

УДК 678.8:66.022.5

А.Е. Раскутин<sup>1</sup>, А.В. Хрульков<sup>1</sup>, Р.И. Гириш<sup>1</sup>

## ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ МЕХАНООБРАБОТКИ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ ПРИ ИЗГОТОВЛЕНИИ ДЕТАЛЕЙ КОНСТРУКЦИЙ (обзор)

DOI: 10.18577/2307-6046-2016-0-9-12-12

*Рассматриваются способы и технологические приемы механообработки полимерных композиционных материалов (ПКМ). Описываются особенности обработки, выбор инструмента, режимы и способы обработки ПКМ, а также проблемы, возникающие при изготовлении отверстий в конструкциях из ПКМ.*

*Основными задачами при внедрении композитов в разрабатываемые конструкции летательных аппаратов в настоящее время являются:*

*– разработка и освоение новых материалов и технологических процессов, направленных на снижение технологических циклов при изготовлении конструкций, повышение качества путем совершенствования технологий обработки ПКМ, повышение стойкости инструментов при механической обработке, оптимизация режимов резания, внедрение универсальных способов неразрушающего контроля готовой продукции;*

*– снижение цен на исходное сырье и технологию его переработки;*

*– минимизация вредного воздействия на природу, освоение зеленых технологий, снижение температур переработки, времени изготовления, создание и освоение технологических процессов для исключения последующей обработки деталей при сборочных операциях;*

*– максимальное внедрение в технологические процессы производства конструкций из ПКМ автоматизированного оборудования с целью повышения качества и снижения циклов и трудоемкости – уровни механизации и автоматизации должны быть соизмеримы и оптимальны с учетом объемов серийного производства;*

*– для повышения эксплуатационной надежности при проектировании конструкций из композиционных материалов необходимо предусматривать установку специальных электронных датчиков для постоянного контроля состояния конструкций в условиях эксплуатации;*

*– внедрение и освоение современных видов механообработки как наиболее трудоемких, технологически сложных и затратных в производстве – например, на процессы сверления и фрезерования при обработке ПКМ приходится до 65% трудоемкости производства деталей.*

*Работа выполнена в рамках реализации комплексного научного направления 13.2. «Конструкционные ПКМ» («Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года») [1].*

**Ключевые слова:** полимерные композиционные материалы, механическая обработка, технологические процессы, обработка деталей, летательные аппараты, эксплуатационная надежность.

*The methods and techniques of machining technology for polymer composite materials (PCM) are considered. The features of PCM processing, tool selection, modes and methods of PCM processing as well as problems arising in the manufacture of the holes in the PCM structures are described.*

*The major objectives of composites implementation in developing aircraft constructions currently are:*

*– development and implementation of new materials and processes aimed at reducing technological cycles in structures manufacturing, quality improvement by improving the PCM*

*processing technology, increasing tools life for machining technology and cutting modes, implementing universal methods of non-destructive quality control of the finished product;*

*– reducing prices for feedstock and technology;*

*– minimizing the harmful effects on nature, development of green technologies, reducing processing temperature, time of manufacture, development of technologies to exclude further processing in assembly operations;*

*– maximal introduction of automated equipment in technological processes of PCM structures production to improve the quality and reduce the cycle and labor-consumption; mechanization and automation levels should be commensurate and optimized taking into account the volumes of serial production ;*

*– introduction of special sensors to control state of the structure in operating conditions to improve the operational reliability in design of composite structures;*

*– introduction and development of modern types of machining as the most labor-consuming, technologically complicated and costly. For example the drilling and milling in PCM processing take up to 65% in the volume of PCM machining in parts production.*

*The work is executed within implementation of integrated scientific direction 13.2. «Constructional PCM» («The strategic directions of development of materials and technologies of their processing for the period till 2030») [1].*

**Keywords:** *polymer composite materials, mechanical processing, technological processes, processing of details, operational reliability.*

---

<sup>1</sup>Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Государственный научный центр Российской Федерации [Federal state unitary enterprise «All-Russian scientific research institute of aviation materials» State research center of the Russian Federation]; e-mail: admin@viam.ru

Реализация «Стратегических направлений развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года» [1] предусматривает создание:

– новых полимерных основ и связующих для композиционных материалов, в том числе термостойких, высокодеформативных с повышенной стойкостью к ударным нагрузкам, обладающих функциями самозалечивания и модифицированных наночастицами;

– высокопрочных и высокомодульных конструкционных и функциональных композитов, в том числе гибридного типа на основе различных текстурных и мультиаксиальных текстильных форм с высокими физико-механическими характеристиками, сопротивлением к статическим, повторно-статическим, динамическим нагрузкам, климатическим воздействиям и биоповреждениям [2, 3].

