствами.

Производство композитов в США в 2000–2013 гг. увеличивалось на 35–40 % ежегодно, и сегодня наблюдается аналогичная динамика. Композиционные материалы широко используются в конструкциях корпусов космических кораблей, в конструкциях автомобилей, современных газотурбинных авиационных двигателей типа ПС90-2А, ПД14 и др. Сегодня в отечественной промышленности для композиционных материалов применяют следующие группы материалов: стекловолокниты (препрег ВПС-34 на основе стеклоткани Т-10-14), углепластики, углерод-углеродные материалы и др.

Качество поверхности изделий, используемых в авиационной, ракетно-космической технике, играет исключительно важную роль в обеспечении высоких эксплуатационных показателей [1]. Примеры конструкторских решений и деталей из новых композиционных материалов показаны на рис. 1 [2].

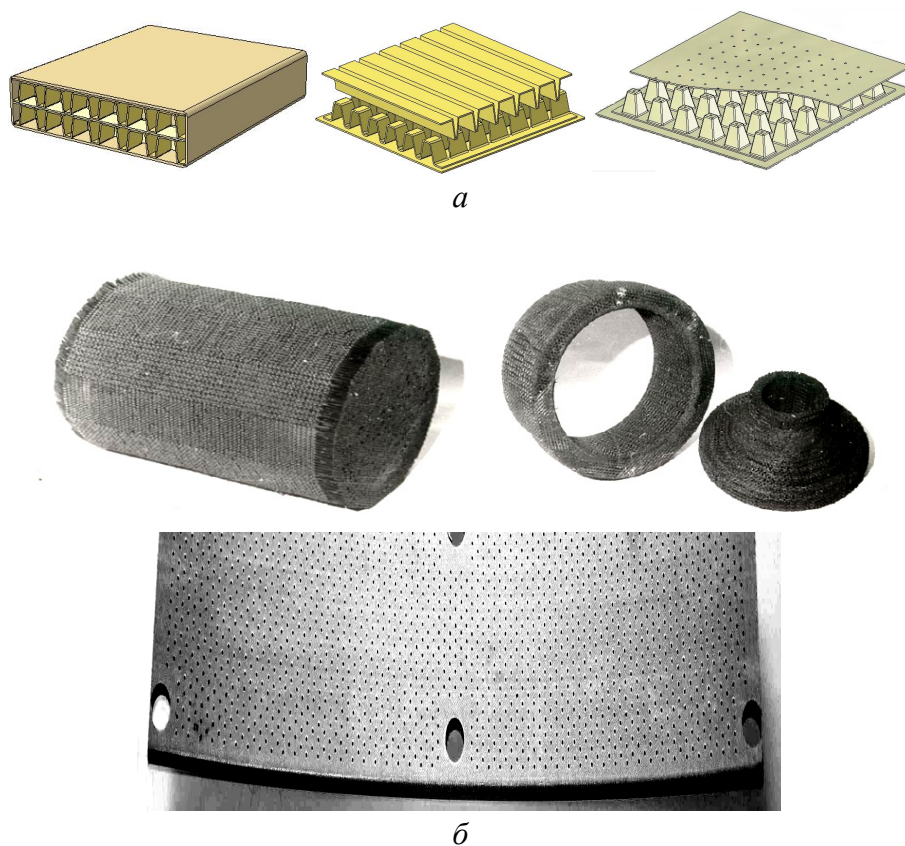


Рис. 1. Примеры структуры (а) и конструкций (б) деталей из композиционных материалов на основе стекловолкнитов и углерод-углеродных материалов

Композиционный материал представляет собой комбинацию из разнородных и нерастворимых друг в друге компонентов, соединяемых между собой в единое целое за счет адгезионного взаимодействия на границе их раздела. В зависимости от типа матрицы все многообразие композитов можно разделить на четыре группы: полимерные (ПКМ), металлические (МКМ), керамические (ККМ) и углерод-

углеродные (УУКМ). Наиболее прочными и хорошо освоенными являются композиционные материалы, армированные непрерывными стеклянными, арамидными, углеродными, борными и металлическими волокнами (рис. 2) [3, 4].

