

А. Л. Галиновский, д-р техн. наук, **Цзя Чжэньюань**, **С. Н. Цыпышева**, **К. А. Терновских**, **С. А. Рябенкова**
(Московский государственный технический университет имени Н. Э. Баумана, Москва, Россия,
e-mail: a_galinovskiy@bmstu.ru),
С. А. Ерохин (Общество с ограниченной ответственностью «Специальное
конструкторско-технологическое бюро "Пластик"», Сызрань, Самарская обл., Россия)

НОВЫЕ МЕТОДЫ И ТЕХНОЛОГИИ ОБРАБОТКИ УГЛЕПЛАСТИКОВ*

Рассматриваются вопросы применения новых методов и подходов для механической обработки углепластиков на основе анализа зарубежных информационных источников с глубиной поиска пять лет. Отмечено, что обработка композиционных материалов, в частности углепластиков, представляет собой совокупность сложных задач, решения которых до сих пор не найдены в полном объеме. Показано, что применение новых методов образования отверстий, фрезерования деталей, гидроабразивной и лазерной обработок позволяет получать новые выходные показатели качества. Внедрение рассмотренных методов, разработанных зарубежными учеными, может дополнить арсенал средств и технологий обработки композиционных материалов на отечественных предприятиях. Указывается, что обеспечение качества обработки и формирование сложных поверхностей углепластиков крайне важно для авиационной, ракетно-космической техники, где объемы применения данного материала постоянно возрастают.

Ключевые слова: углепластики; обработка; механическая обработка; композит; полимерный композиционный материал; дефекты; нетрадиционные методы.

A. L. Galinovskiy, Tszya Chzhen'yuan', S. N. Tsypysheva, K. A. Ternovskih, S. A. Ryabenkova
(Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia),
S. A. Erokhin (Special Design and Technological Bureau "Plastick", Syzran, Samara Region, Russia)

NEW METHODS AND TECHNOLOGIES FOR PROCESSING CARBON FIBER-REINFORCED PLASTICS

The article deals with the application of new methods and approaches for machining of carbon plastics on the basis of the analysis of foreign information sources with a search depth of five years. The complex problems of composite materials processing, in particular, carbon plastics, the solutions of which have not yet been found in full, are noted. Applying of new methods of hole formation, part milling, hydro-abrasive and laser processing allows to obtain new output quality indicators is pointed out. The implementation of considered methods, developed by foreign scientists, may supplement the tools arsenal and technologies of composite materials processing at domestic enterprise. The importance of quality assurance of composites' complex surfaces processing and formation in aircraft and aerospace engineering, where utilization level of this material is constantly increasing, is indicated.

Keywords: Carbon fiber-reinforced plastics; Processing; Machining; Composite; Polymer composite material; Defects; Non-traditional methods.

Статья поступила в редакцию 11.02.2021 г.

Введение

Углепластики представляют собой композиционные материалы, содержащие в качестве наполнителя углеродные волокна, расположенные в матрице из полимерных (например, эпоксидных) смол. Эти материалы, являющиеся сравнительно новым классом *полимерных композиционных материалов (ПКМ)*, в последние годы получили наиболее

широкое и интенсивное распространение благодаря своим уникальным свойствам: высокой прочности и жесткости, усталостной прочности, низким значениям коэффициента теплового расширения, устойчивости к воздействию агрессивных сред, а также малому удельному весу [1]. Благодаря своим свойствам углепластики нашли широкое применение во многих отраслях промышленности,

* Исследования выполнялись в рамках грантов РФФИ 18-29-18081 и 19-38-90228\19 и гранта от фонда содействия инновациям по программе УМНИК-18 (в) в соответствии с договором № 14727ГУ/2019.

включая ракетостроение, авиацию, автомобилестроение, строительство и др.

Однако, помимо вышеперечисленных преимуществ, углепластики обладают существенными особенностями, которые усложняют процесс механической обработки. К ним относятся низкая теплопроводность, анизотропия свойств, уязвимость к точечным ударам, абразивное воздействие наполнителя на инструмент. При механической обработке углепластика могут возникнуть следующие дефекты: расслоение, выдергивание волокон, термическая деструкция, разломачивание и образование заусенцев. Для предотвращения этих дефектов разрабатываются новые подходы к обработке углепластиков [2].

Целью данной работы является рассмотрение различных нетрадиционных способов обработки, предложенных зарубежными исследователями, и показавшими себя наиболее эффективными по предупреждению дефектов, возникающих при механической обработке углепластиков.

Нетрадиционные методы сверления

Одним из основных видов *механической обработки (МО)* композиционных материалов является сверление. Это важнейшая операция по удалению материала в композитах, для которой в настоящее время наиболее распространено использование спиральных сверл. Однако анизотропия и неоднородность углепластика препятствуют эффективному сверлению материала, вызывая дефекты отверстий, такие как расслоение, низкая точность размеров и нарушение целостности поверхности, а также наблюдается ускоренное изнашивание инструмента. Эти факторы негативным образом сказываются на выполнении последующих сборочных операций. Вследствие разной ориентации углеродных волокон в сочетании с их абразивной природой отмечается отличное поведение материала, чем при сверлении металлов. Поскольку сверление зачастую является заключительной операцией механической обработки, любая ошибка во время выполнения данной операции может привести к возникновению неустраняемого брака и серьезным экономическим потерям.

Для увеличения стойкости инструмента и качества получаемых отверстий, авторами исследования [3] рассмотрено применение дополнительного криогенного охлаждения. В эксперименте было осуществлено охлаждение

с помощью форсунки, которая опрыскивала заготовку и сверло жидким азотом (LN_2) под давлением 100 кПа (1 бар) (рис. 1). Помимо этого, в статье было выдвинуто предположение, что геометрия спиральных сверл, используемых для сверления углепластика, может оказывать значительное влияние на усилия и общее качество отверстий.

