

УДК 621.7.06

М.И. Минибаев¹, М.Н. Усачева¹, В.С. Дышенко¹, В.А. Гончаров¹

ПРИСПОСОБЛЕНИЕ И ИНСТРУМЕНТ ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ОБРАЗЦОВ ИЗ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ НА СТАНКЕ С ЧПУ (обзор)

DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-4-100-109

Рассмотрены приспособление для фиксирования листовых заготовок из полимерных композиционных материалов (ПКМ) – перфорированный вакуумный стол, а также его конструкционные особенности, достоинства и недостатки, исходя из которых изготовлена верхняя часть вакуумного стола для нарезки образцов для испытаний по Иосипеску и диэлектрических испытаний. Описаны различные виды инструмента для обработки ПКМ, а также эксперимент на износостойкость рашипильной фрезы с алмазоподобным покрытием при фрезеровании углепластика, проведенный зарубежными исследователями.

Ключевые слова: механическая обработка, фрезерование, полимерный композиционный материал, вакуумный стол, режущий инструмент, станок с числовым программным управлением, дефекты.

M.I. Minibaev¹, M.N. Usacheva¹, V.S. Dyshenko¹, V.A. Goncharov¹

A DEVICE AND TOOL FOR MAKING SAMPLE FROM POLYMER COMPOSITE MATERIALS ON A CNC MACHINE (review)

The article discusses devices for fixing sheet metal blanks from PCM: a perforated vacuum table, its design features, advantages and disadvantages. Based on these data, the upper part of the vacuum table was made for cutting samples for Iosipescu tests and dielectric tests. The article describes various types of tools for PCM processing and an experiment on the wear resistance of a diamond-like coated rasp cutter when milling carbon fiber reinforced plastic, carried out by foreign researchers.

Keywords: machining, milling, polymer composite material, vacuum table, cutting tool, numerical control machine, defects.

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

Реальный суверенитет государства зависит от уровня развития промышленности, которая в свою очередь напрямую связана с технологической независимостью промышленных научно-производственных комплексов. Для обеспечения такой технологической независимости, а также конкурентоспособности отечественных изделий различного назначения, в том числе изделий авиационной техники, требуются новые, улучшенные полимерные композиционные материалы (ПКМ) [1–4].

В пояснительной записке к проекту распоряжения Правительства РФ «Об утверждении Стратегии развития авиационной промышленности Российской Федерации на период до 2030 года» определена целевая направленность на достижение конкурентоспособности продукции авиационной промышленности в отдельных (целевых) сегментах рынка и создание авиационной техники для обеспечения социально-экономического развития, обороноспособности, безопасности и связанности территории

страны. Отмечено также, что все более важным трендом становится уже начавшийся переход мирового авиастроения на принципиально новые технологии, включая замену металлоконструкций на композиционные материалы [5].

Для получения наиболее точных представлений о характеристиках создаваемого материала необходимо всестороннее изучение его физико-механических свойств и поведения в разных климатических условиях. Только после проведения различных испытаний и исследований возможно использовать материал в конструкциях летательных аппаратов и других высокотехнологических изделиях. Для каждого вида испытаний необходимо изготовить многочисленные партии образцов или конструктивно-подобных образцов (КПО) разрабатываемого материала различной геометрической формы и с разным размерным допуском [6].

В настоящее время композиционные материалы получили широкое распространение в ракетно-, самолето-, автомобиле- и судостроении; при возведении различных инженерных сооружений, например мостов и зданий, а также в спортивном оборудовании и др. [7–10].

При изготовлении и обработке деталей из ПКМ применяют как традиционные механические методы, так и основанные на использовании энергии водяной струи, лазерные и комбинированные способы. При этом самой широко применяемой является механическая обработка. Другие методы используются, как правило, в том случае, когда традиционные не могут обеспечить требуемые технологические характеристики – например, для получения отверстий малого диаметра (0,05 мм) используются лазерные установки.

Согласно технологическим основам машиностроения качество изготавливаемых деталей напрямую зависит от замкнутой технологической системы «станок–приспособление–инструмент–деталь», внутри которой действуют различные силы (резания, закрепления, упругости и др.). При взаимодействии этих сил возникают вибрации, приводящие к погрешности размеров и формы обрабатываемых поверхностей (некруглость, волнистость), а также к увеличению шероховатости. Положения системы «станок–приспособление–инструмент–деталь» также распространяются и на технологию изготовления образцов из ПКМ на станках с числовым программным управлением (ЧПУ). В данной работе рассмотрены приспособление и различные типы инструментов для изготовления образцов из ПКМ.

