

УДК 678.8

*М.И. Минибаев¹, А.Е. Раскутин¹, В.А. Гончаров¹***ОСОБЕННОСТИ ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ОБРАЗЦОВ ИЗ ПКМ НА СТАНКАХ С ЧПУ (обзор)**

DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-1-105-114

Индустрия полимерных композиционных материалов находится в постоянном развитии, вместе с тем должны развиваться технологии обработки ПКМ, проводятся исследования влияния механической обработки на свойства материала. Производители инструмента предлагают специальные фрезы, отличающиеся по материалам, из которых они изготовлены, геометрической форме, углам заточки и т. д. Необходимо проводить исследования для каждой марки материала, для того чтобы назначать оптимальный режим резания. Конструкция оборудования должна обеспечивать надежную защиту персонала и учитывать свойства, образующейся при обработке стружки.

Ключевые слова: полимерные композиционные материалы (ПКМ), изготовление образцов из ПКМ, режущий инструмент для ПКМ, фрезерование композитов, износ инструмента, станок с ЧПУ, вакуумный стол, алмазоподобное покрытие.

*M.I. Minibaev¹, A.E. Raskutin¹, V.A. Goncharov¹***PECULIARITIES OF TECHNOLOGY PRODUCTION SPECIMENS OF PCM ON CNC MACHINES (review)**

The polymer composite materials industry is in constant development, however, PCM processing technologies must be developed, and the effects of mechanical processing on the properties of the material after processing should be investigated. Manufacturers of tools offer special cutters, differing in the materials from which they are made, geometry, grinding angles, etc. It is necessary to conduct research for each brand of material in order to designate the optimal cutting mode. The design of the equipment should provide reliable protection of personnel and take into account the properties formed during the processing of chips.

Keywords: polymer composite materials (PCM), production of samples from PCM, cutting tools for PCM, milling of composites, tool wear, CNC machine, vacuum table, diamond-like coating.

¹Федеральное 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

Введение

Без развития материаловедения и в частности индустрии полимерных композиционных материалов (ПКМ) невозможен переход на новый технологический уровень. Необходимо использовать передовые полимерные связующие, разработанные с применением современных тенденций в области материаловедения, для обеспечения соответствия повышенным техническим требованиям, предъявляемым к изделиям из ПКМ [1, 2]. Современные полимерные связующие должны максимально обеспечить реализацию прочностных свойств армирующих материалов и теплостойкости, сочетать в себе комплекс технологических характеристик, иногда на первый взгляд совершенно несовместимых с химической точки зрения, но без соответствия которым становится невозможным получение изделия [3–5].

Комплектующие из ПКМ успешно используются во многих областях аэрокосмической отрасли, машиностроения, ветроэнергетики и т.д. В этой связи растет необходимость контроля свойств конструкций, изготовленных различными методами формования. Разрушение образцов является основным видом испытаний композитов. Для получения достоверных результатов испытаний одного и того же материала необходимо добиваться, чтобы на торце образца было не более пяти дефектов на один погонный дюйм длины [5–10].

В работе [11] показано, что с точки зрения качества получаемого отверстия и сил, возникающих в зоне резания при сверлении, наиболее благоприятный результат обеспечивается при использовании сверла с подрезными кромками (рис. 1).



Рис. 1. Сверло с подрезными кромками

По данным эксперимента [12] установлено, что, прибегая к такому технологическому приему, как сочетание сверления и периферийного фрезерования с использованием одного и того же инструмента (рис. 2), оригинальная конструкция которого состоит из фрезерной и сверлильной частей, возможно получить лучшее качество отверстий в ПКМ по сравнению с традиционным методом. Первоначально выполняется отверстие диаметром 6 мм, затем посредством операции периферийного фрезерования с подачей 0,1 мм/об отверстие доводится до диаметра 6,9 мм, инструмент при этом движется по спирали.