По мнению авторов [3], для уменьшения повреждений, связанных с расслоением, наиболее эффективны инструменты, распределяющие осевую силу по направлению к краю отверстия, например, колонковые сверла с отрицательным острием (такие как прямозубые сверла). Однако практическое применение колонковых сверл ограничено из-за плохого центрирования, а прямозубые сверла улучшают поверхность отверстий, просверленных в углепластике криогенными методами. Отмечалось, что использование ступенчатых сверл при сверлении углепластика эффективно для снижения осевой силы, но не были доказаны их существенные преимущества, связанные с расслоением. Те же предположения относятся и к многоступенчатым спиральным сверлам, которые обычно используются в промышленности. В исследовании рассматривались конструкции двух вариантов технического исполнения сверл: ступенчатое и прямозубое.

В результате рассмотрения влияния геометрии сверл на расслоение было установлено, что ступенчатые сверла производили самую низкую критическую осевую силу, но заметного снижения расслоения не наблюдалось, что было связано с неоптимальной конструкцией ступенчатого сверла, используемого в работе [4]. Увеличение соотношения диаметров ступенчатого сверла снижало вероятность расслоения и являлось наиболее важным условием в уменьшении осевой силы при сверлении углепластика ступенчатым сверлом. Прямозубые сверла рекомендовались, когда конструкция инструмента рассматривалась в целях обеспечения точности размеров.

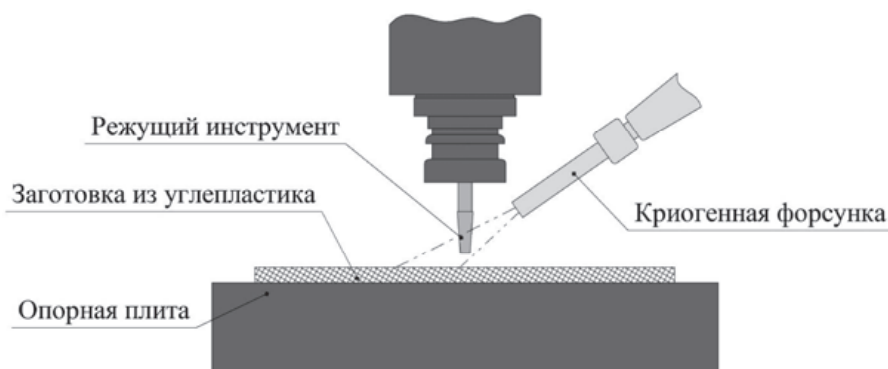


Рис. 1. Схема операции сверления с криогенным охлаждением

По результатам использования криогенного охлаждения авторы [3] отмечали уменьшение расслоения на выходной поверхности на 8 %, снижение шероховатости и улучшение качества поверхности – в среднем на 25 % (по сравнению с «сухими» условиями), а также увеличение стойкости, снижение износа инструмента, повышение точности обрабатываемых размеров. Помимо этого, была отмечена необходимость использования специфической геометрии режущего инструмента для различных условий обработки из-за изменения свойств материала при различных температурах. Подчеркивалось, что при сверлении с криогенным охлаждением лучше всего работали прямозубые сверла (в особенности с увеличенным углом наклона спирали и отрицательным углом при вершине).

Помимо приведенных выше нетрадиционных методов сверления, авторами статей [5, 6] были изучены альтернативные условия охлаждения и смазки. Так, исследователями [5] был рассмотрен процесс сверления с применением микросмазывания, а также его сравнение с криогенными и «сухими» условиями. Поскольку режимы резания играют важную роль, для исследования влияния подачи при сверлении углепластиков использовался подход с переменной подачей.

При сверлении с применением микросмазывания СОЖ (масло на растительной основе) подавалось внутрь через сквозное отверстие сверла с помощью системы подачи с расходом 36 мл/ч, что позволяло смазке достичь даже выходной стороны отверстия.

По результатам эксперимента по сверлению с микросмазыванием авторы статьи [5] отметили, что осевая сила была на 17,6 % больше, чем при «сухих» условиях, поскольку жидкая смазка, подаваемая вверх через сверло, блокировала свободный поток стружки, оказывая большее давление и увеличивая осевую силу. Однако в криогенных условиях осевая сила являлась самой высокой – на 36 % выше, чем при «сухом» сверлении. Так же отмечалось, что при использовании СОЖ расслоение на входе было на 10 % выше, чем при «сухих» условиях, из-за более высоких горизонтальных сил, а расслоение на выходе в криогенных условиях было на 16 % выше, чем при «сухом» сверлении из-за большей осевой силы. Обработка в криогенных условиях и с СОЖ давала меньший разброс значений по диаметру, а криогенное сверление, в частности, давало наименьшие различия среди всех методов. При сверлении без смазывания

отверстия имели наибольшее отклонение от номинального размера, поскольку сверло сильно расширялось из-за более высокой температуры, что приводило к получению диаметров отверстий большего размера. Кроме того, «сухое» сверление показало эффект конусности на выполненных отверстиях, при котором диаметр отверстия был больше на входе и уменьшался по глубине отверстия. Так же выделяли, что при наименьшем значении подачи, композит испытывал меньшее расслоение по сравнению с большой величиной подачи, что доказывает сильную зависимость расслоения от подачи. Сверление с переменной подачей уменьшало истирание и скол волокон.

В связи с тем, что криогенное охлаждение – экологически безопасный метод, оно может стать альтернативой «сухому» сверлению углепластиков, а метод с использованием микросмазывания является альтернативой «сухим» условиям.

Кроме рассмотренных методов, авторами работы [6] отмечено, что высокая температура ($>400\text{ }^{\circ}\text{C}$) может быть вредной при сверлении углепластика из-за снижения прочности и жесткости. Однако в условиях умеренных температур (от 60 до $120\text{ }^{\circ}\text{C}$) уменьшаются износ инструмента и расслоения, улучшается сьем материала. Так же авторы указали, что сверхнизкие (криогенная заморозка) и экстремальные температуры (точка стеклования¹) могут быть не очень полезны для материала, поскольку, например, при температурах выше точки стеклования, волокна и матрица пластически деформируются из-за размягчения матрицы, что приводит к повреждению поверхностного слоя при сверлении. При этом применение не слишком низких температур может хорошо повлиять на обработку и качество углепластика.