Статья подготовлена в рамках реализации стратегического научного направления 13. «Полимерные композиционные материалы» комплексной научной проблемы 13.2. «Конструкционные ПКМ» («Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года»).

Перфорированный вакуумный стол для изготовления образцов из полимерных композиционных материалов

При выборе приспособления для фиксации заготовки главным преимуществом является быстрота установки заготовки и снятия готовых образцов, при их соответствии требуемому качеству, особенно в тех случаях, когда обрабатывается большая партия образцов. Оптимальным выбором в этом случае будет перфорированный вакуумный стол, который позволяет плотно и равномерно прижимать лист-заготовку, быстро его фиксировать и снимать полученные образцы. Так, с помощью перфорированного вакуумного стола из листа алюминия толщиной 2 мм изготовлен элемент КПО размером 30×150 мм (рис. 1). Однако для изготовления малоразмерных образцов, например образцов с V-образным надрезом для испытаний по Иосипеску, ввиду малой площади поверхности образца, контактирующей с поверхностью вакуумного стола, прижимного вакуумного усилия недостаточно для фиксации заготовок.

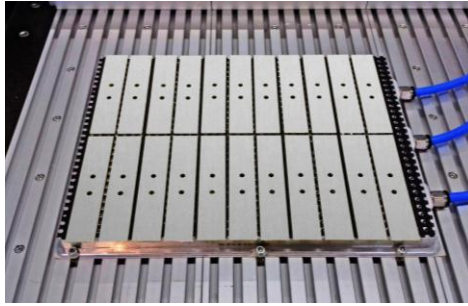


Рис. 1. Изготовление элемента конструктивно-подобного образца на перфорированном вакуумном столе

Вакуумный стол имеет конструкционную особенность: он разделен на три секции и в местах перегородок этих секций прижимное вакуумное усилие отсутствует, так же как и в местах крепления верхней перфорированной части (рис. 2). Кроме того, затягивание образующейся при фрезеровании пылевидной стружки в отверстия перфорированной крышки вакуумного стола в конечном счете приводит к их засорению и, как следствие, к потере своего функционального назначения. Снижение прижимного вакуумного усилия уменьшает надежность сопротивления силам резания, поэтому вырезаемый образец под воздействием этих сил сдвигается, что приводит к браку и психоэмоциональным перегрузкам оператора станка. Для восстановления функционального назначения перфорированной крышки приходится затрачивать значительное время на очистку отверстий.

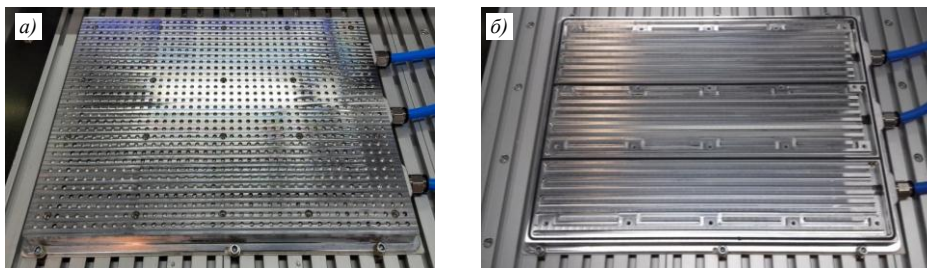


Рис. 2. Верхняя часть – перфорированная крышка (а) и нижняя часть – основание (б) вакуумного стола

Еще одной технологической особенностью при изготовлении образцов из ПКМ на вакуумном столе является образование на них заусенцев, которое происходит при одновременном наличии двух факторов: волокна обрабатываемой плиты из ПКМ расположены перпендикулярно траектории движения инструмента, а кромки вырезаемых образцов – над отверстиями вакуумного стола. На рис. 3 видно, что заусенцы не образуются в тех местах, где кромка образца расположена над отверстием вакуумного стола, а волокна – параллельно траектории движения режущего инструмента.

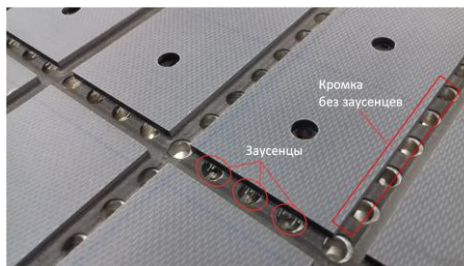


Рис. 3. Образование заусенцев при изготовлении образцов из полимерного композиционного материала на вакуумном столе

Конструкция вакуумного стола представляет собой корпус, состоящий из двух частей: верхней – перфорированного листа алюминия с крепежными отверстиями и нижней – основания, разделенного на три секции с каналами для нагнетания вакуумного усилия и резьбовыми отверстиями для крепления верхней части (перфорированной крышки).