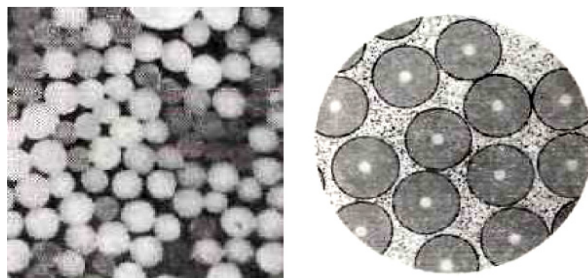


Рис. 2. Примеры структур стеклопластика

Сегодня становится ясно, что невозможно напрямую эффективно использовать традиционные рекомендации и методы, применяемые при обработке резанием труднообрабатываемых сталей и сплавов. Особенности структуры и свойств, а также специфика композиционных материалов как объекта обработки резанием выделяет их в особую группу труднообрабатываемых материалов, которая характеризуется особым характером протекания процесса резания [5]. Сегодня становится невозможно использовать традиционные рекомендации при обработке резанием сложных деталей [6].

В процессе изготовления деталей из композиционных материалов выявляются весьма серьезные проблемы при механической обработке. Это прежде всего связано с обеспечением качества обработанной поверхности и точности размеров. Основные дефекты поверхности композиционного материала при воздействии режущего инструмента следующие: неравномерная шероховатость; большая волнистость; вырывы и сколы на торцах; расслоение волокна, ворсистость; трещины и царапины; отклонение формы и взаимного расположения поверхностей.

Чтобы рассмотреть причины появления дефектов, проведем сравнение процессов резания жаропрочного сплава и композиционного материала. Для этого сравним изображения зоны резания металла и композита в виде корней стружек (рис. 3).

Структура металла на глубине однородна. Впереди режущего клина видна зона пластической деформации – зона сжатия металла, затем зона сдвига элементов стружки и образование сплошной сливной

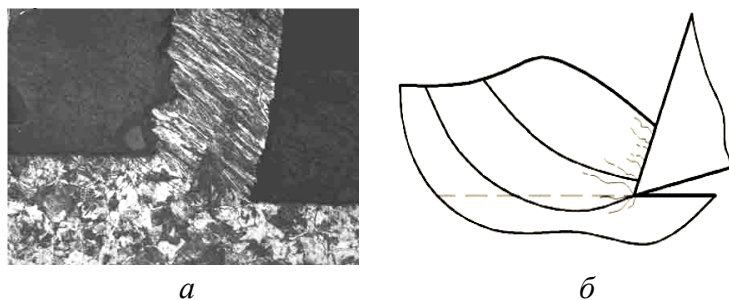


Рис. 3. Микрофотография корня стружки из стали 40Х (а) и схема деформации (б), полученная при анализе хода резания композиционного материала

стружки. Со стороны задней поверхности инструмента поверхность металла слегка пластически деформирована. Сравнивая этот процесс со стружкообразованием при резании металлов, отметим, что во многом он несет в себе признаки образования элементной стружки и одновременно стружки надлома. Вместе с тем отдельные элементы и частицы удаляемого материала, как правило, остаются связанными между собой обрывками волокон наполнителя, т.е. стружка сходит в виде непрерывной ленты. Формированию стружки сопутствует образование мелких частиц материала и пыли. По мере увеличения ширины площадки износа по задней поверхности инструмента связь между отдельными элементами стружки становится менее прочной. При достижении определенной степени износа стружка начинает распадаться на отдельные мелкие кусочки разной величины. Такой тип стружки характерен для точения, сверления и фрезерования.

На рис. 4 представлена фотография процесса образования стружки при точении изделий с использованием полимерного композиционного материала.



Рис. 4. Точение изделия из ПКМ

Анализ процесса деформации композиционного материала показывает, что, в отличие от металла, у композиционных материалов наблюдается:

1. Анизотропия свойств материалов, вследствие чего деформации не передаются через слоистую структуру и связующую смолу, а происходит разрушение структуры материала в виде продольных трещин и отделения мелких частиц пыли на передней поверхности инструмента вместо стружки. Рассмотрим подробнее механизм передачи напряжений от матрицы к наполнителю в зависимости от его конфигурации. В простейшем варианте, когда полимер армирован однонаправленными непрерывными волокнами и подвергается растяжению в направлении их ориентации, деформация компонентов одинакова и возникающие в них напряжения пропорциональны модулю упругости волокон матрицы. Но такие варианты композиционных материалов редко встречаются. Используются волокна дискретные, с неоднородным распределением напряжений по длине волокна. Напряжение на концах волокна отсутствует, но возникают касательные напряжения на границе волокно – матрица, которые постепенно вовлекают волокно в работу. Рост растягивающих напряжений в волокне продолжается до тех пор, пока они не достигнут среднего уровня напряжений, наблюдающихся в непрерывном волокне.