В процессе проведения испытаний условия с охлажденным и горячим воздухом были получены с помощью соответственно пушки со сжатым вихревым холодным воздухом и тепловой пушки марки Dewalt (США), воздух от которых подавался на поверхность (зону сверления) образца при различных температурах.

Результаты экспериментов, описанных в статье [6], показали, что при сверлении в условиях горячего воздуха уменьшаются осевая сила и коэффициент расслоения при низкой скорости подачи. В то же время более высокая скорость удаления заусенцев и улучшенное качество поверхности, по сравнению с другими условиями окружающей среды, были получены в условиях охлажденного воздуха.

¹ Температурой стеклования (англ. – glass-transition temperature) называется температура, при которой полимер в процессе охлаждения переходит из высокоэластического или вязкотекучего состояния в стеклообразное.

Так же было установлено, что при температурах воздуха 60 и 90 °С возникают минимальная осевая сила (49,03 Н) и коэффициент расслоения (при более низкой скорости подачи, по сравнению с другими условиями). Кроме того, отмечалось, что процент съема материала (меньшая площадь заусенцев) был больше при более высоких значениях осевой силы и более низких значениях оборотов шпинделя (в условиях охлажденного воздуха и в «сухих» условиях при температуре 60 °С), поскольку волокно и матрица теряли свою пластичность при низких температурах, что позволяло легко удалять заусенцы. Шероховатость поверхности (ее среднее значение) оказалась ниже при использовании охлажденного воздуха и меньшей скорости резания (100 мм/мин) по сравнению с другими температурными условиями обработки, при этом в условиях сухого и горячего воздуха шероховатость поверхности не имела значительной корреляции с параметрами обработки. Отмечалось, что при сверлении в горячем воздухе (60 и 120 °С) в углепластике обнаруживались бо́льшая область разрушения матрицы и пустоты.

Еще одним из перспективных методов сверления композитов, армированных углеволокном, является метод *электрохимической разрядной обработки* (ЭХРО), который сочетает в себе действие *электрохимической обработки* (ЭХО) и *электроэрозионной обработки* (ЭЭО). При применении ЭХРО сообщалось о нескольких проблемах качества, таких как конусность отверстий и заусенцы, которые могли возникать из-за небольшой скорости резания, используемой в обработке данных материалов. В статье [7] рассмотрено использование высокоскоростной ЭРХО для сверления заготовки из углеродно-эпоксидного композита (рис. 2), который в основном используется в аэрокосмической отрасли.

В процессе проведения экспериментов отмечено, что рабочие параметры ЭХРО, такие как *скорость удаления материала (СУМ)* и *радиальный надрез (РН)*, зависят от скорости вращения инструмента, напряжения, концентрации электролита. Обнаружено, что при более высоких скоростях вращения инструмента частота искр на рабочем контакте инструмента увеличивалась, что приводило к термическому травлению материала и, следовательно, к высоким СУМ. С увеличением концентрации электролита скорость удаления материала

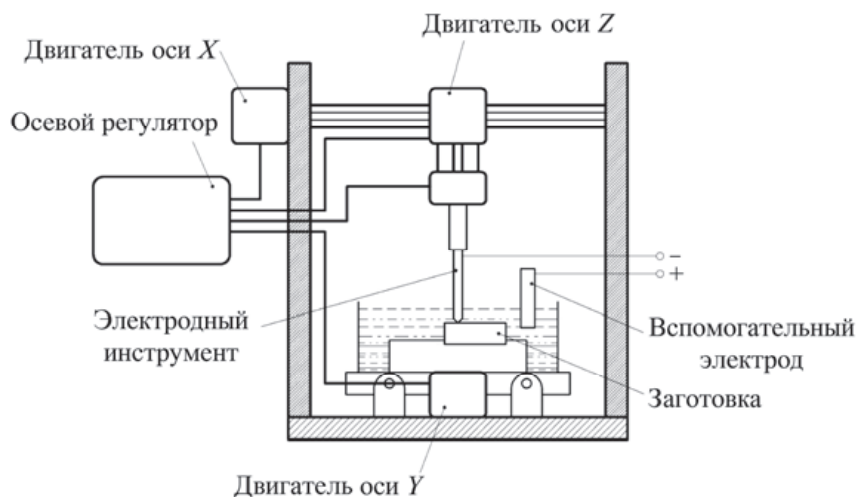


Рис. 2. Схема высокоскоростной электрохимической разрядной обработки

также увеличивалась, поскольку мощность, доступная для механической обработки, увеличивалась из-за увеличения межэлектродного сопротивления, что приводило к более высокой плотности искры, которая удаляла больше материала путем термического травления. В этом исследовании установлено, что СУМ наиболее высока при концентрации электролита, равной 30 %.

Установлено также, что увеличение скорости вращения инструмента уменьшало перерез в отверстиях, и при высокой скорости вращения инструмента можно достигнуть высокой точности. В некоторых случаях могло происходить плавление композита и его составляющих вследствие высокой температуры, генерируемой искрой в ЭХРО. Отмечалось, что при этом явлении происходило запаивание свободных волокон на обработанной поверхности композита, что обеспечивало размерно точную работу с хорошим формированием поверхности по сравнению с режущими операциями, но плавление и горение концов волокон давали плохой внешний (эстетический) вид.

Таким образом исследование показало, что в различных эксплуатационных аспектах ЭРХО подходит для проведения процессов механической обработки углепластиков, и такая механическая обработка может быть выполнена с минимальным повреждением на границе матрица–волокно.