С учетом конструкции вакуумного стола и рассмотренных ранее особенностей изготовления образцов из ПКМ с его использованием, спроектирована верхняя часть стола для изготовления образцов с V-образным надрезом для испытаний по Иосипеску [11, 12] и круглых образцов – для диэлектрических испытаний (рис. 4). Для пробного изготовления верхней части крышки в качестве материала заготовки выбрали поливинилхлорид, так как это легкообрабатываемый и в то же время достаточно жесткий и прочный материал.

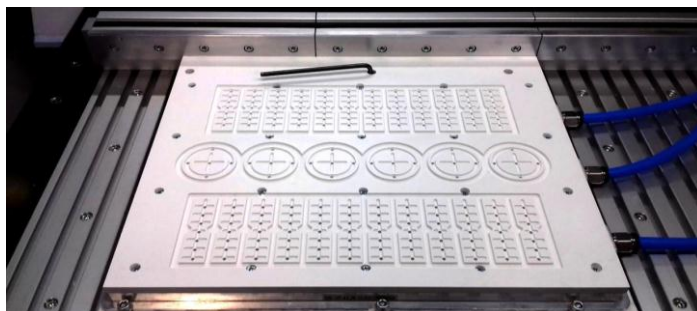


Рис. 4. Верхняя часть вакуумного стола для изготовления образцов из полимерных композиционных материалов

В работе [6] показано, что вследствие конструктивных особенностей фрезы, а также высокого абразивного воздействия обрабатываемого материала на инструмент необходимо, чтобы инструмент углублялся несколько глубже относительно нижней поверхности изготавливаемого образца, что позволяет соблюсти перпендикулярность нижней и верхней плоскостей образца относительно его торцов. При учете данных особенностей в приспособлении выполнили углубления размером 3 мм. Для ориентации вакуумного стола относительно шпинделя станка в качестве базового элемента принимается торец спроектированной верхней части, который плотно прижимается к упорам T-образного стола станка.

Для наиболее плотного прижатия заготовки к столу также используется силиконовая подложка. В данном случае принято решение вырезать из нее прокладки, повторяющие геометрическую форму контура образца (рис. 5). Для вырезки прокладок модифицировали станок, добавив опцию плоттера. Для этого из подручных материалов изготовили кронштейн держателя ножа плоттера. Крепление кронштейна на портале оси Z осуществляется винтами на места, куда устанавливается кронштейн сопла пылесоса. С использованием программы Inscapе (распространенной в свободном доступе) создана управляющая программа для станка, с помощью которой вырезаны прокладки. Фиксацию силиконовых прокладок к верхней части стола осуществляли с применением двустороннего скотча. Следует отметить, что управляющая программа должна быть разработана с учетом коррекции на офсет флюгерного ножа. (Офсетом называется смещение кончика острия ножа относительно его оси. Данная конструктивная особенность позволяет производить пассивный поворот режущей кромки ножа при изменении направления траектории его движения.)

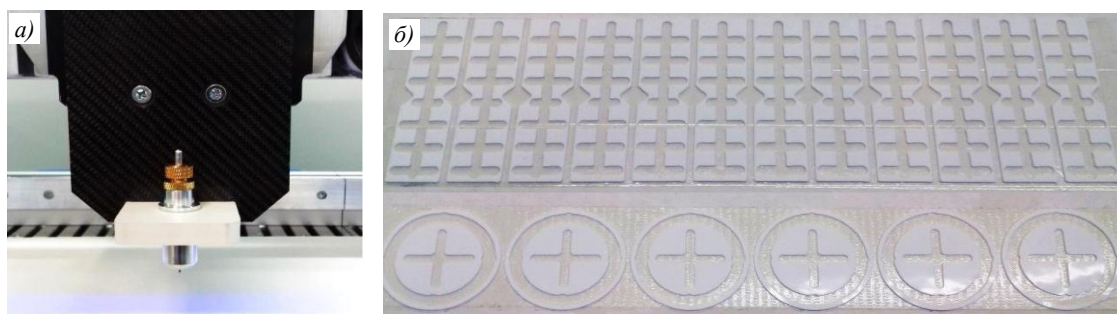


Рис. 5. Кронштейн держателя ножа плоттера (а) и вырезанные силиконовые прокладки (б)

Изготовлено ~700 шт. образцов с V-образным вырезом для испытаний по Иосипеску и ~100 шт. образцов для диэлектрических испытаний. Во время испытаний все заготовки были надежно зафиксированы и полученные образцы прошли требуемый контроль качества. Приспособление пригодно для дальнейшей эксплуатации (рис. 6).