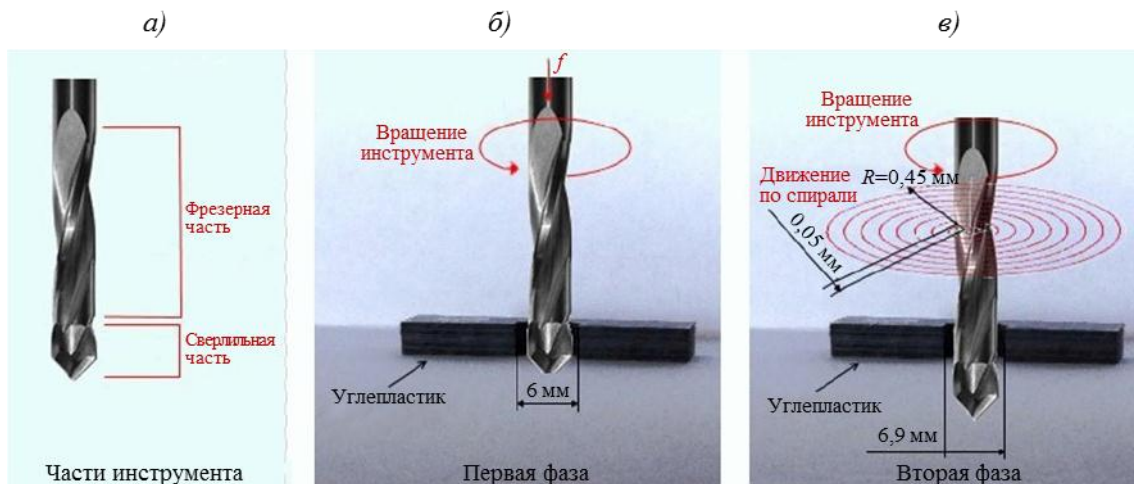


Рис. 2. Сочетание сверления и фрезерования при выполнении отверстий: а – конструкция инструмента; б – сверление; в – периферийное фрезерование

Негативным фактором при механической обработке ПКМ также является термическая деструкция связующего. В работе [13] установлено, что наибольшее влияние на температуру в зоне резания оказывает скорость резания, затем подача и глубина фрезерования (рис. 3).

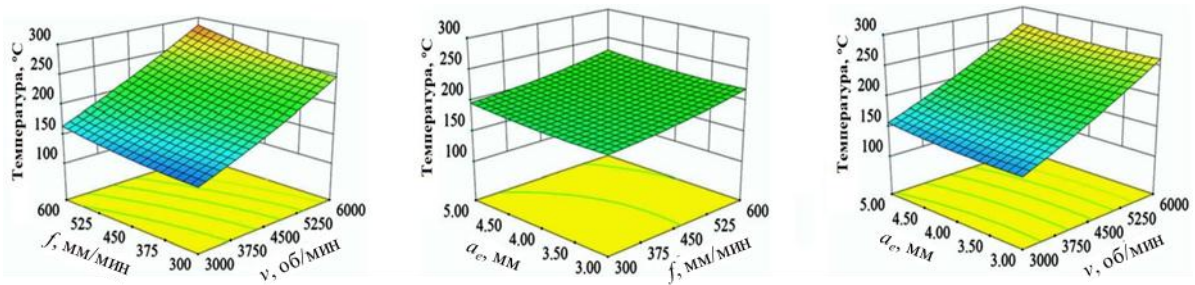


Рис. 3. Зависимость температуры в зоне резания от параметров резания – скорости резания (v), подачи (f) и глубины фрезерования (a_e)

Продолжаются исследования, посвященные возможности предсказать результат механической обработки ПКМ. Исследователи используют программы, основанные на методах конечных элементов, для создания моделей, позволяющих имитировать процесс обработки и спрогнозировать такие параметры, как температура, величина режущих усилий, шероховатость, износ инструмента и т. д. В работе [14] представлена модель (рис. 4) процесса резания однонаправленного углепластика в зависимости от ключевых факторов: пространственного расположения волокон относительно режущей кромки инструмента, глубины резания и скорости резания. Исследователи утверждают, что им удалось создать модель, которая может предсказать (с некоторой погрешностью) силу резания, шероховатость и температуру в зависимости от этих факторов (рис. 5 и 6).