В настоящее время разработана целая серия связующих и углепластиков нового поколения [4–16], которые начали внедрять в конструкции перспективных летательных аппаратов. Использование в конструкциях летательных аппаратов композиционных материалов при разных конструктивно-технологических решениях в последние годы значительно расширяется.

Разнообразие полимерных композиционных материалов (ПКМ) – углепластиков, стеклопластиков, органопластиков и т. п., используемых в проектируемых конструкциях, требует особого подхода при выборе технологий переработки, инструментов, конструкций оснастки и способов контроля качества готовых изделий. Решение этих задач возможно при высококвалифицированной подготовке (сообразно требованиям времени) специалистов по материаловедению и технологиям, программистов, конструкторов, расчетчиков, инженеров по эксплуатации и ремонту. При проектировании деталей и узлов из ПКМ необходимо учитывать как возможности существующего производства, так и создание новых производственных специализированных участков под конкретные технологические требования для

освоения и внедрения новых разработок – возможно, с небольшим резервом по перспективам развития и внедрения конструкций из ПКМ.

Одной из приоритетных задач при расширении применения ПКМ должна стать задача создания «искусственного интеллекта», который обеспечит при создании материалов, технологий и новых перспективных конструкций развитие процессов практически без участия человека – лишь по разработанному им заданию и под его контролем.

При проектировании конструкций из ПКМ необходимо учитывать (для обеспечения технологичности) объемы, способы и виды механической обработки – фрезерование, сверление, лазерная и гидравлическая резка и т. п.

Сложности при механической обработке ПКМ определяются их физико-механическими характеристиками: склонности к расслоению в процессе обработки из-за их слоистости, структурной неоднородности, высокой твердости материала наполнителя и низкой пластичности связующего и др.

При обработке ПКМ необходимо использовать инструменты со специальными твердосплавными или алмазными покрытиями режущей кромки инструмента, а также учитывать качество, способы заточки, конструкцию рабочих зон и геометрическую форму режущих кромок, которые бы обеспечивали обработку двух субстанций материала, из которых состоит ПКМ, – высоковязкой полимерной матрицы и высокопрочного и высокомодульного наполнителя.

Установлены экспериментальные закономерности влияния режимов резания на температуру при обработке различных композитов. При обработке ПКМ (с учетом их теплофизических характеристик) максимальные температуры в зоне контакта детали с инструментом наблюдаются при средних скоростях резания, так как в этом случае увеличивается пластическая деформация полимера. При высоких скоростях резания и минимальном тепловыделении полимер не переходит в пластическое состояние, что приводит к хрупкому разрушению в зоне резания – происходит локализация зоны разрушения и снижение температуры в зонах обработки.

Для ПКМ необходимо применять свои специальные режимы резания, особенно при обработке металлокомпозитных пакетов с учетом расположения слоев материалов в зависимости от направления обработки.

### **Области использования видов механической обработки композиционных материалов в производстве**

Фрезерование углепластика (рис. 1) применяется:

- при обработке соединяемых поверхностей для сборки деталей из ПКМ и комбинированных гибридных конструкций;
- при удалении и обработке технологических припусков;
- обработке деталей по внешнему и внутренним контурам.



Рис. 1. Фрезерование углепластика



стекловолокном пластика и углеродного волокна является сложной задачей, поскольку пластмасса имеет тенденцию обугливаться на режущей кромке. Наилучшие результаты показаны при проведении резки с помощью лазеров с очень высокой пиковой мощностью и короткой длиной импульса – например, фирмы Laser Hyper Rapid. Если процесс проходит при высокой скорости повторений, то хорошее качество раскроя может быть достигнуто с использованием метода многопроходной резки. Оптимальные результаты достигнуты также с помощью длины волны лазера в УФ диапазоне, например – от лазера марки AVIA. Недостатком данного метода является низкая эффективная скорость резания и длительный цикл обработки. Таким образом, способ многопроходной резки используется главным образом для материалов небольшой толщины.