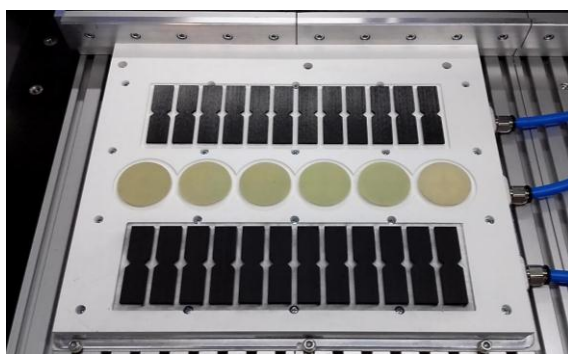


Рис. 6. Образцы, изготовленные на вакуумном столе

Инструмент для изготовления образцов из полимерных композиционных материалов

В настоящее время для обработки композиционных материалов доступны разные виды режущего инструмента, различающиеся по конструкции, типам исполнения режущей части, направлению отвода стружки, материалам, из которых они изготовлены, и др. Одна из причин этого – разнообразие физико-механических характеристик композиционных пластиков, которое обусловлено различными видами наполнителя и матрицы, схемой армирования, объемной долей армирующих волокон, а также анизотропией свойств. Кроме того, известно, что конструкция инструмента для механической обработки композиционных материалов во многом позаимствована из деревообрабатывающей промышленности [13]. Сходство в макроструктуре и механических свойствах композитов на основе древесины и композитов на основе искусственных волокон сделало возможным это заимствование, иногда даже без каких-либо конструктивных изменений. Это заимствование очевидно также и из-за проблем, с которыми сталкиваются при обработке волокнистых материалов: деламинация (расслоение), ворсистость (разорванные волокна) и образование заусенцев.

В большинстве случаев продукция из ПКМ представляет собой готовое изделие, и механическая обработка резанием чаще всего сводится к двум операциям – сверлению и фрезерованию по контуру. Для фрезерования по контуру изделий из материалов, которые наиболее подвержены расслоению, предпочтительнее использовать фрезу с противоположными режущими частями (рис. 7, а). Направление силы, действующей на обрабатываемую заготовку, зависит от направления спирали инструмента. Эта сила

в свою очередь вызывает расслоение поверхностных слоев и разломачивание. Противоположные спирали генерируют силы, которые действуют с верхней и нижней поверхностей в направлении центра заготовки – таким образом предотвращая расслоение. Для этого же типа операции (обработки по контуру) может быть применена фреза с другими конструкционными особенностями (рис. 7, б). Спиральные стружечные канавки и изогнутые режущие кромки обеспечивают фрезерование без заусенцев и предотвращают расслоение, поскольку одновременно работают и верхняя, и нижняя части режущих кромок. Для этого необходимо, чтобы середина режущей части фрезы совпадала с серединой профиля заготовки.

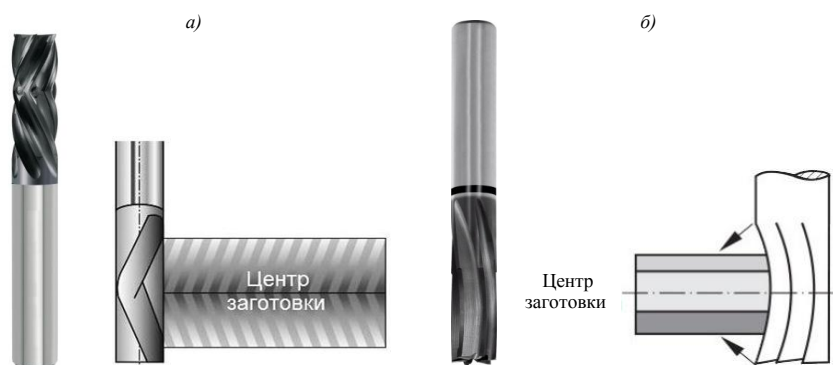


Рис. 7. Фрезы для обработки по контуру полимерного композиционного материала: а – с противоположными режущими частями; б – со спиральными стружечными канавками и изогнутыми режущими кромками

При наличии на рынке разных видов и производителей инструмента для выполнения одного и того же типа операции фрезерования технолог при выборе инструмента руководствуется критериями его стоимости и износостойкости.