Помимо представленных выше методов сверления с температурным влиянием на заготовку, возможно применение других видов сверления, например, сверление с использованием вибрации, которые рассмотрели авторы статьи [8]. В приведенном исследовании заготовка закреплялась на вибрационном стенде и подвергалась обработке сверлением (рис. 3).

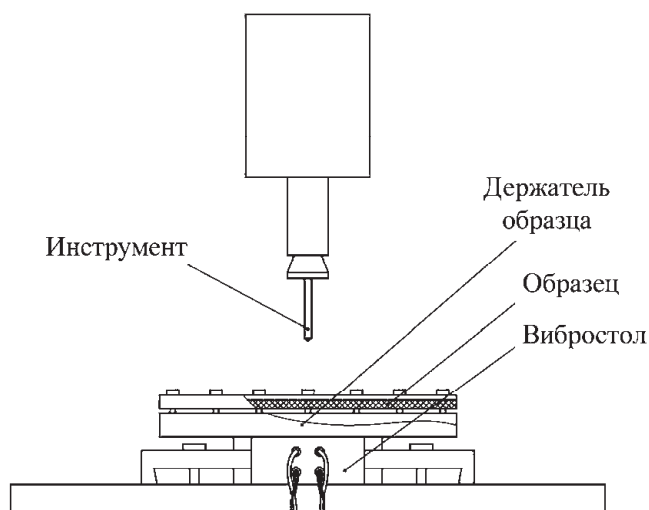


Рис. 3. Схема обработки сверлением на вибростол

В ходе эксперимента выявлено, что при сверлении с вибрацией, количество разломанных волокон уменьшилось в 2 раза по сравнению с обычным сверлением, однако полностью предотвратить появление данного дефекта не удалось. С увеличением длины обточки число дефектов росло, однако при обработке с вибрацией стало меньше. Благодаря вибрации уменьшается не только количество дефектов, но и износ инструмента. Лучшие результаты при сверлении были получены при круговых колебаниях с частотой 100 Гц и амплитудой 2 мкм.

Нетрадиционные методы фрезерования углепластиков

Следующий, немаловажный вид МО для композитов – фрезерование. Установлено, что волокнистость, расслоение, разрушение матрицы – это дефекты, которые могут появляться во время МО. Эти дефекты, как уже было сказано, можно уменьшить с помощью использования инструмента с определенной геометрией, а также правильного выбора режима резания. Помимо этого, для устранения данных дефектов есть возможность применения нестандартных методов обработки, таких как вибрационное, температурное, лазерное воздействия. Например, в статье [8] предложено объединить обычные режимы фрезерования с вибрационным воздействием. В проводимом исследователями эксперименте заготовка закреплялась на вибрационном стенде и обрабатывалась фрезерованием.

В результате эксперимента авторы отмечали, что при фрезеровании с вибрацией частично повышается качество образуемых поверхностей. Общее количество разломанных волокон сокращалось до 37 % при круговых колебаниях и до 30 % при

колебаниях в направлении подачи, по сравнению с обычным фрезерованием. Однако колебания в направлении, перпендикулярном к движению подачи, не привели к изменению величины дефектов. Так же отмечалось, что качество нижних кромок пропила улучшилось при попутном фрезеровании с любым видом колебаний, а при определенных режимах количество изношенных волокон можно уменьшить до 64 %. На верхних кромках повреждения сократились не так значительно: до 18...29 % в зависимости от вида колебаний. Однако встречное фрезерование с вибрацией приводило к образованию большего числа данных повреждений, что нетипично, так как в большинстве случаев встречное фрезерование давало более качественную поверхность, чем попутное. Это может быть объяснено хрупкостью углепластиков. Так же как и при сверлении, лучшие результаты при фрезеровании были получены при круговых колебаниях с частотой 100 Гц и амплитудой 2 мкм.

В статье [9] авторами исследовано фрезерование углепластика, погруженного в криогенную среду. В данном эксперименте заготовку помещали в жидкий азот таким образом, что образец из композита подвергался воздействию экстремально низких температур во время механической обработки в течение 30 мин (рис. 4). Исследования проводили как в сухих, так и в криогенных условиях с использованием одних и тех же параметров резания. Были протестированы все комбинации параметров резания в выбранном диапазоне, при этом глубина резания поддерживалась постоянной, равной 2 мм. Кроме того, было изучено влияние криогенного охлаждения, реализованного в исследовании, на механические свойства при растяжении и микроструктуру композитов.

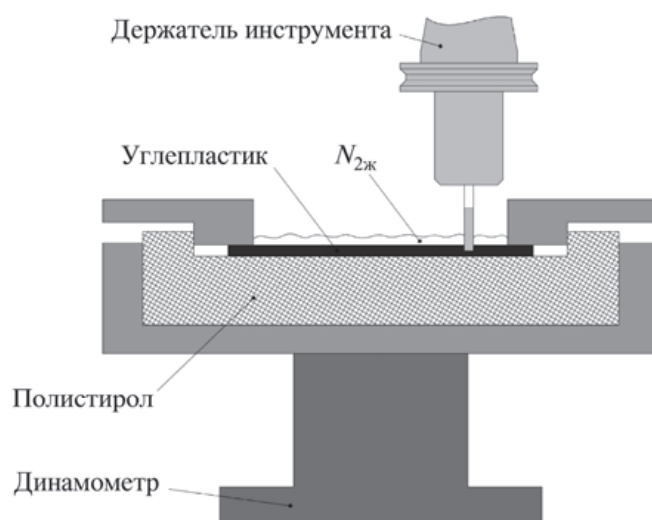


Рис. 4. Опыт по фрезерованию в криогенной среде

Результаты испытания на разрыв показали, что криогенная термообработка положительно повлияла на свойства углепластика при растяжении: прочность на разрыв и модуль упругости углепластиков, обработанных в криогенных условиях, была соответственно выше примерно на 3,65 и 3,04 %, по сравнению с не обработанными, но при этом увеличились и результирующие силы резания.