По сравнению с механической вырезкой с последующим фрезерованием гидроабразивный процесс более производительный, но имеется ряд ограничений при реализации этого технологического процесса. Со стороны выхода струи жидкости должно быть свободное место, т. е. такой процесс сложно реализовать при сборке, так как гидроабразивной струе будет некуда выходить. Кроме того, разрез на толстых материалах получается не таким ровным, так как струя при движении может отклоняться от прямой линии и будут оставаться риски. В самом начале процесса также возникает гидроудар, от которого может происходить расслаивание материала со стороны выхода струи жидкости.

Достоинства и недостатки этих способов представлены в табл. 1.

Таблица 1

**Сравнительная характеристика способов обработки композитов**

Вид обработки	Преимущества	Недостатки
Механическая	Технология обработки широко используется и обеспечивает высокую точность при изготовлении деталей	Малый ресурс инструмента – притупление кромок приводит к расслоению, наличию вырванных волокон, повышению температуры в зоне резания, что приводит к термической деструкции матрицы
Струйно-абразивная	Обеспечивает резку пакетов большой толщины и высокую производительность; точность при резке с большими допусками	Повышенная шероховатость на поверхностях в зоне разреза, опасность насыщения детали водой
Лазерная	Высокая скорость и точность резки, нет ограничений по габаритам заготовок или деталей	Термическая деструкция матрицы в зоне резки с незначительной зоной оплавления краев

### **Выбор и подбор инструмента для механообработки ПКМ**

В настоящее время для механообработки ПКМ наиболее широко применяется инструмент с алмазным напылением или инструмент из твердосплавного материала. Примеры такого инструмента представлены на рис. 4. Чем больше зернистость у инструмента с алмазным напылением, тем больше количество снимаемого за один проход материала, но при этом снижается чистота обрабатываемой поверхности. Для получения качественного разреза необходимо, чтобы был выбран именно такой инструмент, который обеспечивает требуемое качество и скорость резания при оптимальной производительности.



Рис. 4. Примеры инструмента для механической обработки

При выборе инструмента необходимо учитывать особенности структуры ПКМ. Чем более вязкая матрица, тем сильнее идет нагрев при резании и происходит налипание связующего на режущую кромку с интенсивным нагревом инструмента и детали, что сказывается на качестве поверхности зоны резания.

Выбор инструмента не должен быть ограничен только твердосплавными сверлами, что не позволяет дать объективную оценку оптимизации выбора марки и материала сверла.

С учетом требований, предъявляемых к качеству отверстий и режимам сверления, при проведении эксперимента со скоростью сверления 16000 и 26000 об/мин (при подаче на оборот 0,01–0,15 мм) удалось получить удовлетворительную стойкость инструмента (750 отверстий до его замены).

При использовании ручной электрической дрели, закрепленной на штативе, процесс малопроизводителен с возможно нестабильным качеством результатов в производстве.

При изготовлении деталей самолетных конструкций одним из массовых процессов механической обработки ПКМ является сверление. При выполнении отверстий необходимо учитывать их функциональное назначение – отверстия для сборки силовых элементов конструкций, функциональные (для перелива топлива, в шумопоглощающих панелях, слива конденсата и т. п.) и технологические. В каждом из этих случаев требования к качеству отверстий определяются требованиями конструкторской документации. Качество получаемых отверстий по входным и выходным кромкам, точность и чистота поверхности цилиндрической части отверстия чрезвычайно важны с точки зрения надежности, долговечности и работоспособности конструкции. Максимальную производительность и стабильное качество сквозных отверстий в ПКМ обеспечивает правильно подобранный инструмент и режимы резания при сверлении, а также конструктивная жесткость технологической оснастки. Большую роль в обеспечении качества поверхности отверстия играет стойкость и геометрическая форма режущих кромок инструмента.

Основными дефектами, возникающими при механической обработке, являются: растрескивание связующего, расслоение, выдергивание волокон, непрорез волокон, термическая деструкция связующего. Режущая кромка обычно хрупко разрушает матрицу (связующее) и срезает армирующие волокна. Для устранения этих дефектов используют специальные конструкции инструментов, оптимизируют их геометрическую форму, технологические режимы сверления, используя специальные приспособления.

При сверлении ПКМ часто возникают дефекты на входе и выходе отверстия, обусловленные особенностями силового воздействия сверла на заготовку (рис. 5). На входе наблюдаются расслоения и разрыв материала, а на выходе – расслоение и непрорезание волокон. Поскольку отверстия являются концентраторами напряжений, такие дефекты способствуют снижению усталостной и статической прочности конструкций. Для минимизации дефектов инструментальные фирмы предлагают специальные конструкции сверл.

