

**Ключевые слова:**

полимерные композиционные материалы, качество, сверление, резка, точение, дефекты

**Keywords:**

polymer composite materials, quality, drilling, cutting, turning, defects

# ПУТИ РЕШЕНИЯ ПРОБЛЕМ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ НА МАШИНОСТРОИТЕЛЬНОМ ПРЕДПРИЯТИИ

**Александр МЕШКАС, Владимир МАКАРОВ, Виталий ШИРИНКИН**

Представлены основные особенности, возникающие при механической обработке (сверлении, резке, точении, фрезеровании) полимерных композиционных материалов в специальном машиностроении, а также современные пути их решения, направленные на повышение эффективности обработки КМ.

Describes main features that arise when machining (drilling, cutting, turning, milling) polymer composite materials in the special mechanical engineering, as well as modern ways of their solutions to improve the effectiveness of composite materials treatment.

Развитие ракетно-космической техники неразрывно связано с разработкой новых конструктивных решений, прогрессивных технологий, совершенствованием существующих или созданием новых материалов. К широко известным материалам относятся металлы, керамики и полимеры, включая резину. Металлы упруго-пластичны и прочны, работают в широком диапазоне температур, при этом подвержены коррозии, а их плотность, не считая легких сплавов, очень высока. Полимеры, напротив, легкие, пластичные, химически стойкие, но имеют низкие прочность, твердость и температуру плавления. Керамики — жаростойкие, твердые, коррозионностойкие, но очень хрупкие.

При разработке современной ракетно-космической техники широко применяются композиционные материалы, обладающие уникальными свойствами. Сегодня в отечественной промышленности в качестве композитов применяют следующие группы материалов: стекловолокниты (препрег

ВПС-34 на основе стеклоткани Т-10-14); углепластики; углерод-углеродные материалы и др. Примеры конструктивных решений при изготовлении деталей из композиционных материалов показаны на *рис. 1*.

Качество поверхности изделий, используемых в авиационной, ракетно-космической технике играет исключительно важную роль в обеспечении высоких эксплуатационных показателей изделий.

Особенности структуры и свойств, а также специфика композиционных материалов, как объекта обработки резанием, выделяют их в особую группу труднообрабатываемых материалов, которая характеризуется своими закономерностями протекания процесса резания, что делает невозможным эффективное использование методов и рекомендаций по обработке резанием металлов. Для композиционных материалов необходимо проведение специальных исследований в широком диапазоне технологических процессов.

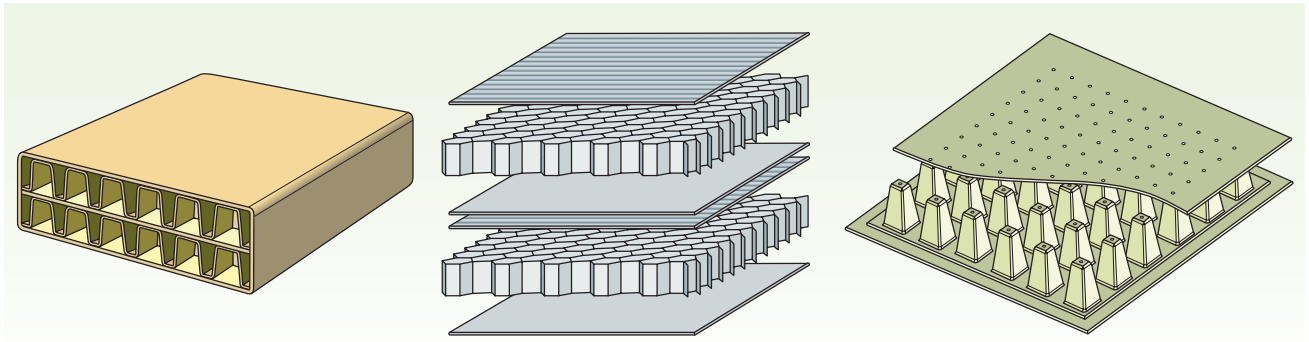


Рис. 1. Примеры структуры композиционных материалов на основе стекловолокон и углерод-углеродных материалов

В процессе изготовления узлов из композиционных материалов постоянно возникают проблемы при механической обработке. Связано это с тем, что при проектировании закладываются новые малоизученные материалы. В процессе их обработки на поверхности возникают неровности, в поверхностных слоях материала изменяется структура и химический состав, а также физико-химические и эксплуатационные свойства изделий [3]. Примеры типичных дефектов приведены на рис. 2.