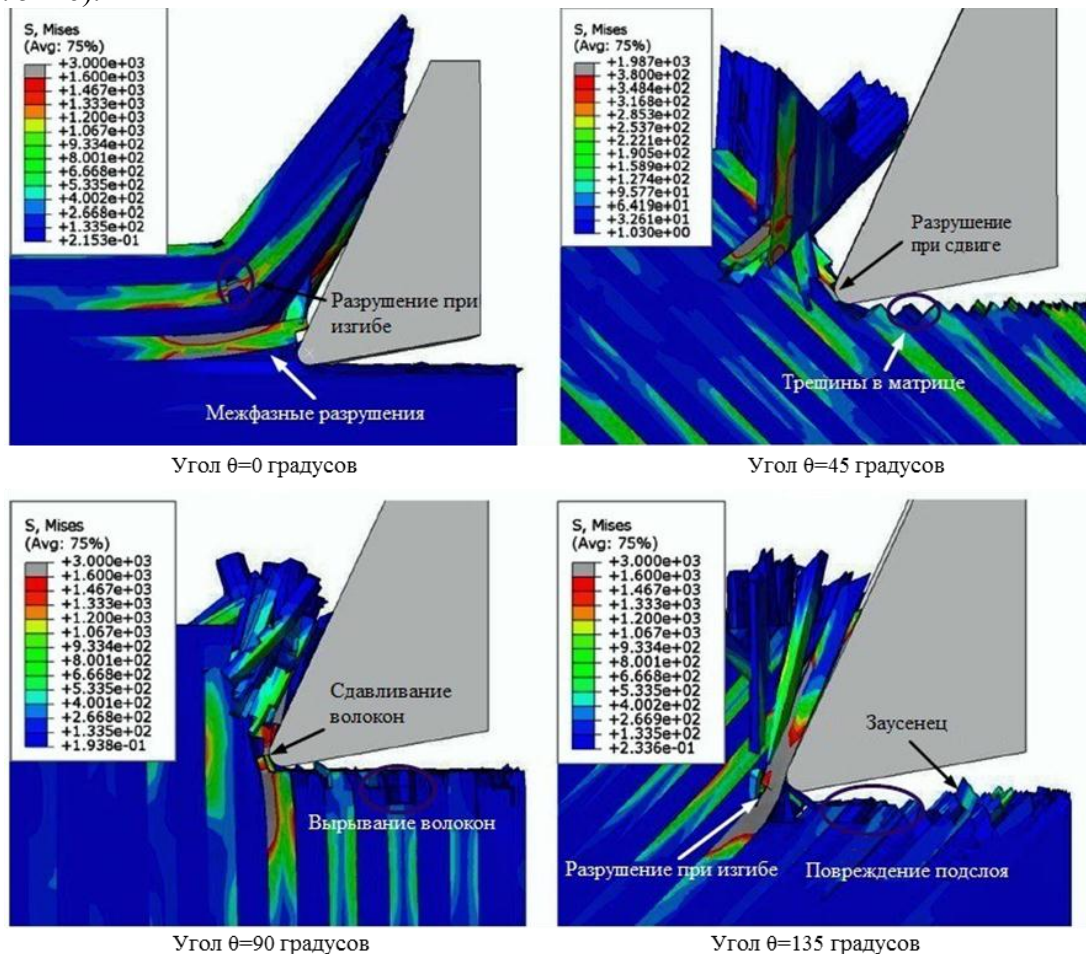


Рис. 4. Модель разрушения при различной ориентации волокон относительно режущей кромки

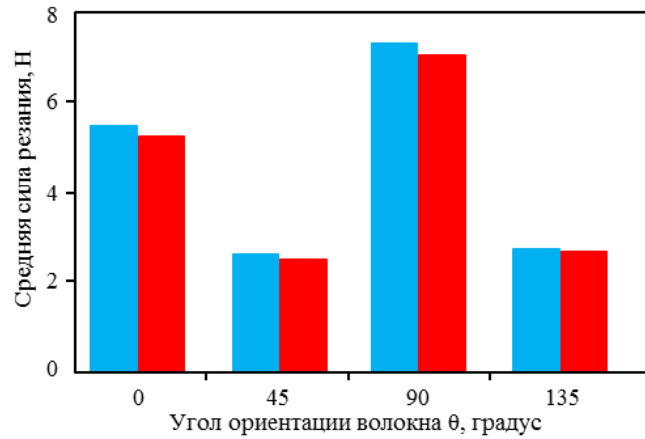


Рис. 5. Сравнение смоделированных (■) и измеренных (■) значений сил резания волокон различной ориентации

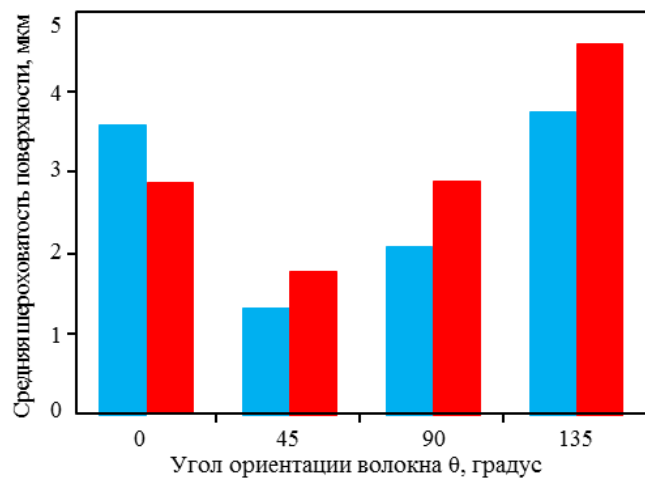


Рис. 6. Сравнение смоделированных (■) и измеренных (■) значений шероховатости поверхности волокон различной ориентации

Большинство образцов для испытаний имеют несложную геометрическую форму и разрез листа на образцы может производиться без использования оборудования с числовым программным управлением (ЧПУ). Однако есть ряд испытаний, для которых образцы (рис. 7) сложно изготовить ручным способом, соблюдая при этом требуемую точность размеров и шероховатость поверхности реза образца. К таким испытаниям можно отнести:

- методы определения диэлектрической проницаемости тангенса угла диэлектрических потерь по ГОСТ 22372–77;
- метод определения механических характеристик при сдвиге на образцах с V-образными надрезами по ГОСТР 56799–2015 и ASTM D5379;
- метод определения прочности при сжатии образцов ламинатов с открытым отверстием по ГОСТР 56788–2015, АСТМ Д6484/ Д6484 М-14 и др.