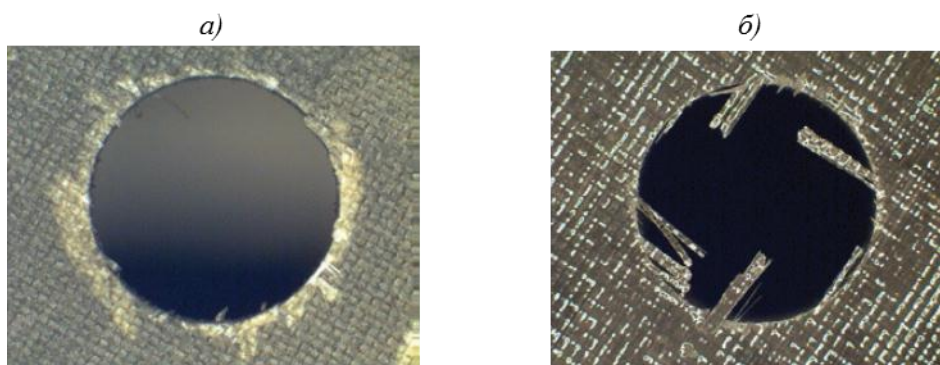


Рис. 5. Местное отслоение (деламинация) слоев материала при нарушениях режимов осевой подачи инструмента при сверлении (а) и фрагменты волокон (сколы) на внутренней поверхности отверстия из-за износа режущей кромки и нарушений режимов сверления (б)

Типичные требования к качеству отверстия:

- шероховатость  $R_a < 4,8$  мкм;
- деламинация  $< 1$  мм от диаметра отверстия;
- отсутствие сколов (рваных волокон в отверстии).

При обработке ПКМ снижение качества получаемых отверстий может произойти задолго до поломки инструмента.

#### Повышение производительности процесса резания

Ускорение подачи инструмента и скорости резания повышает производительность процесса, но более важным фактором является качество отверстия. Низкое качество отверстия приводит к необходимости двухстадийной обработки разными инструментами. Пример получения качественного отверстия при двухстадийной обработке при сверлении представлен на рис. 6.

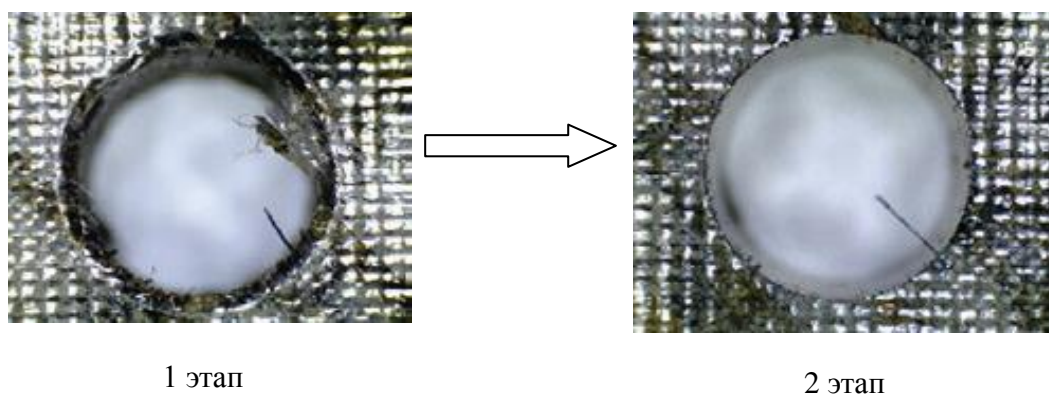


Рис. 6. Качество отверстий при двухстадийной обработке двумя инструментами

В отличие от металлов, ПКМ на полимерной матрице обладают низкой теплопроводностью и теплостойкостью. При температурах  $> (300-350)^\circ\text{C}$  начинается

термодеструкция связующего. Это приводит к резкому ухудшению качества обработанной поверхности, появлению прижогов и оплавлений в дефектном пограничном слое (рис. 7).