Поскольку криогенное охлаждение сделало структуру заготовки хрупкой и предотвратило термические повреждения на обрабатываемой поверхности, была улучшена ломкость стружки, что позволяло получать более гладкие поверхности. Так же благодаря лучшей ломкости стружки и меньшим усилиям в осевом направлении уменьшился дефект расслоения. При обработке с криогенным охлаждением количество повреждений в целом было меньше, чем при сухой обработке.

Наиболее низкие результирующие силы резания, расслоение и шероховатость поверхности были достигнуты при использовании комбинации более низких значений подачи и более высоких значений скорости вращения шпинделя.

В другом исследовании [10] авторы предложили объединить фрезерование с лазерной обработкой в целях уменьшения отрицательного воздействия каждого процесса: расслоения и образования зоны термического воздействия.

В начале эксперимента в верхнем слое углепластика с помощью лазера получали канавку. Из-за ее небольшой глубины термическое воздействие лазера уменьшалось, что сократило размеры *зоны термического влияния (ЗТВ)* до незначительных значений. При последующем фрезеровании канавка предотвращала появление и распространение расслоения.

Результаты эксперимента показали, что величина ЗТВ значительно уменьшалась, по сравнению с традиционной лазерной обработкой. Расположена ЗТВ была на небольшой области возле верхней кромки канавки. Так же предварительная обработка лазером значительно уменьшала расслоение, вплоть до полного ее устранения. Минимальная глубина, при которой расслоение начинало уменьшаться – 250 мкм, что соответствовало толщине слоя, поэтому для снижения ЗТВ достаточно использовать лазер малой мощности.

Нетрадиционный метод лазерной обработки углепластиков

Альтернативным методом обработки углепластиков является лазерная резка. В отличие от традиционных способов резки, он характеризуется отсутствием сил резания, возможностью получения

канавок небольшой ширины, высокой скоростью резки. Помимо этого, в процессе обработки материал не расслаивается, а инструмент не изнашивается. Однако существенным недостатком при резке углепластиков лазером является обугливание и горение полимера, т.е. образование ЗТВ вследствие различных значений температур испарения наполнителя и матрицы.

В работе [11] в целях охлаждения заготовки и ограничения расширения ЗТВ авторы предложили проводить лазерную обработку под тонким слоем воды. В данном исследовании сравнивалась резка углепластиковой заготовки в стоячей, текущей воде и без нее (рис. 5).

В первом случае заготовку полностью погружали в воду, выдерживая постоянной толщину слоя в 2 мм над поверхностью заготовки. Во втором случае поток воды двигался со скоростью 100 см³/мин, поэтому толщина водяного слоя составляла 0,64 мм.

Результаты эксперимента показали, что наибольшая толщина канавки и ЗТВ были получены при обработке в условиях окружающего воздуха. Вследствие сильного термического воздействия происходило существенное плавление и испарение материала, по этой причине увеличиваются ЗТВ и ширина канавки. При резке в неподвижной воде толстый слой жидкости и пузырьки газа поглощали значительную часть излучения лазера до того, как он достигал поверхности заготовки, поэтому количество поглощенной теплоты и удаляемого материала заготовки уменьшилось (ЗТВ и размеры пропила в этом случае были наименьшими). Кроме того, было обнаружено, что часть материала была не до конца удалена, что приводило к неоднородности пропила.

При сравнении канавок и ЗТВ оказалось, что после лазерной абляции в текущей воде их размеры больше, чем после обработки в неподвижной воде.

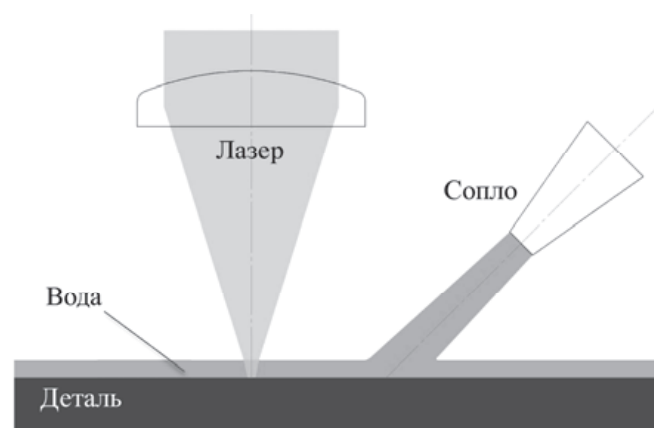


Рис. 5. Схема лазерной обработки в воде

Это можно объяснить, во-первых, уносом пузырьков газа и частиц материала из зоны резки потоком воды и более тонким слоем, который поглощает меньше лазерного излучения. И, во-вторых, механическим воздействием движущегося потока на рабочую поверхность заготовки вдобавок к ударному давлению, вызванному плазмообразованием и лопнувшими кавитационными пузырьками. Это приводило к отрыву расплавленных или размягченных фрагментов матрицы и углеволокна и, следовательно, к увеличению ширины пропила. Однако обработка в потоке воды не превосходила обработку в окружающем воздухе по скорости съема материала. К тому же, геометрия канавки, полученной в условиях потока воды, незначительно отличалась от геометрии канавки после резки в окружающем воздухе, при этом ЗТВ после обработки в текущей воде была меньше на 20 %.

Метод многопроходной гидроабразивной резки углепластиков

Еще одним нестандартным видом резки углепластиков является гидроабразивная резка. Этот метод представляет собой эффективный способ обработки углепластиков, при котором исключается возможность появления термических повреждений, отсутствуют износ инструмента и воздействие больших сил резания. Однако качество пропила – основная проблема при данном методе обработки. Улучшить качество канавки можно с помощью увеличения давления струи и концентрации абразивов, а также уменьшения скорости резания, но при этом сокращается производительность обработки. Более того, при неправильном подборе перечисленных параметров процесса резания возможно появление расслоения. Поэтому авторы статьи [12] предложили метод многопроходной резки в целях улучшения качества пропила без потерь производительности. В данном исследовании сравнивалась многопроходная резка с изменяемыми параметрами между разными проходами с резкой при постоянных параметрах.