Несмотря на сложности при механической обработке ПКМ, определяющиеся их специфическими физико-механическими характеристиками, оборудование с ЧПУ позволяет обеспечить качественное изготовление образцов с учетом при их изготовлении особенностей технологии изготовления образцов.

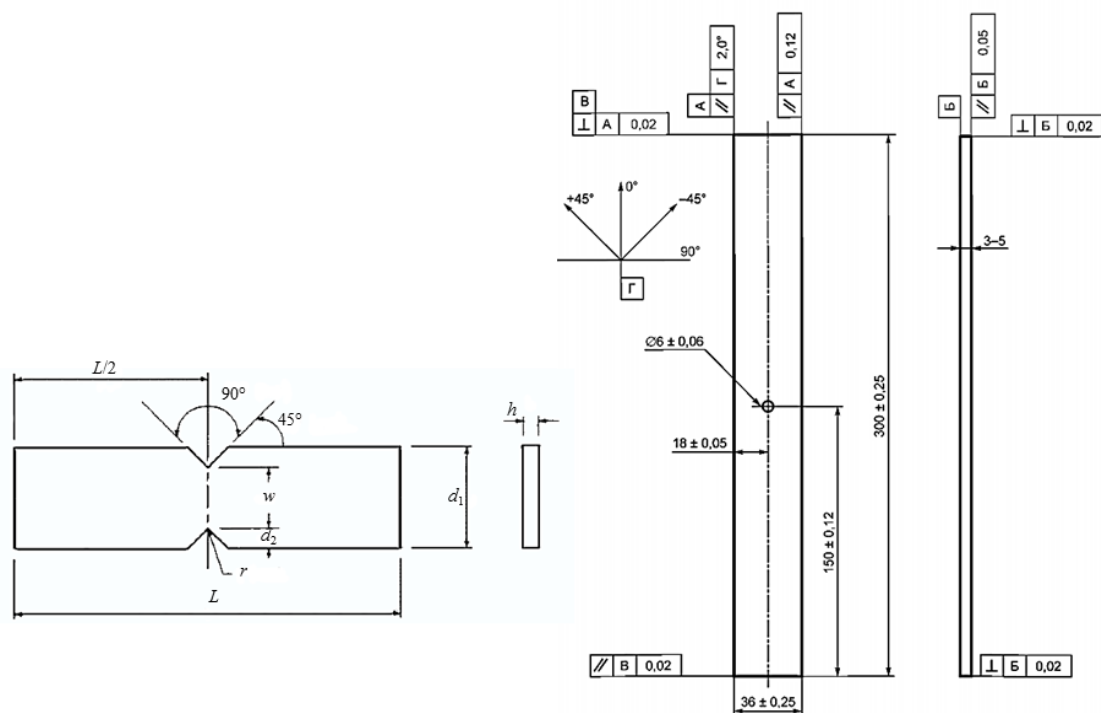


Рис. 7. Разновидности образцов, изготавливаемых на станке с числовым программным управлением

Прижим заготовки к опорной поверхности

Упругие свойства ПКМ значительно выше, чем у металлов, в результате на точность обработки значительное влияние оказывают упругие деформации самих заготовок, возникающие как под действием сил резания, так и в результате усилий закрепления. Поэтому одной из технологических особенностей является прижим заготовки к поверхности стола станка. Приспособления для прижима должны обеспечивать плотное прилегание к опорным плоскостям, не допускать упругих деформаций, создавать необходимую жесткость заготовки, обеспечивая при этом благоприятное направление сил резания.

Поскольку заготовка представляет собой лист, то прижим может осуществляться с помощью усилия, создаваемого вакуумной помпой. Для этого на стол станка монтируется вакуумный стол, он, в свою очередь, соединен шлангом с вакуумной помпой. На вакуумный стол кладется специальный картон-подложка, на картон – листовая заготовка из ПКМ (рис. 8).