2. Высокая твердость и прочностные характеристики стеклоуглеволокна композиционных материалов препятствуют нормальному процессу резания, вызывают рост силы сопротивления резанию.

3. Высокая твердость наполнителя и его абразивное воздействие на режущий инструмент вызывают его повышенный износ.

4. Низкая теплопроводность композитов, которая существенно влияет на соотношение составляющих теплового баланса при резании, в отличие от металла. При повышенных температурах, сопровождающих обработку резанием, это вызывает нарушение устойчивости и разрушение химических связей молекулярных цепей полимера, появление прижогов с образованием коксового слоя, выделением газообразных продуктов распада связующего, что сопровождается потемнением поверхности материала. Для ответственных изделий ракетно-космической техники это является недопустимым дефектом.

5. Высокие упругие свойства композиционных материалов, что вызывает повышенный износ инструмента по задней поверхности из-за интенсивных контактных явлений.

При резании композиционных материалов с дискретными армирующими волокнами, отличающихся низкой пластичностью, на обработанной поверхности систематически образуются микротрещины в виде надразов, направленные примерно перпендикулярно линии среза [7]. В этом случае можно говорить о формировании на обработанной поверхности дефектного слоя определенной глубины. Это явление связано с высокими упругими деформациями композиционного материала в зоне стружкообразования, особенно в области контакта задних поверхностей инструмента с обрабатываемой заготовкой. Упругое восстановление материала приводит к увеличению площади контакта. На стыке трения развиваются высокие контактные давления и температуры и, как следствие, большие касательные напряжения в направлении движения резания, способные вызвать разрушение поверхностного слоя материала, испытывающего растягивающие напряжения. Интенсивность протекания рассмотренных процессов зависит от индивидуальных особенностей обрабатываемого композиционного материала.

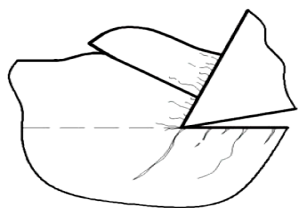


Рис. 5. Образование трещин на обработанной поверхности

У некоторых марок композиционных материалов отдельные микротрещины в области режущего лезвия могут развиваться в макротрещины, пронизывающие поверхностный слой материала и расположенные существенно ниже линии среза (рис. 5). На выходе режущего инструмента такая трещина резко уходит за пределы зоны стружкообразования и вызывает скол материала на части обработанной поверхности. Размеры образующихся сколов существенно зависят от ряда факторов, в первую очередь от параметров режима резания, геометрических параметров лезвия и степени износа режущего инструмента [8].

Перчислим основные проблемы, возникающие при изготовлении узлов из композиционных материалов:

1. Необходимость изготовления дорогостоящей специальной оснастки для проведения операций механической обработки изделий. На примере деталей, средние габариты которых более 1000 мм, выявилось, что на карусельном станке провести обработку не представляется возможным из-за нагрузки на деталь при обработке токарными резцами (деталь бьется, слои композиционного материала вырываются)

(рис. 6). Потребовалось изготовление дополнительной оснастки для базирования и крепления детали на поворотном столе станка.



Рис. 6. Общий вид дефектов детали из композита диаметром 2000 мм

2. Низкое качество обработанной поверхности (согласно конструкторской документации $Ra = 6,3$ мкм, фактически местами $Ra > 12,5$ мкм). Стандарты на шероховатость разработаны для металлических материалов, и специфика свойств композиционных материалов в них не учтена, поэтому исследование качества поверхности композитов, в частности их шероховатости после механической обработки, имеет большое практическое значение.