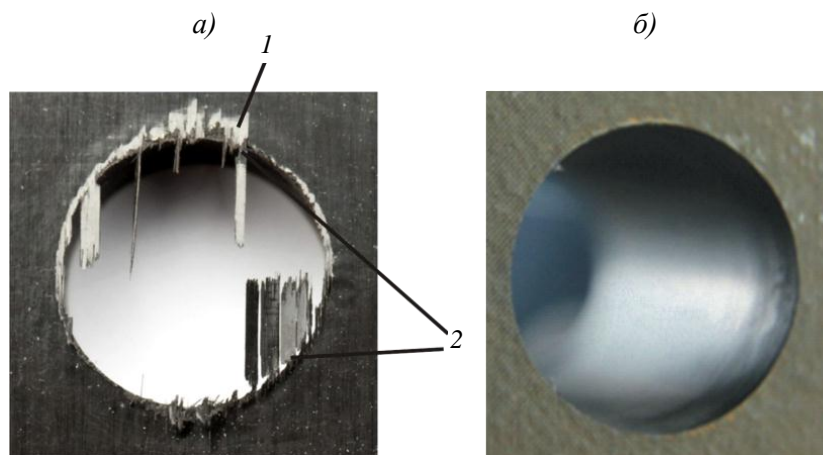


Рис. 7. Некачественное (а) и качественное (б) отверстия в углепластике:  
1 – расслоение материала; 2 – непрорез волокон

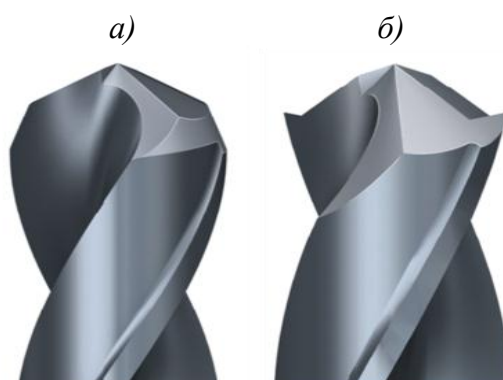


Рис. 8. Сверла для ПКМ с двойной заточкой (а) и с подрезными кромками (б)

Для уменьшения расслоения на входе отверстия используют сверла с двойной заточкой, а для устранения непрореза волокон – сверла с острыми кромками на периферии (рис. 8). Для того чтобы избежать расслоения, иногда приходится использовать кондукторы, прижимаемые к поверхности с усилием, достаточным для предотвращения расслаивания. Сверление обычно осуществляют со скоростями резания 100–200 м/мин при низких величинах подачи в диапазоне 0,02–0,1 мм/об. На входе и выходе сверла для исключения расслаивания снижают усилие и величину подачи на оборот.

### Выбор стратегии процесса при сверлении ПКМ

Верхняя и нижняя поверхности детали существенно отличаются по качеству входной и выходной кромок отверстий при сверлении. Для повышения качества отверстий используют ряд технологических приемов: направление сверления, защиту поверхностей технологическими накладками и др. Покрытия или дополнительные поверхностные слои над слоем углеволокна или стеклоткани могут значительно влиять на производительность и качество сверления.

Так, молниезащитный слой в виде мелкой или крупной медной сетки (рис. 9, а) позволяет сверлить углепластик с ускоренной подачей без потери качества отверстия;

стеклоткань – повышает риск деламации, ухудшая качество (рис. 9, б). Оба материала могут легко обрабатываться при правильном выборе инструмента и режимов обработки.

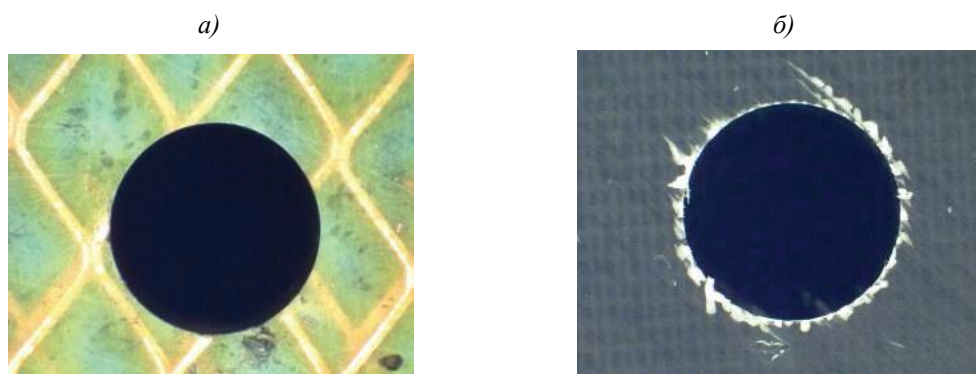


Рис. 9. Молниезащитный слой на углепластике (а) и углепластик со слоем стеклоткани (б)

При обработке ПКМ смазочно-охлаждающая жидкость, как правило, не применяется, поэтому продукт резания представляет собой мелкодисперсную пожароопасную и вредную для здоровья человека пыль, которую необходимо удалять из зоны резания специальной системой пылеудаления. При обработке деталей из ПКМ объем резания обычно невелик: детали уже отформованы и требуется лишь, как в данном случае, сверление сборочных отверстий или отверстий в виде перфорации – например в шумопоглощающих панелях.