Необходимо отметить, что одним из важнейших составляющих качества поверхности является ее шероховатость, которая в настоящее время регламентируется ГОСТ 25142-82 [5] и ГОСТ 2789-73 [4]. Указанные нормативные документы распространяются на различные материалы, но специфика композиционных материалов в них не учтена, поэтому исследование качества поверхности композитов, в частности их шероховатости после механической обработки, имеет большое практическое значение. На поверхности изделий из композиционного материала под воздействием режущего инструмента могут возникать дефекты следующих типов: шероховатость; волнистость; вырывы и сколы; ворсистость; трещины и царапины; отклонение формы и взаимного расположения поверхностей.

Рассмотрим основные отличия композиционных материалов от металлов:

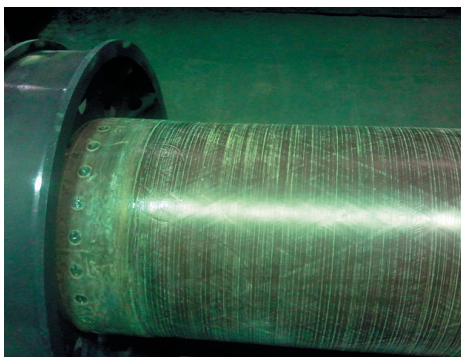


Рис. 2. Примеры дефектов изделий из ПКМ

- 1) анизотропия свойств;
- 2) высокие прочностные характеристики
- 3) слоистая структура;
- 4) высокая твердость наполнителя и его абразивное воздействие на режущий инструмент;
- 5) низкая теплопроводность композитов, которая существенно влияет на соотношение составляющих теплового баланса при резании в отличие от металла;
- 6) высокие упругие свойства композиционных материалов, что вызывает повышенный износ инструмента по задней поверхности из-за интенсивных контактных явлений.

В части п. 4 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, а 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.

Что касается низкой теплопроводности композиционных материалов (п. 5), то при повышенных температурах, сопровождающих обработку резанием, возникает нарушение устойчивости и происходит разрушение химических связей молекулярных цепей полимера. Могут появляться прижоги с образованием коксового слоя, выделением газообразных продуктов распада связующего, что сопровождается потемнением поверхности мате-

риала и для ответственных изделий ракетно-космической техники является недопустимым дефектом.

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);
- углерод-углеродные (УУКМ).

Наиболее прочными и хорошо освоенными являются композиционные материалы, армированные непрерывными стеклянными, арамидными, углеродными, борными и металлическими волокнами.

Используемые полимерные композиционные материалы на основе арамидных волокон (СВМ, Армос, Русар) обладают уникальным комплексом свойств: высокой прочностью при растяжении, высоким модулем упругости, термостабильностью, хорошими усталостными и диэлектрическими свойствами. Благодаря низкой плотности, арамидные волокна по удельной прочности превосходят все известные в настоящее время армирующие волокна и металлические сплавы, уступая по удельному модулю упругости углеродным и борным волокнам. Арамидные волокна не плавятся, а карбонизируются при температурах выше 350 °С. Арамидные волокна применяют для изготовления корпусов изделий.

В то же время именно уникальные свойства композиционных материалов становятся причиной проблем, возникающих в процессе обработки изделий. Поэтому производство деталей и узлов из композиционных материалов с гарантированным качеством обработанной поверхности, при высокой производительности обработки, является актуальной задачей для предприятий ракетно-космической отрасли.

Отечественными учеными, в частности такими как А.М. Розенберг и Н.Н. Зорев, были глубоко проработаны вопросы связи закономерностей пластической деформации при испытаниях металлов на растяжение-сжатие с закономерностями пластических деформаций при резании. В то же время, о теоретических взаимосвязях при резании ПКМ известно крайне мало. Недостаток информации обусловлен, во-первых, новизной некоторых видов ПКМ (по сравнению с металлами); во-вторых, сами по себе ПКМ представляют собой гетерогенную композицию (вариаций армирования волокнами великое множество, что осложняет систематизи-

рованное математическое описание); в-третьих, изначально в СССР ПКМ предназначались исключительно для использования в ВПК (для авиационных и ракетных изделий), в связи с чем многие прочностные характеристики и по сей день засекречены. Наиболее полно эти материалы систематизированы в работах А.А. Степина.

Анализ опыта мировых лидеров производства изделий из КМ, таких как Великобритания, Франция, Швейцария (Sandvik Coromant) и КНР показывает, что они разрабатывают и внедряют инструменты с алмазными покрытиями и различными вариантами геометрии. В то же время, несмотря на стремительные темпы роста исследований и производства углеродных материалов, дисбаланс производства и применения не уменьшается, например производство композитов в США в период 2000–2013 годов увеличивалось на 35–40% в год.

Основными направлениями повышения эффективности обработки композиционных материалов, используемых в продукции гражданского назначения, а также продукции специального назначения, являются применение фрезерования с высокими диапазонами вращения шпинделя станка. Причем фрезерование не только концевыми фрезами, но и фрезами с алмазным напылением (включая применение попутного и встречного фрезерования).