Усилие, создаваемое вакуумной помпой, достаточно для жесткого прижима листа к столу станка, но не достаточно для удержания образца, в силу его малых размеров. На завершающем проходе инструмента, когда срезается последний слой материала, образец не достаточно жестко прижимается к поверхности стола и силы, создаваемые режущим инструментом, сдвигают его с заданного положения.

Решением данной проблемы может быть недорез (перемычка) материала (рис. 9) таким образом, чтобы недорез материала позволял жестко удерживаться образцу в начальном положении. Количество и размер перемычек зависит от изготавливаемого образца.

Прижим листовой заготовки может осуществляться также традиционным способом – с использованием прихватов. Но, как и в случае с вакуумным способом прижима, необходимо оставлять перемычки, чтобы образец на последнем проходе не смещался с заданного положения. Затем перемычка удаляется ручным способом.

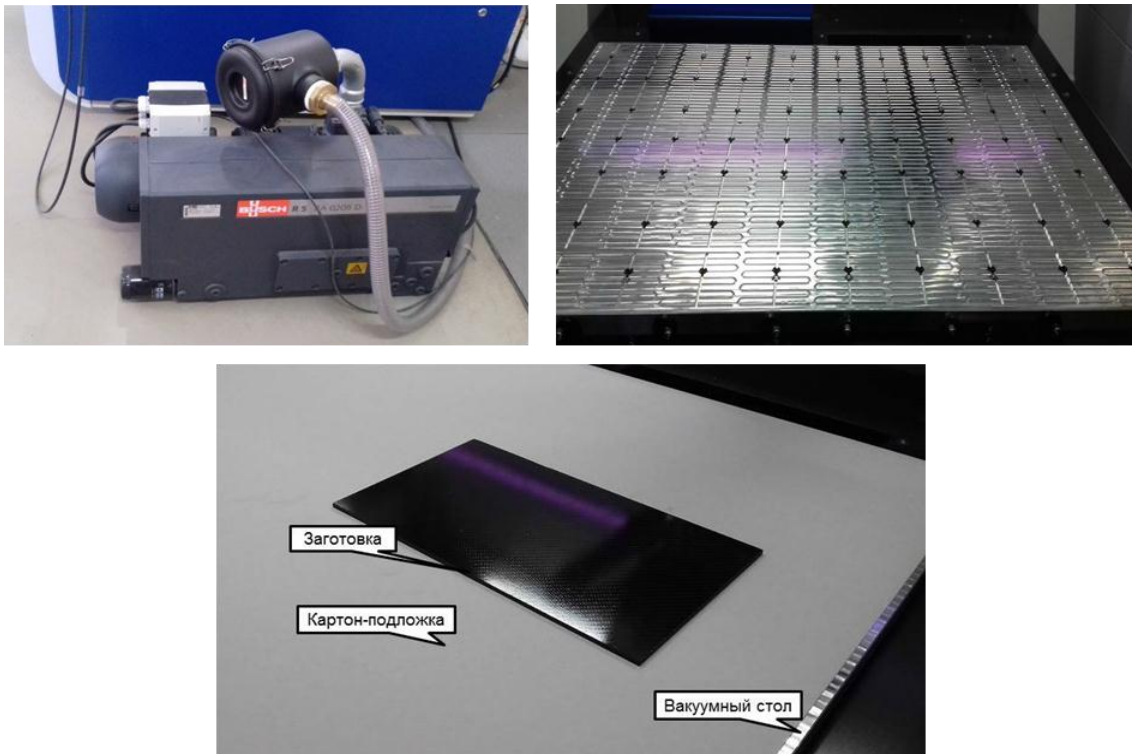


Рис. 8. Система вакуумной установки

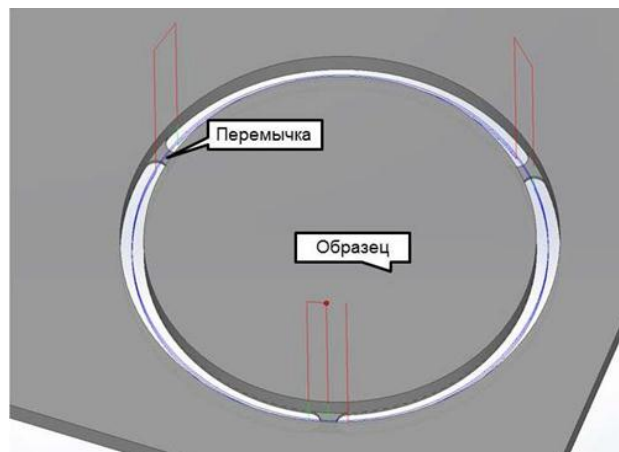


Рис. 9. Образец с перемычками

Обеспечить полное вырезание образцов из листовой заготовки возможно при использовании двусторонней липкой ленты. Наиболее эффективно показал себя скотч SK2AT60-1 компании STEVIK SAS. Внутри контура изготавливаемого образца приклеивают скотч, при этом обязательно следует обеспечить непопадание скотча на траекторию резания инструмента, иначе липкая лента налипнет на режущие кромки инструмента, что приведет к браку.