Наиболее широкое распространение при обработке композиционных материалов получили рашпильные фрезы (рис. 8) – благодаря своей универсальности, высокой износостойкости и способности производить чистый рез при повышенных скоростях резания и подачи. Они также могут отличаться друг от друга по количеству зубьев, размеру режущих зубьев, типу торцевого зуба и др.

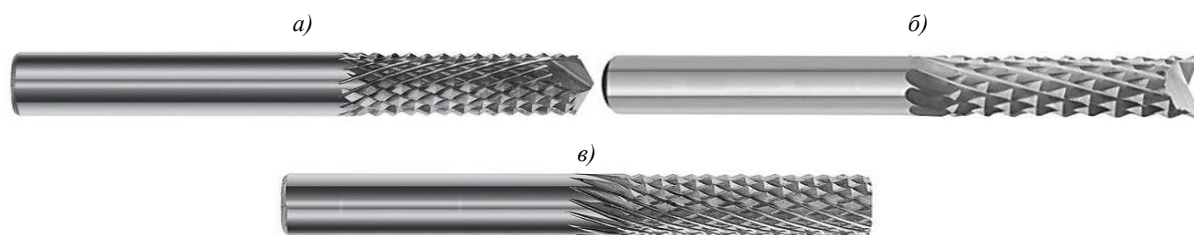


Рис. 8. Рашпильные фрезы с типом торцевого зуба «сверло» (а) и «ласточкин хвост» (б), а также без торцевого зуба (в)

Левые и правые спирали, находящиеся на периферии инструмента, пересекаясь, создают множество режущих ромбовидных зубьев. Зубья расположены с перекрытием таким образом, чтобы на кромке обрабатываемого изделия не оставалось канавок. Однако если предъявляются высокие требования к шероховатости торцов изделия, необходимо дополнительно выполнить чистовую обработку с применением фрезы с поликристаллическими алмазными пластинами.

Недостатками рашпильных фрез являются преждевременное разрушение кончиков режущих зубьев (рис. 9) и легкость засорения канавок. Эти недостатки необходимо учитывать при подборе режимов резания. В работе [14] проведено исследование на износостойкость рашпильной фрезы диаметром 10 мм с алмазоподобным покрытием при фрезеровании углепластика с квазиизотропной укладкой. Матрицей углепластика являлось связующее марки AG-80, а наполнителем – ткань марки T-700.

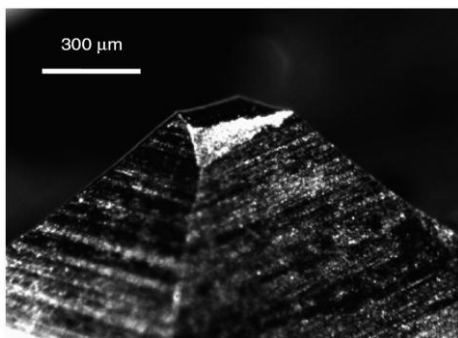


Рис. 9. Износ режущей кромки зуба рашпильной фрезы

Проведен также анализ влияния стойкости инструмента на шероховатость обработанной поверхности. Предложен следующий режим резания: скорость резания 100 м/мин, подача режущего инструмента 0,02 мм/зуб, глубина и ширина фрезерования 1 и 5 мм соответственно.

За влиянием износа инструмента на качество обрабатываемой поверхности наблюдали, прекращая фрезерование через каждые 2 м и определяя износ инструмента, а также морфологию обрабатываемой поверхности. Эксперимент не прекращали до тех пор, пока на поверхности заготовки не появились явные заусенцы.

Весь процесс износа рашпильной фрезы с алмазоподобным покрытием делится на две стадии: выкрашивание алмазоподобного покрытия и десквамация (отслаивание) покрытия с интенсивным выкрашиванием основного материала режущего инструмента. На начальном этапе режущая кромка была острой. В процессе фрезерования она постоянно подвергалась абразивному воздействию углеродного волокна, покрытие постепенно изнашивалось, и ее радиус увеличился, достигнув длины фрезерования 12 м (рис. 10, а). По мере увеличения радиуса режущей кромки ухудшается эффективность срезания волокон. Таким образом, не срезанные в полной мере волокна оказывали дополнительное негативное воздействие на режущую кромку, что приводило к быстрому увеличению износа по задней поверхности режущего зуба (рис. 10, б). Утонение алмазоподобного покрытия, сопровождаемое увеличением сил резания, привело к уменьшению его прочности сцепления с основным материалом инструмента, что повлекло за собой отслаивание покрытия и далее выкрашивание основного материала режущего инструмента (рис. 10, в).