3. Низкая производительность операции механической обработки, так как эта операция требует высокой квалификации рабочего, а также длительный цикл по настройке и выверке детали на станке. Необходимо отметить, что подачи и скорости резания нельзя увеличить из-за высокой нагрузки на деталь при обработке токарными резцами и фрезами.

4. На поверхности возникают неровности: в слоях материала изменяется структура и химический состав, а также физико-химические и эксплуатационные свойства изделий.

Таким образом, полученный опыт при обработке изделий из ПКМ показал, что эффективность обработки можно значительно повысить, если при изготовлении ПКМ учитывать не только требуемые

свойства получаемой конструкции, но и то, как полученный материал будет обрабатываться механическим путем.

В работе были рассмотрены основные проблемы обработки ПКМ. Основным способом обработки ПКМ является лезвийная механическая обработка, способы гидроабразивной резки эффективны, но не всегда подходят (как правило из-за габаритов изделий), а резка на плазменных и лазерных установках недопустима из-за невысокой температуры плавления связующих смол.

На рис. 7 представлены варианты возможной механической обработки изделий из ПКМ.

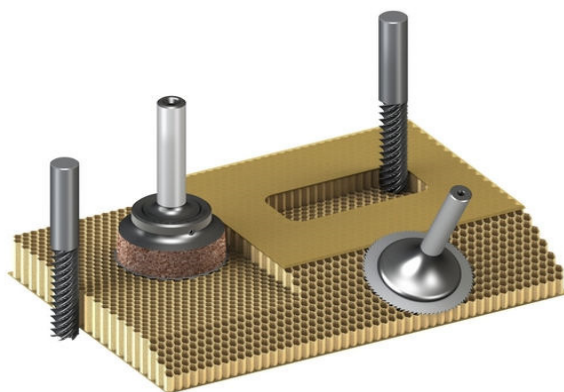


Рис. 7. Варианты применения режущего инструмента

При решении задачи механической обработки ПКМ предприятиями совместно с кафедрой инновационных технологий машиностроения ПНИПУ были проведены исследования по таким направлениям, как обработка КМ с технологическими заполнителями (парафин, пластмасса, вода); повышение скорости резания и увеличение сечения срезаемого слоя (свойства КМ не позволяют применять высокие скорости резания); метод точения с предразрушением срезаемого слоя [1]; кинематические методы (вибрационное резание при сверлении панелей звукопоглощающих конструкций авиационных двигателей, сверление на роботе «Кука»); резание с дополнительным технологическим покрытием (при точении корпусов); криогенная обработка (охлаждение жидким азотом при использовании уже существующей технологии, которая применяется при обработке в вакуумных печах). Необходимо отработать применение специально спроектированного многолезвийного инструмента с поликристаллическим алмазным покрытием (или

рассмотреть возможность применения выращивания алмазов) и применение мотор-шпинделя (который обеспечит более высокие обороты), так как для обеспечения качества и снижения себестоимости необходима высокая стойкость инструмента. Следует также рассмотреть возможность использования фрез с покрытием из поликристаллического алмаза с впаянными профильными вставками.

Процесс механической лезвийной обработки ПКМ в настоящее время целиком не изучен. Для выполнения современных требований по обработке ПКМ нет возможности использовать систематизированные рекомендации, известны лишь частные решения. Все существующие эмпирические зависимости не учитывают анизотропных свойств обрабатываемых ПКМ. Основной целью проводимых исследований является повышение эффективности обработки ПКМ на основе разработки и исследования технологических возможностей, новых путей стабилизации динамики процесса механической обработки изделий из ПКМ.

Проведение данных исследований, а самое главное – применение на практике методов более эффективной механической обработки композитов позволяет существенно повысить производительность и качество обработки изделий на машиностроительных предприятиях, а также снизить их стоимость.

Список литературы

1. Ярославцев В.М. Высокоэффективные технологии обработки изделий из композиционных материалов: учеб. пособие. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2012.
2. Ричардсон М. Промышленные полимерные композиционные материалы / под ред. П.Г. Бабаевского. – М.: Химия, 1980. – 472 с.
3. Перепелкин К.Е. Армирующие волокна и волокнистые полимерные композиты. – М.: Научные основы и технологии, 2009. – 658 с.
4. Нильсен Л. Механические свойства полимеров и полимерных композиций. – М.: Химия, 1978. – 310 с.
5. Марков А.М. Технологические особенности механической обработки деталей из композиционных материалов // Научные технологии в машиностроении. – 2014. – № 7. – С. 3–5.