Режущий инструмент

Анизотропия свойств слоистых материалов определяет характер отделения срезаемой части материала и образования стружки в процессе резания. Структура ПКМ и состав ее наполнителя во многом определяют процесс стружкообразования, от которого зависят силы резания, расход энергии, количество выделенной теплоты, точность

и качество обработанной поверхности. Поэтому еще одной особенностью изготовления образцов ПКМ на станках с ЧПУ является подбор режущего инструмента. В настоящее время производителями режущего инструмента представлены различные типы фрез по композитам, различающиеся по геометрической форме, направлению отвода стружки, подводу охлаждения, инструментальным материалам и т. д.

Твердые сплавы отличаются высокой гибкостью геометрической формы режущей кромки инструмента и их производство более экономичное, однако их стойкость к износу при обработке композитов ниже, чем у инструментов, режущая часть которых состоит из пластинок поликристаллического алмаза, поэтому для обработки композиционных материалов рекомендуется применять специальные инструментальные материалы, особенностью которых является высокая стойкость к истирающим воздействиям. К таким материалам относятся кубический нитрид бора и поликристаллические алмазы (PKD). Альтернативой инструментам с режущими кромками из PKD, с их сравнительно высокой стоимостью, могут выступить твердосплавные инструменты с алмазоподобным покрытием. Применение сверхтвердых углеродистых покрытий DLC (Diamond Like Carbon), обладающих уникальными свойствами, позволяет повысить стойкость режущего инструмента к интенсивным истирающим воздействиям.

В настоящее время имеются химические и физические способы нанесения алмазоподобных покрытий [15]. К ним относятся:

- химическое осаждение из газовой фазы (CVD);
- физическое осаждение из газовой фазы (PVD).

Наибольшее распространение при инструментальном производстве получил способ нанесения алмазоподобных покрытий путем химического осаждения из газовой фазы углеводородов (типа бутан, пропан, ацетилен и т. п.), подвергаемые разрядной или термической деструкции. Метод CVD применяется для нанесения покрытий на твердые сплавы и широко используется для получения многослойных покрытий. Многослойные покрытия могут наноситься на поверхность в разных комбинациях, в различной очередности и иметь разную толщину.

Метод PVD представляет собой получение алмазоподобных покрытий путем плазменного распыления графита в вакуумной камере и осаждения ионов углерода с большой энергией на изделия. Метод PVD является более трудоемким, но достижением технологии является то, что в получаемых покрытиях концентрация углерода со связями sp^3 может достигать максимально возможного уровня 85%, а микротвердость находится в диапазоне значений от 50 до 100 ГПа и достигает уровня значений монокристаллического алмаза [16]. По сравнению с методом CVD в методе PVD осаждение частиц вещества происходит при низких температурах, что позволяет существенно снизить термическое воздействие на осаждаемое изделие, т. е. прочность основного материала остается почти на том же уровне (по сравнению с изделиями без покрытия). Небольшая толщина нанесенного слоя, получаемая методом PVD, обеспечивает относительно острую режущую кромку инструмента, что особенно важно для чистовой и прецизионной обработки ПКМ.

Композиционные материалы, обладая такими специфическими физико-механическими свойствами, как различная прочность в разных направлениях, малая твердость, очень низкая теплопроводность, высокая теплоемкость и сильная истирающая способность, обуславливают при их резании своеобразный характер изнашивания режущих инструментов. Основная работа резания при этом направлена на преодоление трения и упругих деформаций. Увеличению трения, особенно по задней поверхности, способствует усиленное упругое восстановление обработанной поверхности заготовки. Этим и объясняется тот факт, что при резании композитов зубья фрез изнашиваются преимущественно по задней поверхности с сильным округлением режущей кромки [17]. Эти факторы приводят к отклонению геометрической формы образца по цилиндричности (рис. 10) в случае круглого образца.

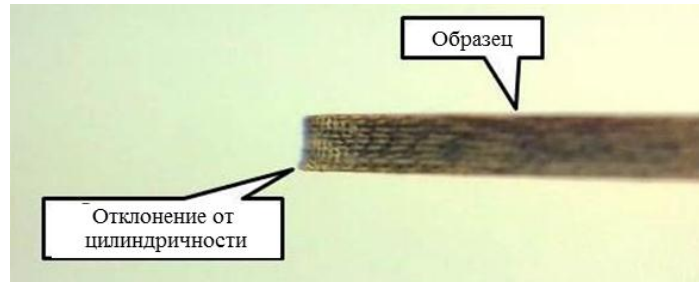


Рис. 10. Отклонение формы образца

Для получения качественной поверхности образца необходимо выполнять обработку в два перехода. Черновую операцию выфрезерования образца из листа следует выполнять рашпильной фрезой с припуском (рис. 11), затем выполнить чистовую операцию фрезой с алмазной пластиной (рис. 12).