По результатам проведенных экспериментов выяснилось, что конусность пропила заметно уменьшается при многопроходной резке с изменяемыми параметрами, особенно, при увеличении давления при резке во втором проходе. Наибольшее полученное уменьшение конусности составило около 53 % без потери производительности.

Так же многопроходная резка уменьшает не только конусность, но и повышает производительность. Правильный подбор скоростей резания для каждого прохода может повысить производительность почти на 13 % при практически такой же конусности. Для еще большего уменьшения конусности пропила в первом проходе скорость резания должна быть относительно низкой и высокой, при резании во втором проходе.

Качество поверхности при резке с изменяемыми параметрами, как правило, хуже, чем при постоянных параметрах, если только значительно не увеличивать давление при резании во втором проходе с относительно низкой или той же скоростью перемещения (1300 мм/мин), что и при резании на первом проходе.

Таким образом исследователями был сделан вывод, что многопроходное резание можно использовать для дальнейшего улучшения качества резки углепластика, в котором свойства материала, включая прочность и жесткость, достаточны для предотвращения расслоения. Кроме того, производительность также может быть повышена в результате выбора соответствующей скорости перемещения на разных проходах. Причем, с увеличением длины резания заметно повышается и производительность при многопроходной резке с изменяемыми параметрами, по сравнению с обработкой с постоянными параметрами.

Метод сухой абразивной обработки углепластиков

Не менее важным видом обработки углепластиков является сухая абразивная резка. По сравнению с другими методами обработки она имеет ряд преимуществ: относительно низкие силы резания, отсутствие износа инструмента, значительное снижение термического воздействия.

В статье [13] в целях повышения эффективности сухой абразивной резки исследована возможность придания абразивным частицам закрученного движения при использовании нестандартных форсунок. Для эксперимента при использовании абразивно-струйного станка были изготовлены две форсунки новой формы, в одной из которых была нарезана резьба для придания абразивам вихревого движения (рис. 6). В результате эксперимента обнаружено, что это нововведение значительно сокращает время обработки и, как следствие, увеличивает скорость обработки материала.

Установлено, что при получении отверстий с помощью форсунок с резьбой штучное время сокращается до 0,3 с. Данный результат достигнут при следующих значениях параметров обработки: диаметр выходного сечения сопла 2,5 мм, зазор между материалом и форсункой – 1,5 мм, давление 600 кПа (6 бар), размеры абразива 90 мкм. При таких же параметрах обработки с применением форсунки без резьбы штучное время составляет 4 с.

Так же возрастает и производительность съема материала. Максимальная производительность была достигнута с применением форсунки с нарезанной резьбой и составила 1,422 г/с при представленных выше параметрах обработки. Объяснить это можно увеличением кинетической энергии абразивных частиц благодаря приданию им вращающего движения по направлению резьб, вследствие чего увеличивается сила, с которой струя воздействует на заготовку. Максимальная производительность при использовании форсунки без резьбы составила 0,1 г/с.

Что касается геометрии отверстий, использование форсунки с внутренней резьбой расширило границы получаемых диаметров на входе и выходе отверстия: 2,95...6,039 мм – на входе, 1,34...4,776 мм – на выходе из отверстия. Для сравнения, значения получаемых диаметров при обработке с форсункой без резьбы были следующими: 3,377...5,966 мм – на входе; 1,805...4,27 мм – на выходе. Так же форсунка с резьбой позволила получить угол пропила $0,1^\circ$, с форсункой без резьбы угол составил $0,9^\circ$.

Высокоскоростное резание углепластиков

Один из перспективных способов обработки композитов из углепластика – высокоскоростное резание при низкой температуре (примерно -20°C). Данный метод может успешно прийти на смену высокоскоростному «сухому» резанию, при котором по достижении определенной скорости резания эпоксидная матрица начинает плавиться из-за трения между инструментом и образцом.

В настоящее время высокоскоростная резка обладает следующими достоинствами: низкой сте-

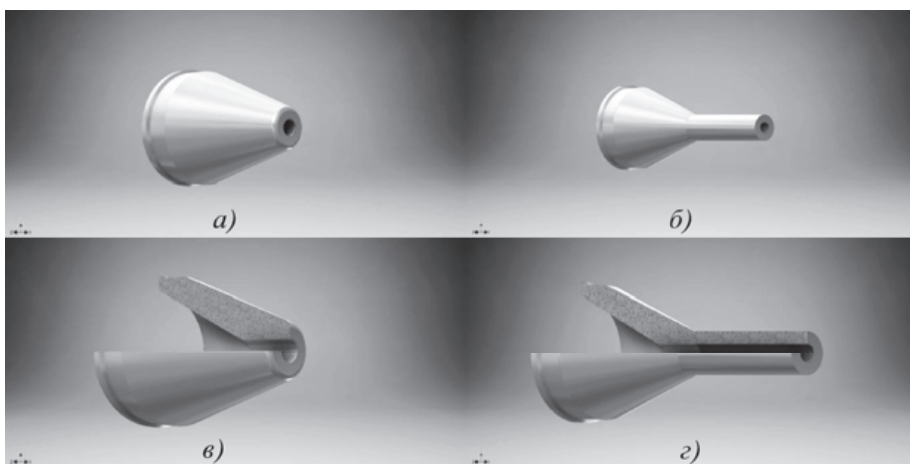


Рис. 6. Модели используемых насадок:

а, б – стандартные; *в, з* – новые

пенью изгиба режущего инструмента за счет уменьшения силы резания; плавным отводом стружки, при котором скорость отвода стружки превышает скорость резания и уменьшением заусенцев при неразрезанных волокнах. Однако существует проблема быстрого износа инструмента из-за высоких температур резания.