Суммируя результаты анализа мирового опыта решения проблем, возникающих в процессе обработки резанием изделий из КМ, можно предложить:

- **при сверлении** использовать роботизированную технику, а также применять методы вибрационного сверления (с компенсирующими колебаниями);
- **при фрезеровании** применять импортный инструмент с алмазным покрытием (фирм Sandvik Coromant, Ford и т.д.).

Но последние тенденции, связанные с введением против России экономических санкций, требуют находить альтернативные варианты – использовать инструменты отечественного производства.

Таким образом, актуальной задачей становится повышение производительности при изготовлении изделий за счет применения новых конструкций режущего инструмента, подбора оптимальных режимов резания. Также необходимо изучение термодинамических явлений, математическое моделирование процесса механической обработки, что в конечном результате должно привести к повышению эффективности, качества и снижению себестоимости.

Основными путями решения поставленной нами задачи являются:



- учет особенности обработки наполнителей при проектировании композиционных материалов для более эффективной механической обработки;
- обработка КМ с технологическими заполнителями (пластмасса, вода в замороженном виде);
- повышение скорости резания и увеличение сечения срезаемого слоя (хотя свойства КМ не позволяют применять высокие скорости резания);
- расширение метода широколезвийной обработки (минус данного способа — дорогостоящий специальный инструмент);
- точение с предразрушением срезаемого слоя (возможно применение на песчано-полимерных оправках для различных изделий);
- кинематические методы (вибрационное резание при сверлении панелей ЗПК авиационных двигателей);
- резание с дополнительным технологическим покрытием (при точении корпусов крылатых ракет);
- обработка терморезанием (охлаждение ЗГ азотом);
- поиск новых методов обработки композиционных материалов (гидроабразивная обработка и т.д.).

Для повышения эффективности механической обработки ПКМ необходимо:

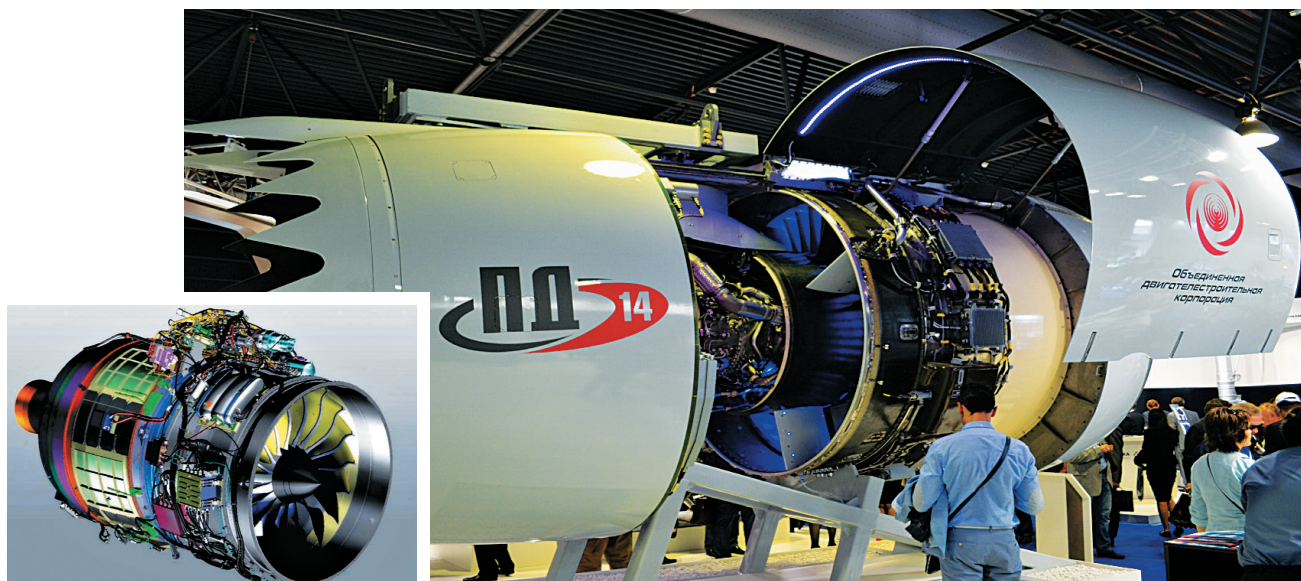
- получить аналитическим путем выражения для нахождения силовых параметров, являющихся основными при сверлении (осевая сила);
- разработать способы стабилизации процесса фрезерования, сверления, точения;
- разработать практические рекомендации по технологическим параметрам сверления, позволяющим достигать требуемого качества изделий из ПКМ;
- повысить качество обработки резанием изделий из ПКМ на базе подбора геометрии инструмента;
- определить эмпирические зависимости силовых характеристик при обработке изделий из ПКМ.