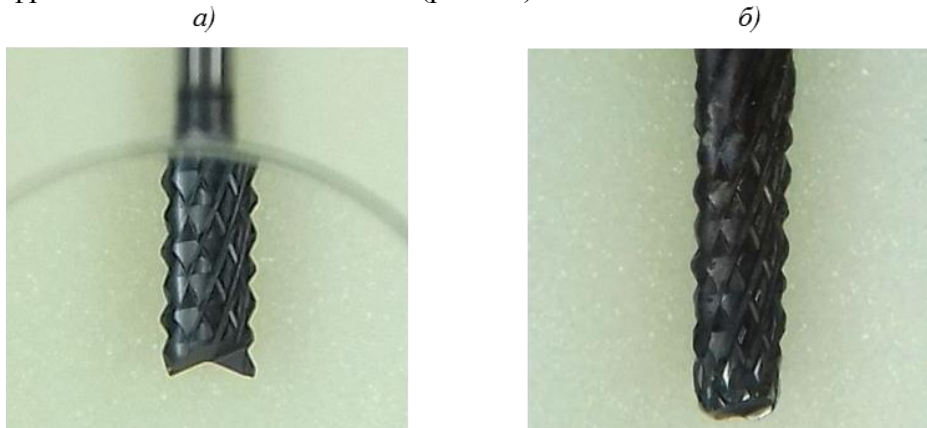


Рис. 11. Рашпильные фрезы – новая (а) и после использования (б)



Рис. 12. Фреза с алмазной пластиной РКД

Величина наибольшего допустимого износа инструмента (критерий затупления), при которой еще обеспечивается нормальное качество обработанной поверхности, при резании композитов, значительно меньше, чем при обработке металлов. В связи с абразивным воздействием на режущие кромки инструмента, увеличивается поверхность трения и в зоне резания выделяется большое количества тепла. Это приводит к значительному разогреванию обрабатываемого материала и появлению «прижогов».

Назначение режима резания для каждой конкретной марки ПКМ имеет предположительный характер в связи с малоизученностью влияния процесса резания на свойства материалов после обработки. Ориентиром назначения режима резания

служат каталожные рекомендации производителей инструмента, однако это не является оптимальным решением.

Инструмент с напаянными пластинами PKD требует осторожного обращения из-за его высокой стоимости и хрупкости алмаза, поэтому работы должны проводиться высококвалифицированными операторами. Возможность переточки твердосплавных инструментов с алмазным покрытием осложняется тем, что это покрытие необходимо сначала снять, затем заточить инструмент и заново нанести покрытие.

Отмеченные особенности фрезерования композитов требуют особого подхода к решению вопроса их обрабатываемости, а большое количество их типов, отличающихся как наполнителем и связующим, так и методом их получения, а также наличием различных типов инструмента и технологических приемов требует экспериментального исследования вопросов обработки композитов, цель которых назначение правильного технологического процесса, который обеспечивал бы оптимальное сочетание показателей эффективности: производительности, экономичности и качества.

Особенности конструкции оборудования

Благодаря своим уникальным свойствам, применение ПКМ в различных отраслях народного хозяйства будет увеличиваться, вместе с тем решается важная задача по предотвращению роста негативного воздействия вредных веществ на окружающую среду. Поэтому каждый этап жизненного цикла изделия (производство, эксплуатация, утилизация) должен быть тщательно проработан на стадии его проектирования на предмет невыхода за рамки защиты окружающей среды.

В помещениях, где производятся изделия из ПКМ, должна быть предусмотрена приточно-вытяжная вентиляция с фильтрующими элементами.

В связи с тем, что во время обработки композитов образуется много пыли, а в результате нагрева из ряда материалов выделяются вредные для здоровья персонала газообразные вещества, необходимо, чтобы оборудование имело систему отвода пыли (рис. 13) из зоны резания.



Рис. 13. Система отвода пылевидной стружки и вредных веществ

Следует также отметить, что при фрезеровании углепластика образуется пылевидная токопроводящая стружка, поэтому для предотвращения выхода из строя оборудования его электрические части должны быть надежно защищены.

Заключения

Для прижима листовых заготовок следует использовать оснастку, которая обеспечивает плотное прилегание к опорным плоскостям, не допуская упругих деформаций и создавая необходимую жесткость заготовки.