В работе [14] сравнивали высокоскоростную обработку при сухих условиях обработки и низкой температуре. Авторами исследовалась температура во время резки и характеристики обработанных поверхностей заготовок.

Так же авторы провели сравнение двух видов фрез, работающих при низких скоростях: фрезы для композитов и концевой фрезы с четырьмя канавками. Заусенцы наблюдались при использовании концевой фрезы. В случае фрезы для композитов, заусенцев в верхнем слое образца не наблюдалось, хотя поверхность образца была более шероховатой, по сравнению с поверхностью после обработки с помощью концевой фрезы. Это можно объяснить тем, что режущая кромка у фрезы для композитов имеет решетчатую форму, что дает стружку в виде порошка, поэтому поверхность материала становилась шероховатой, но при этом заусенцы в верхнем слое образца отсутствовали.

Результаты экспериментов показали, что порошкообразная стружка при «сухих» условиях образуется при частоте вращения $20\,000\text{ мин}^{-1}$. По мере увеличения частоты вращения с $40\,000$ до $80\,000\text{ мин}^{-1}$, температура от сил трения между режущим инструментом и углепластиком повышалась. По этой причине происходило плавление матрицы, из-за чего стружка превращалась из порошка в сколы.

Хотя первоначально сила резания уменьшалась, при частоте вращения выше $40\,000\text{ мин}^{-1}$, она оставалась постоянной. Это может быть связано с плавлением матрицы, что привело к снижению прочности композиционного материала. На обработанной поверхности наблюдалось образование участков с почернением из-за высокой температуры резания. При $40\,000\text{ мин}^{-1}$ температура заготовки составляла $\sim 125\text{ }^{\circ}\text{C}$, тогда как при $60\,000$ и $80\,000\text{ мин}^{-1}$ температура образца составляла соответственно ~ 170 и $\sim 250\text{ }^{\circ}\text{C}$. Почернение происходило, когда температура резания была выше температуры затвердевания термореактивной смолы ($125\text{ }^{\circ}\text{C}$), которая использовалась в виде связующего при формировании углепластика.

Для проведения низкотемпературной обработки использовались вихревая трубка, через которую подавался холодный воздух при температуре $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$, и теплообменник, в котором сухой лед использовался в качестве хладагента.

При низкотемпературной резке сила резания уменьшалась по мере увеличения скорости резания. Это может быть связано с тем, что сопротивление резанию было уменьшено благодаря однородному потоку стружки углепластика при увеличении скорости резания. Так же уменьшились температура при обработке, количество заусенцев и ворсистость по сравнению с «сухими» условиями. Причем, с увеличением скорости резания в верхнем и нижнем слоях композиционного материала образуется меньше заусенцев, а на конце образца уменьшается ворсистость. Так же была проведена обработка при $20\,000\text{ мин}^{-1}$ с использованием инструмента с алмазным напылением, в результате были удалены заусенцы и ворсистость, таким образом улучшилось качество поверхности.

Выводы

Особенностью композитов является совмещение технологического процесса получения материала с технологическим процессом изготовления готового изделия. Прогрессивные методы, такие как намотка, прессование, литье, экструзия и т.д., позволяют получать изделия из композитов относительно высокой точности и качества поверхности. Однако всегда остается весьма существенный объем механической обработки. Для получения окончательной формы и размеров готовых изделий необходимо применять почти все существующие виды механической обработки.

Механическая обработка необходима для достижения требуемой точности и качества поверхно-

сти, что особенно важно для авиационной, ракетно-космической техники, поскольку они играют исключительно важную роль в обеспечении высоких эксплуатационных показателей изделий, а также для получения сложных конфигураций изделий. Для достижения данной цели могут быть эффективно использованы нетрадиционные методы обработки.

К настоящему времени предложено немало нестандартных методов традиционной МО в целях уменьшения дефектов, возникающих при МО, таких как: расслоение, разлохмачивание и образование заусенцев и др. Предлагаемые методы помогают не только сократить число дефектов, но и получить большую производительность, повысить качество обрабатываемой поверхности, выдержать точность получаемых размеров, а также уменьшить износ режущего инструмента.

Библиографический список

1. **Технология** производства и диагностика качества композитных конструкций ракетно-космической техники. Создание конструкций из волокнистых композитных материалов: учеб. пособие / М. А. Комков, С. В. Бочкарев, А. Л. Галиновский и др. Старый Оскол, 2020. 344 с.
2. **Ярославцев В. М.** Обработка резанием полимерных композиционных материалов: учеб. пособие. М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2012. 180 с.
3. **Shokrani A., Leafe H., Newman S. T.** Cryogenic Drilling of Carbon Fiber Reinforced Plastic with Tool Consideration // *Procedia CIRP*. 2019. V. 85. P. 55 – 60.
4. **Delamination Analysis of Carbon Fiber Reinforced Laminates: Evaluation of a Special Step Drill** / A. T. Marques, L. M. Durão, A. G. Magalhães et al. // *Composites Science and Technology*. 2009. V. 69, Is. 14. P. 2376 – 2382.
5. **Nagaraj A., Uysal A., Jawahira I. S.** An Investigation of Process Performance when Drilling Carbon Fiber Reinforced Polymer (CFRP) Composite under Dry, Cryogenic and MQL Environments // *Procedia Manufacturing*. 2020. V. 43. P. 551 – 558.
6. **John K. M., Thirumalai Kumaran S.** A Feasible Strategy to Produce Quality Holes Using Temperature-assisted Drilling on CFRP // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2020. V. 110. P. 3113 – 3127.
7. **Harugade M., Waigaonkar S., Maneb N.** Machining of Carbon Epoxy Composite using High Speed Electrochemical Discharge Machining // *Materials Today: Proceedings*. 2018. V. 5, Is. 9, Part 1. P. 17188 – 17194.
8. **Zemann R., Kain L., Bleicher F.** Vibration Assisted Machining of Carbon Fibre Reinforced Polymers // *Procedia Engineering*. 2014. V. 69. P. 536 – 543.
9. **Cryogenic Machining of Carbon Fiber Reinforced Plastic (CFRP) Composites and the Effects of Cryogenic**

Treatment on Tensile Properties: A Comparative Study / S. Morkavuk, U. Köklü, M. Bağcı et al. // *Composites Part B: Engineering*. 2018. V. 147. P. 1 – 11.