Наилучшие результаты можно получить при сверлении малых отверстий через алюминиевую прокладку-кондуктор.

В качестве примера предлагается технологический цикл сверления отверстий в пакете из углепластика на основе связующих нового поколения типа ВСЭ-1212 или ВСЭ-34 для получения перфорированной обшивки (табл. 2).

Таблица 2

**Технологический цикл сверления отверстий в пакете из углепластика для получения перфорированной обшивки**

Технологическая операция	Эскиз процесса сверления
Подвод сверла с ускоренной подачей на расстояние 2,5 мм от поверхности детали	
Начало цикла прерывистого сверления (с периодическим выводом сверла) с глубиной врезания, мм: – 1 (для титана) – 3 (для алюминия)	
Сверление отверстия в углепластике, пока вершина сверла не окажется на расстоянии 0,5 мм от слоя металла	
Уменьшение подачи на выходе из отверстия с целью уменьшения риска деламации и образования сколов	

Композиционные материалы на основе полимерной матрицы, получаемые с применением арамидных стеклянных или углеродных волокон на эпоксидной, фенольной или полиамидной смолах, чаще всего обрабатывают методами резания, включая раскройные операции (пилами из быстрорежущих сталей и твердых сплавов, ножевой резкой, ультразвуковой ножевой резкой, резкой абразивными кругами и алмазной проволокой), обработку отверстий, контурное фрезерование, фрезерование поверхностей и конструктивных элементов, точение и шлифование тел вращения.

Для обработки ПКМ с помощью лезвий требуется использование инструмента с очень острой режущей кромкой, большим задним углом и малым радиусом режущей кромки для обеспечения среза волокон с низкой шероховатостью рабочих поверхностей, для улучшения отвода стружки и снижения сил трения между поверхностями инструмента и заготовки. Кроме того, важно обеспечить высокую стойкость инструмента, поскольку армирующие волокна и компоненты матрицы ПКМ могут интенсивно изнашивать режущую кромку, что приводит к увеличению силы резания и тепловыделения, а также снижению качества обработанных поверхностей. В качестве инструментальных материалов, обеспечивающих приемлемую износостойкость, используют твердые сплавы, твердые сплавы с упрочняющими покрытиями, кубический нитрид бора, поликристаллические спеченные и CVD-алмазы. Перспективным является инструмент с алмазными, получаемыми по технологии CVD, и алмазоподобными покрытиями (АПП).

В качестве иллюстрации при отработке режимов сверления в целях перфорирования обшивок опробованы режимы сверления в тонкостенных обшивках ( $h=0,6$  мм) из углепластика на основе эпоксидного связующего. В связи с малым диаметром отверстий (2 мм) и тонкостенностью обшивок звукопоглощающих конструкций многослойных панелей выбраны четыре вида сверл:

- твердосплавные из сплава марки ВК6М;
- из быстрорежущей стали марки Р6М5;
- спиральные твердосплавные марок СЦЦ528 и СЦЦ513;
- твердосплавные специальные марки НАМ Prima 380.

Проведена сравнительная оценка работоспособности четырех видов сверл на технологическую стойкость при условии качественного получения отверстий выбранным инструментом с использованием ручной электрической дрели при ее фиксированном положении, обеспечивающим вертикальное перемещение. Для сравнительной оценки применяли три режима сверления: 8000; 16000 и 26000 об/мин (с единой величиной вертикальной подачи на оборот).

При использовании вышеперечисленных сверл, на скорости 8000 об/мин отверстия получаются некачественными с заусенцами на выходе сверла на нижней стороне обшивки. Кроме того, сверла марок СЦЦ 528 и СЦЦ513 не позволяют получить качественное отверстие  $\varnothing 2$  мм из-за «дробления» сверл и их недостаточной конструктивной жесткости при сверлении.