Важным фактором при фрезеровании композиционных материалов из углепластика является качество поверхности изготовленных деталей для их дальнейшей сборки, а также для повышения сопротивления усталостным разрушениям [15, 16].

На рис. 11 приведена морфология обработанной поверхности углепластика с разной длиной фрезерования. Когда длина фрезерования составляла 12 м – морфология обработанной поверхности была плоской и без каких-либо дефектов обработки. Тот факт, что шероховатость поверхности составляла 1,4 мкм, а расстояние между пиком волны и впадиной было небольшим, свидетельствовал о хорошем качестве обработанной поверхности. Когда длина фрезерования составляла 42 м – шероховатость достигала

2,3 мкм, а на обработанной поверхности обнаруживались небольшие дефекты обработки (канавки). При фрезеровании происходит истирание режущей кромки зубьев, обусловленное высокой степенью абразивного воздействия углепластика. Притупление режущих кромок зубьев способствует увеличению площади контакта с поверхностью обработки, т. е. увеличивается поверхность трения, что в дальнейшем приводит к значительному разогреву в зоне резания – термической деструкции связующего. Так, на длине фрезерования 42 м матрица нагрелась и размягчилась, в результате на обработанной поверхности образовались наклепы связующего. На длине фрезерования 72 м морфология обрабатываемой поверхности серьезно ухудшилась и шероховатость поверхности составила 5,1 мкм. Наблюдались такие дефекты, как деламинация, разломачивание и вырывы волокон.

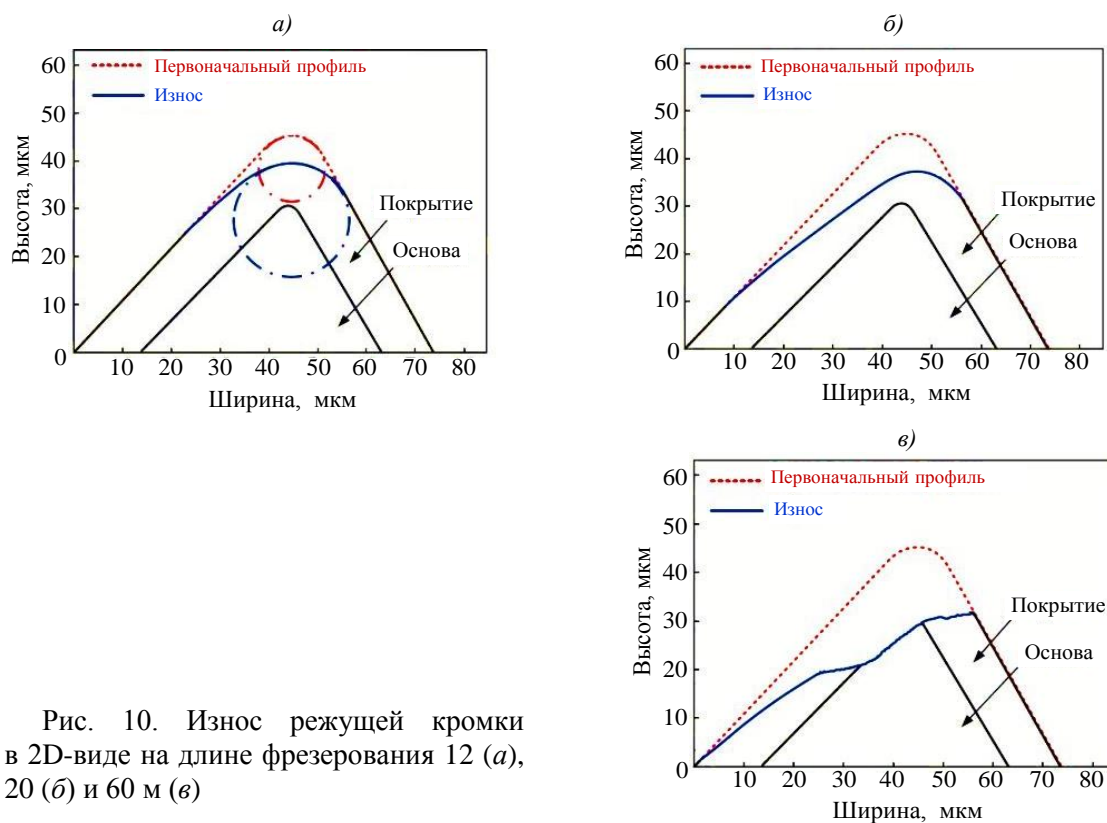


Рис. 10. Износ режущей кромки в 2D-виде на длине фрезерования 12 (а), 20 (б) и 60 м (в)