В связи со специфическими физико-механическими свойствами ПКМ для изготовления образцов следует применять специальный режущий инструмент:

- твердосплавные инструменты с алмазным покрытием;
- инструмент с режущими кромками из поликристаллических алмазов.

Для обеспечения здоровья персонала станок для обработки композитов должен быть оснащен системой отвода вредных веществ и пыли, а также электрические части станка должны быть надежно защищены.

ЛИТЕРАТУРА

1. Kablov E.N., Kondrashov S.V., Yurkov G.Y. Prospects of using carbonaceous nanoparticles in binders for polymer composites // *Nanotechnologies in Russia*, 2013. Vol. 8. No. 3–4. P. 163–185.
2. Каблов Е.Н. России нужны материалы нового поколения // *Редкие земли*. 2014. №3. С. 8–13.
3. Каблов Е.Н., Чурсова Л.В., Бабин А.Н., Мухаметов Р.Р., Панина Н.Н. Разработки ФГУП «ВИАМ» в области расплавных связующих для полимерных композиционных материалов // *Полимерные материалы и технологии*. 2016. Т. 2. №2. С. 37–42.
4. 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.
5. Бойчук А.С., Генералов А.С., Степанов А.В. Неразрушающий контроль углепластиков на наличие несплошностей с использованием ультразвуковых фазированных решеток // *Авиационные материалы и технологии*. 2015. №3. С. 84–89. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-3-84-89.
6. Мурашов В.В., Трифонова С.И. Контроль качества полимерных композиционных материалов ультразвуковым временным способом велосиметрического метода // *Авиационные материалы и технологии*. 2015. №4 (37). С. 86–90. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-4-86-90.
7. Бойчук А.С., Генералов А.С., Диков И.А. Контроль деталей и конструкций из полимерных композиционных материалов с применением технологии ультразвуковых фазированных решеток // *Авиационные материалы и технологии*. 2017. №1 (46). С. 45–50. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-1-45-50.
8. Неразрушающий контроль: справочник / под общ. ред. В.В. Клюева. М.: Машиностроение, 2006. Т. 3: Ультразвуковой контроль / И.Н. Ермолов, Ю.В. Ланге. 864 с.
9. Антюфеева Н.В., Столянков Ю.В., Исходжанова И.В. Исследование и оценка свойств полимерных композиционных материалов по методикам, гармонизированным с международными стандартами // *Конструкции из композиционных материалов*. 2013. №3. С. 41–45.
10. ASTM D5687/D5687M-95. Standard guide for preparation of flat composite panels with processing guidelines specimen preparation. ASTM International, West Conshohocken, PA, 2015. URL: <http://astm.org> (дата обращения: 01.10.2018). DOI: 10.1520/D5687_D5687M-95R15.
11. Abrão A.M., Rubio J.C.C., Faria P.E., Davim J.P. The effect of cutting tool geometry on thrust force and delamination when drilling glass fibre reinforced plastic composite // *Materials and Design*, 2008. Vol. 29. Is. 2. P. 508–513. URL: <https://www.scopus.com> (дата обращения: 18.10.2018). DOI: 10.1016/j.matdes.2007.01.016.
12. Caggiano A., Improta I., Nele L. Characterization of a new dry drill-milling process of Carbon Fibre Reinforced Polymer laminates // *Materials*. 2018. Vol. 11. Is. 8. P. 1470. URL: <https://www.scopus.com> (дата обращения: 18.10.2018). DOI: 10.3390/ma11081470.
13. Wang H., Sun J., Li J. et al. Evaluation of cutting force and cutting temperature in milling carbon fiber-reinforced polymer composites // *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2016. Vol. 82. Is. 9–12. P. 1517–1525. URL: <https://www.scopus.com> (дата обращения: 19.10.2018). DOI: 10.1007/s00170-015-7479-2.
14. Gao C., Xiao J., Xu J., Ke Y. Factor analysis of machining parameters of fiber-reinforced polymer composites based on finite element simulation with experimental investigation // *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2016. Vol. 83. Is. 5–8. P. 1113–1125 (дата обращения: 19.10.2018). URL: <https://www.scopus.com> DOI: 10.1007/s00170-015-7592-2.
15. Garant ToolScout: справочник по обработке резанием. Hoffmann Group, 2013. С. 152–153.
16. Технология нанесения алмазоподобных покрытий // Компания «Специальные технологии»: [офиц. сайт]. URL: <http://www.dlc.ru> (дата обращения: 20.10.2018).
17. Тихомиров Р.А., Николаев В.И. Механическая обработка пластмасс. Л., 1975. 208 с.