6. Оценка структурных дефектов углеродных волокон и полимерных композиционных материалов на их основе: учеб. пособие / Ю.М. Миронов [и др.]. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2011.

7. Полимерные композиционные материалы. Прочность и технологии / С.Л. Баженов [и др.]. – М.: Интеллект, 2009. – 352 с.

8. Полимерные композиционные материалы. Свойства. Структура. Технологии / под ред. А.А. Берлина. – СПб.: Профессия, 2009. – 560 с.

References

1. Iaroslavtsev V.M. Vysokoeffektivnye tekhnologii obrabotki izdelii iz kompozitsionnykh materialov [High-technology machining of composite materials: a training manual]. Moscow: Izdatel'stvo Moskovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta imeni N.E. Baumana, 2012.

2. Richardson M. Promyshlennye polimernye kompozitsionnye materialy [Industrial polymer composite materials]. Pod red. Babaevskogo P.G. Moscow: Khimiia, 1980. 472 p.

3. Perepelkin K.E. Armiruiushchie volokna i voloknistye polimernye kompozity [Reinforcing fiber and fibrous polymeric composites]. Moscow: Izdatel'stvo Nauchnye osnovy i tekhnologii, 2009. 658 p.

4. Nil'sen L. Mekhanicheskie svoystva polimerov i polimernykh kompozitsii [Mechanical properties of polymers and polymer compositions]. Moscow: Khimiia, 1978. 310 p.

5. Markov A.M. Tekhnologicheskie osobennosti mekhanicheskoi obrabotki detalei iz kompozitsionnykh materialov [Technological features machining of parts made of composite materials]. *Naukoemkie tekhnologii v mashinostroenii*, 2014, no. 7, pp. 3-5.

6. Mironov Iu.M., Khrapovitskaia Iu.V., Makeev M.O., Neliub V.A. Otsenka strukturnykh defektov uglerodnykh volokon i polimernykh kompozitsionnykh materialov na ikh osnove: uchebnoe posobie [Evaluation of structural defects in carbon fibers and composite materials on their basis: a training manual]. Moscow: Izdatel'stvo Moskovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta imeni N.E. Baumana, 2011, pp. 1-2.

7. Bazhenov S.L., Berlin A.A., Kul'kov A.A., Oshmian V.G. Polimernye kompozitsionnye materialy. Prochnost' i tekhnologii [Polymer composite materials. Strength and technology]. Moscow: Izdatel'stvo Intellekt, 2009. 352 p.

8. Polimernye kompozitsionnye materialy. Svoistva. Struktura. Tekhnologii [Polymer composite materials. Properties. Structure. Technology]. Ed. A.A. Berlin. Sankt Peterburg: Professia, 2009. 560 p.

Получено 06.05.2015

Макаров Владимир Федорович (Пермь, Россия) – доктор технических наук, профессор, академик РАН, заместитель заведующего кафедрой «Инновационные технологии машиностроения» Пермского национального исследовательского политехнического университета; e-mail: makarovv@pstu.ru.

Мешкас Александр Евгеньевич (Пермь, Россия) – начальник производственно-диспетчерского отдела ОАО «ПЗ “Машиностроитель”»; e-mail: a-meshkas@mail.ru.

Ширинкин Виталий Владимирович (Пермь, Россия) – начальник отдела управления качеством ОАО «ПЗ “Машиностроитель”»; e-mail: v-shirinkin@pzmash.perm.ru.

Makarov Vladimir (Perm, Russian Federation) – Doctor of Technical Sciences, Professor, Academician of RAE, Deputy. Head of Department “Innovative Technologies of Engineering”, Perm National Research Polytechnic University; e-mail: makarovv@pstu.ru.

Meshkas Alexander (Perm, Russian Federation) – Head of Production and Dispatch, Department JSC "PZ "Mashinostroitel"; e-mail: a-meshkas@mail.ru.

Shirinkin Vitaly (Perm, Russian Federation) – Head of Quality Management, JSC "PZ "Mashinostroitel"; e-mail: v-shirinkin@pzmash.perm.ru.