10. **Laser** Scored Machining of Fiber Reinforced Plastics to Prevent Delamination / W. Hintze, M. Cordesa, T. Geis et al. // *Procedia Manufacturing*. 2016. V. 6. P. 1 – 8.

11. **Tangwarodomnukun V., Khamwiset K., Q H.** Investigation into Laser Machining of Carbon Fiber Reinforced Plastic in a Flowing Water Layer // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2019. V. 104. P. 3629 – 3645.

12. **A Study** of Abrasive Waterjet Multi-pass Cutting on Kerf Quality of Carbon Fiber-reinforced Plastics / S. Xiao, P. Wang, H. Gao et al. // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2019. V. 105. P. 4527 – 4537.

13. **Madhu S., Balasubramanian M.** Effect of Swirling Abrasives Induced by a Novel Threaded Nozzle in Machining of CFRP Composites // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2018. V. 95 P. 4175 – 4189.

14. **Influence** of Cutting Temperature on Carbon Fiber-reinforced Plastic Composites in High-speed Machining Ha / S. J., Kim K. B., Yang J. K. et al. // *Journal of Mechanical Science and Technology*. 2017. V. 31. P. 1861– 1867.

References

1. Komkov M. A., Bochkarev S. V., Galinovskiy A. L. et al. (2020). *Manufacturing technology and quality diagnostics of composite structures for rocket and space technology. Creating Fiber Composite Structures: a textbook*. Stariy Oskol. [in Russian language]

2. Yaroslavtsev V. M. (2012). *Processing by cutting polymer composite materials: a textbook*. Moscow: Izdatel'stvo MGTU im. N. E. Bauman. [in Russian language]

3. Shokrani A., Leafe H., Newman S. T. (2019). Cryogenic Drilling of Carbon Fiber Reinforced Plastic with Tool Consideration. *Procedia CIRP*, Vol. 85, pp. 55 – 60.

4. Marques A. T., Durão L. M., Magalhães A. G. et al. (2009). Delamination Analysis of Carbon Fiber Reinforced Laminates: Evaluation of a Special Step Drill. *Composites Science and Technology*, Vol. 69, 14, pp. 2376 – 2382.

5. Nagaraj A., Uysal A., Jawahira I. S. (2020). An Investigation of Process Performance when Drilling Carbon Fiber Reinforced Polymer (CFRP) Composite under Dry, Cryogenic and MQL Environments. *Procedia Manufacturing*, Vol. 43, pp. 551 – 558.

6. John K. M., Thirumalai Kumaran S. (2020). A Feasible Strategy to Produce Quality Holes Using Temperature-assisted Drilling on CFRP. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 110, pp. 3113 – 3127.

7. Harugade M., Waigaonkar S., Maneb N. (2018). Machining of Carbon Epoxy Composite using High Speed Electrochemical Discharge Machining. *Materials Today: Proceedings*, Vol. 5, (9), Part 1, pp. 17188 – 17194.

8. Zemann R., Kain L., Bleicher F. (2014). Vibration Assisted Machining of Carbon Fibre Reinforced Polymers. *Procedia Engineering*, Vol. 69, pp. 536 – 543.

9. Morkavuk S., Köklü U., Bağcı M. et al. (2018). Cryogenic Machining of Carbon Fiber Reinforced Plastic (CFRP) Composites and the Effects of Cryogenic Treatment on Tensile Properties: A Comparative Study. *Composites Part B: Engineering*, Vol. 147, pp. 1 – 11.

10. Hintze W., Cordesa M., Geis T. et al. (2016). Laser Scored Machining of Fiber Reinforced Plastics to Prevent Delamination. *Procedia Manufacturing*, Vol. 6, pp. 1 – 8.

11. Tangwarodomnukun V., Khamwiset K., Q H. (2019). Investigation into Laser Machining of Carbon Fiber Reinforced Plastic in a Flowing Water Layer. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 104, pp. 3629 – 3645.

12. Xiao S., Wang P., Gao H. et al. (2019). A Study of Abrasive Waterjet Multipass Cutting on Kerf Quality of Carbon Fiber-reinforced Plastics. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 105, pp. 4527 – 4537.

13. Madhu S., Balasubramanian M. (2018). Effect of Swirling Abrasives Induced by a Novel Threaded Nozzle in Machining of CFRP Composites. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 95, pp. 4175 – 4189.

14. Ha S. J., Kim K. B., Yang J. K. et al. (2017). Influence of Cutting Temperature on Carbon Fiber-reinforced Plastic Composites in High-speed Machining. *Journal of Mechanical Science and Technology*, Vol. 31, pp. 1861– 1867.

Запись для цитирования статьи:

Галиновский А. Л., Цзя Чженьюань, Цыпышева С. Н., Терновских К. А., Рябенкова С. А., Ерохин С. А. Новые методы и технологии обработки углепластиков // Справочник. Инженерный журнал с приложением. 2021. № 8. С. 10 – 19. DOI 10.14489/hb.2021.08.pp.010-019

Galinovskiy A. L., Tszya Chzhen'yuan', Tsypysheva S. N., Ternovskih K. A., Ryabenkova S. A., Erokhin S. A. (2021). New Methods and Technologies for Processing Carbon Fiber-Reinforced Plastics. *Spravochnik. Inzhenerniy zhurnal s prilozheniem*, (8), pp. 10 – 19. [in Russian language] DOI 10.14489/hb.2021.08.pp.010-019