Наилучшие результаты по итогам работы показали сверла марки НАМ Prima 380. Критерий их оценки на износостойкость – начало появления заусенцев на выходе сверла из детали. Влияние режимов сверления как при 16000 об/мин, так и при 26000 об/мин, на качество отверстий до появления заусенцев сверлами данной марки не обнаружено. Технологическая стойкость сверл этой марки принята – до 750 отверстий. Сверла данной марки  $\varnothing 2$  мм можно рекомендовать для перфорации отверстий в тонкостенных углепластиковых пластинах по режимам сверления – с 16000 до 26000 об/мин.

Качество кромок отверстия необходимо периодически проверять на входе и выходе инструмента. В зависимости от состояния кромок может появиться

необходимость либо изменения режимов резания, либо замены сверла. Качество кромок на выходе сверла труднее обеспечить из-за больших сил резания и малой прочности при отслаивании на выходе инструмента из пластины.

Сверление – наиболее распространенная операция при механической обработке деталей из ПКМ. При выполнении этой операции имеет место скалывание и отслаивание материала при входе и выходе сверла из отверстия. В этом случае перед технологами в производстве ставится непростая задача – получить отверстие, удовлетворяющее требованиям по точности и шероховатости, а также избежать повреждений поверхностей по кромкам и около зоны отверстия.

Инструменты со вставками из поликристаллического алмаза (PCD) или твердосплавные сверла с алмазным напылением специально разработаны для увеличения технологического цикла инструмента, поскольку алмаз обладает отличной стойкостью при обработке различных типов углеродных волокон и пакетной обработки разнообразных материалов, включая титан. Для достижения высокой производительности при обработке кромок деталей из ПКМ целесообразно применять фрезы с пластинами из поликристаллического алмаза PCD или твердого сплава с алмазным напылением.

Повышение эффективности операций сверления отверстий в различных ПКМ может быть достигнуто путем применения специализированных сверл, индивидуально разработанных для каждой группы материалов. Для учета специфических требований и особенностей обработки каждого материала подбирается геометрическая форма сверл, которая оптимизирована благодаря использованию различных значений передних углов и углов при вершине.

Применение новых сверл и фрез позволяет повысить качество механической обработки труднообрабатываемых материалов. Твердосплавные сверла с алмазным напылением, а также со вставками из поликристаллического алмаза идеально подходят для получения высококачественных отверстий в композитах. Все геометрические формы этих новых серий сверл разработаны с учетом специфических требований и особенностей обработки каждого конкретного материала. Эффективность фрезерования и обработки кромки деталей из ПКМ можно значительно повысить путем применения фрез с PCD-пластинами. Используемые стандартные и специальные инструменты создают благоприятные технические возможности для сверления и фрезерования композитов с получением отверстий высокого качества, что экономически очень выгодно.

Немаловажную роль играют конструктивные особенности спроектированных деталей, позволяющие оптимизировать технологический процесс обработки заготовок из ПКМ. Процессы механической обработки деталей из ПКМ ничем не отличаются от обработки традиционных материалов по способам обработки – фрезерование, сверление, точение и т. п.

Однако особенности ПКМ (слоистость, неоднородность – матрица и наполнитель, различные механические свойства в структуре «материала» и т. п.) требуют особых подходов в выборе режимов резания, подборе инструмента, способах резания. Кажущаяся простота технологического процесса сверления отверстий в ПКМ вызывает массу проблем, связанных с выбором инструмента, охлаждающих жидкостей (или без их применения), режимов резания, оценки стойкости инструмента, с требованиями к качеству и точности поверхностей в отверстиях и их соответствия требованиям конструкторской документации по их размерам и ряду других требований.

Проблемы механической обработки ПКМ должны решаться не на стадии выпуска чертежей в производство, а на стадиях начала проектирования конструкций. В этот момент закладываются все будущие технологические решения, а также этапы

подготовки производства, возможности контроля качества продукции, наличие технологического оборудования и др.

Оптимизацию работ по механической обработке деталей из ПКМ – наряду с общими требованиями к созданию технологичной конструкции и их производства – можно представить с помощью следующей упрощенной схемы:

– проработка конструкторской документации и разработка технологических процессов, направленных на оптимизацию их последовательности, выбора оснастки, технологического оборудования, разработку маршрутных технологий с учетом требований конструкторской документации и нормативных документов;

– проведение отработки новых технологических процессов для обеспечения требований конструкторской документации на готовых деталях;

– изготовление опытно-установочной партии деталей, корректировка и утверждение рабочих технологий для серийного производства.