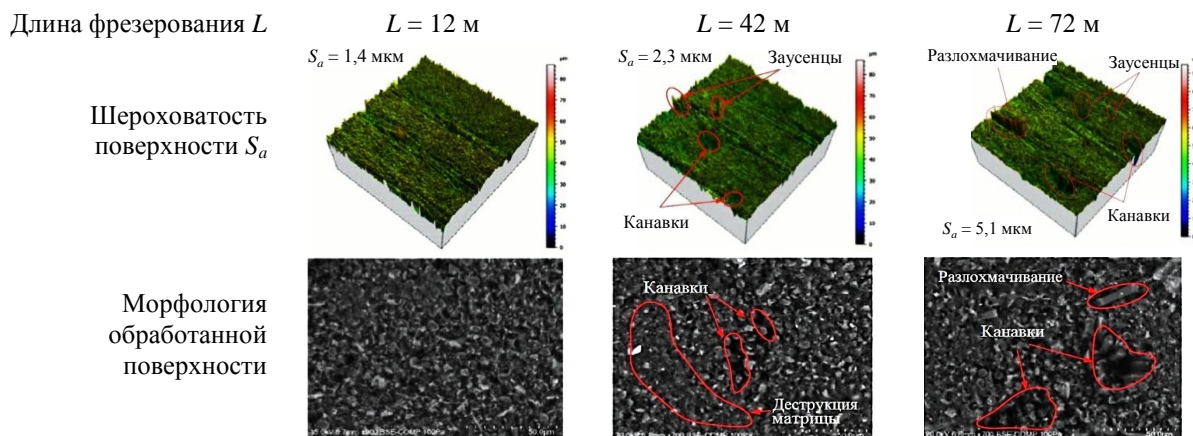


Рис. 11. Морфология и шероховатость поверхности углепластика на разной длине фрезерования

На рис. 12 показано образование заусенцев на обрабатываемой поверхности при фрезеровании углепластика рашпильной фрезой с алмазоподобным покрытием. В начале фрезерования кромка обработанной поверхности заготовки была ровной, без образования явных заусенцев, а стружка представляла собой мелкодисперсную пыль (рис. 12, а).

С увеличением длины фрезерования по мере выкрашивания алмазоподобного покрытия возникали некоторые дефекты. Как верхняя, так и нижняя кромки поверхности заготовки были ровными, но на верхней кромке появилось небольшое количество коротких заусенцев (рис. 12, б).

Затем на стадии отслаивания алмазоподобного покрытия и интенсивного выкрашивания базового материала инструмента, когда длина фрезерования достигла 72 м, эффективность резания начала заметно снижаться. Волокна на кромках обрабатываемой поверхности заготовки не были начисто срезаны. Более того, заусенцы появились как на верхней, так и на нижней кромке поверхности заготовки. Постепенно заусенцы становились длиннее, их плотность увеличивалась и они почти полностью покрыли кромки заготовки, т. е. на кромках образовался дефект – ворсистость.

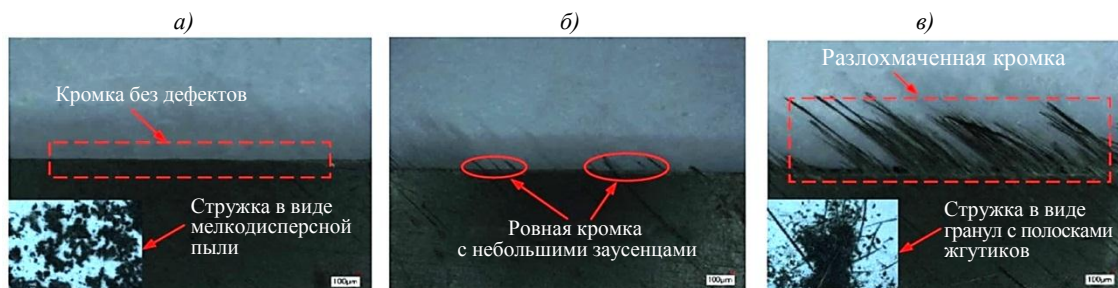


Рис. 12. Дефекты кромки углепластика на длине фрезерования 12 (а), 42 (б) и 72 м (в)

На данной стадии стружка была гранулированной, а включения в стружке – в виде длинных полосок (рис. 12, в). В отличие от начальной стадии фрезерования, гранулы были явно больше, а наличие длинных полосок является следствием вырыва затупленным инструментом целых жгутиков.