В качестве рекомендаций также следует отметить необходимость достижения требуемого уровня качества при обработке композитов (учитывая примеры дефектов, приведенные на рис. 2. Также может быть рассмотрена возможность использования фрез с покрытием из поликристаллического алмаза с впаянными профилными вставками.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основной технологической предпосылкой повышения стабильности, эффективности и качества обработки изделий из ПКМ в машиностроении является применение новых эффективных способов обработки. Можно сформулировать общие технологические принципы повышения стабильности и качества обработки ПКМ. Для этого должен быть стабилизирован сам процесс формообразования изделия из ПКМ. Способы механической обработки следует рассматривать в двух направлениях:

- технологические факторы:



- ✓ режимы резания,
- ✓ кинематика процесса (вынужденные колебания инструмента или заготовки);
- конструктивные факторы:
  - ✓ материал режущей части,
  - ✓ геометрия инструмента.

Основным способом обработки ПКМ является лезвийная механическая обработка, поскольку способы гидроабразивной резки, как правило, не подходят из-за габаритов изделий, а резка на плазменных и лазерных установках недопустима.

Так как процесс механической лезвийной обработки ПКМ в настоящее время детально не изучен, для выполнения современных требований по обработке ПКМ нет возможности использовать систематизированные рекомендации, известны лишь частные решения. Все существующие эмпирические зависимости не учитывают анизотропные свойства 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. Предложено также рассмотреть возможность проектирования, изготовления и применения специального режущего инструмента (фрез с упрочняющим покрытием отечественного производства) при фрезерной обработке, а также при обработке на карусельной станке фрезой (вместо токарной обработки резцом). Проведение данных исследований, а особенно применение на практике методов более эффективной механической обработки композитов позволит существенно повысить производительность и качество обработки изделий и снизить их стоимость.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Ярославцев В.М. Высокоэффективные технологии обработки изделий из композиционных материалов: учеб. пособие. — М.: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2012. С. 4–6.
2. Комков М.А., Тарасов В.А. Технология намотки композиционных конструкций ракет и средств поражения: учеб. пособие. — М.: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2011.
3. Ягодкин Ю.Д., Сулима А.М., Шулов В.А. Поверхностный слой и эксплуатационные свойства деталей машин. — М.: Машиностроение, 1988.
4. ГОСТ 2789-73. Шероховатость поверхности. Параметры и характеристики.
5. ГОСТ 25142-82. Шероховатость поверхности. Термины и определения.
6. Каталог: Инструментальные решения «Sandvik Coromant» Россия / СНГ. — ООО «Сандвик», 2014. С. 2–8.
7. Марков А.М. Технологические особенности механической обработки деталей из композиционных материалов // Научные технологии в машиностроении. 2014. № 7. С. 3–5.

**Александр Евгеньевич МЕШКАС** —

начальник производственно-диспетчерского отдела АО «ПЗ «Машиностроитель», аспирант ПНИПУ

**Владимир Федорович МАКАРОВ** —

доктор технических наук, профессор, академик РАЕ, заместитель заведующего кафедрой ИТМ ПНИПУ

**Виталий Владимирович ШИРИНКИН** —

начальник отдела управления качеством АО «ПЗ «Машиностроитель»

## ВИАМ напечатал малоразмерный газотурбинный двигатель

Специалисты Всероссийского научно-исследовательского института авиационных материалов (ВИАМ) впервые в России изготовили по аддитивной технологии прототип малоразмерного газотурбинного двигателя (МГТД) для беспилотных летательных аппаратов. Работа проводилась совместно с Фондом перспективных исследований. Малоразмерный газотурбинный двигатель был изготовлен полностью на базе аддитивного производства ВИАМ по новой технологии послойного лазерного сплавления с использованием металлопорошковых композиций жаропрочного и алюминиевого сплавов, которые также созданы специалистами института. Эта технология позволяет получить деталь в 30 раз быстрее, чем традиционными способами.

Как заявил генеральный директор ВИАМ академик РАН Евгений Каблов, благодаря применению аддитивных технологий удалось напечатать детали двигателя с уникальными параметрами. «Например, толщина стенки камеры сгорания этого двигателя составляет 0,3 мм. Таких параметров можно достичь, только используя 3D-печать», — подчеркнул он.

Напомним, что первый успешный опыт внедрения аддитивных технологий в ВИАМ был осуществлен в 2015 году. Тогда впервые в нашей стране специалисты института изготовили завихритель фронтального устройства камеры сгорания перспективного двигателя ПД-14. В настоящее время напечатано более 200 завихрителей.

[www.viam.ru](http://www.viam.ru)