### Выводы

Для механической обработки угле- и стеклопластиков применяются следующие виды инструментов:

- цельные твердосплавные фрезы;
- цельные твердосплавные сверла;
- инструмент с напылением поликристаллических алмазов для фрезерования и сверления.

Качество поверхностей обработки зависит от видов укладки, направлений фрезерования, режимов сверления и технологических приемов, обеспечивающих начальные и конечные зоны обработки при входе и выходе инструмента (смешанные пакеты – сталь, титан, углепластик, расположение «металл–композит»).

Производительность обработки зависит не только от выбора конструкции инструмента, но и от конфигурации заточки режущих кромок.

Последовательность выполнения операций механической обработки и сборки деталей должна происходить по технологическим маршрутам, обеспеченным конструкцией и технологичностью деталей.

Целесообразно при производстве деталей из ПКМ в случае их механической обработки использовать полуфабрикаты ПКМ (препреги) из одной партии поставки.

Режимы механической обработки подбираются в каждом конкретном случае, для каждого типа связующего и волокна.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Каблов Е.Н. Инновационные разработки ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ по реализации «Стратегических направлений развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года» // *Авиационные материалы и технологии*. 2015. №1 (34). С. 3–33. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33.
2. Каблов Е.Н. Современные материалы – основа инновационной модернизации России // *Металлы Евразии*. 2012. №3. С. 10–15.
3. Железина Г.Ф. Конструкционные и функциональные органопластики нового поколения // *Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн.* 2013. №4. Ст. 06. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 01.02.2016).
4. Каблов Е.Н. Материалы и технологии ВИАМ для «Авиадвигателя» // *Пермские авиационные двигатели: информ. бюл.* 2014. №S. С. 43–47.
5. Каблов Е.Н. О настоящем и будущем ВИАМ и отечественного материаловедения: интервью // *Российская академия наук*. 2015. 19 января.
6. Каблов Е.Н. Композиты: сегодня и завтра // *Металлы Евразии*. 2015. №1. С. 36–39.
7. Каблов Е.Н. Материалы и химические технологии для авиационной техники // *Вестник*

- Российской академии наук. 2012. Т. 82. №6. С. 520–530.
8. Коган Д.И., Чурсова Л.В., Петрова А.П. Технология изготовления ПКМ способом пропитки пленочным связующим // Клеи. Герметики. Технологии. №6. 2011. С. 25–29.
  9. Коган Д.И., Чурсова Л.В., Петрова А.П. Полимерные композиционные материалы, полученные путем пропитки пленочным связующим // Все материалы. Энциклопедический справочник. 2011. №11. С. 2–6.
  10. Чурсова Л.В., Душин М.И., Хрульков А.В., Мухаметов Р.Р. Особенности технологии изготовления деталей из композиционных материалов методом пропитки под давлением // Композиционные материалы в авиакосмическом материаловедении: сб. тез. докл. межотраслевой науч.-технич. конф. М.: ВИАМ, 2009. С. 17.
  11. Хрульков А.В., Душин М.И., Попов Ю.О., Коган Д.И. Исследования и разработка автоклавных и безавтоклавных технологий формования ПКМ // Авиационные материалы и технологии. 2012. №S. С. 292–301.
  12. Тимошков П.Н., Коган Д.И. Современные технологии производства полимерных композиционных материалов нового поколения // Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн. 2013. №4. Ст. 07. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 01.02.2016).
  13. Мухаметов Р.Р., Ахмадиева К.Р., Ким М.А., Бабин А.Н. Расплавные связующие для перспективных методов изготовления ПКМ нового поколения // Авиационные материалы и технологии. 2012. №S. С. 260–265.
  14. Мухаметов Р.Р., Ахмадиева К.Р., Чурсова Л.В., Коган Д.И. Новые полимерные связующие для перспективных методов изготовления конструкционных волокнистых ПКМ // Авиационные материалы и технологии. 2011. №2. С. 38–42.
  15. Бабин А.Н. Связующие для полимерных композиционных материалов нового поколения // Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн. 2013. №4. Ст. 11. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 01.02.2016).
  16. Гращенков Д.В., Чурсова Л.В. Стратегия развития композиционных и функциональных материалов // Авиационные материалы и технологии. 2012. №S. С. 231–242.