Заключения

Для получения более точных представлений о свойствах разрабатываемого материала приходится изготавливать многочисленные партии образцов. Для увеличения производительности изготовления образцов имеет смысл спроектировать и изготовить приспособление специально для каждого типа малоразмерного образца, так как это позволит значительно сократить временные издержки и обеспечит повторяемость качества у получаемых образцов в заданных пределах допуска.

Износ инструмента влечет за собой различные дефекты – деламинацию, термическую деструкцию, ворсистость и др. Поэтому, для того чтобы получать достоверные представления о свойствах материала, необходимо следить за состоянием режущего инструмента. Кроме того, важно выбрать оптимальный режим резания, основываясь на схеме армирования материала, температуре термической деструкции матрицы и др.

Библиографический список

1. Онищенко Г.Г., Каблов Е.Н., Иванов В.В. Научно-технологическое развитие России в контексте достижения национальных целей: проблемы и решения // Инновации. 2020. № 6 (260). С. 3–16.

2. Kablov E.N. New Generation Materials and Technologies for their Digital Processing // Herald of the Russian Academy of Sciences. 2020. Vol. 90. No. 2. P. 225–228.
3. Каблов Е.Н. ВИАМ: материалы нового поколения для ПД-14 // Крылья Родины. 2019. № 7–8. С. 54–58.
4. Каблов Е.Н. Материалы нового поколения и цифровые технологии их переработки // Вестник Российской академии наук. 2020. Т. 90. № 4. С. 331–334.
5. Проект распоряжения Правительства Российской Федерации «Об утверждении Стратегии развития авиационной промышленности Российской Федерации на период до 2030 года». URL: <https://www.minpromtorg.gov.ru> (дата обращения: 01.12.2020).
6. Минибаев М.И., Раскутин А.Е., Гончаров В.А. Особенности технологии изготовления образцов из ПКМ на станках с ЧПУ (обзор) // Труды ВИАМ. 2019. № 1 (73). Ст. 11. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 02.12.2020). DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-1-105-114.
7. Ozkan D., Sabri Gok M., Oge M., Cahit Karaoglanli A. Milling Behavior Analysis of Carbon Fiber-Reinforced Polymer (CFRP) Composites // Materials Today: Proceedings. 2019. Vol. 11. P. 526–533.
8. Кондрашов С.В., Шашкеев К.А., Петрова Г.Н., Мекалина И.В. Полимерные композиционные материалы конструкционного назначения с функциональными свойствами // Авиационные материалы и технологии. 2017. № S. С. 405–419. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-405-419.
9. Куцевич К.Е., Тюменева Т.Ю., Петрова А.П. Влияние наполнителей на свойства клеевых препрегов и ПКМ на их основе // Авиационные материалы и технологии. 2017. № 4 (49). С. 51–55. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-4-51-55.
10. Ильичев А.В., Губин А.М., Акмеев А.Р., Иванов Н.В. Определение области максимальных сдвиговых деформаций для образцов углепластика по методу Иосипеску, с использованием оптической системы измерений // Труды ВИАМ. 2018. № 6 (66). Ст. 10. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 01.12.2020). DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-6-99-109.
11. Застрогина О.Б., Серкова Е.А., Сарычев И.А., Вавилова М.И. Влияние винифлекса российского и китайского производства на свойства связующего ВФТ и стеклотекстолита на его основе // Авиационные материалы и технологии. 2020. № 3 (60). С. 3–9. DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-3-3-9.
12. ASTM D5379/D5379M-19. Standard Test Method for Shear Properties of Composite Materials by the V-Notched Beam Method. ASTM International, West Conshohocken, 2019. URL: <http://astm.org> (дата обращения: 01.12.2020). DOI: 10.1520/D5379_D5379M-19.
13. Thakur R.K., Singh K.K., Karumesh K. Investigation of milling characteristics in grapheme-embedded epoxy/carbon fibre reinforced composite // Materials Today: Proceedings. 2020. Vol. 33. P. 5643–5648.
14. Аристова Е.Ю., Денисова В.А., Дрожжин В.С. и др. Композиционные материалы с использованием полых микросфер // Авиационные материалы и технологии. 2018. № 1 (50). С. 52–57. DOI: 10.18577/2071-9140-2018-0-1-52-57.
15. 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. DOI: 10.1007/s00170-015-7592-2.
16. Воробей В.В. Технология производства конструкций из композиционных материалов. М.: Изд-во МАИ, 1996. 178 с.