

DOI: 10.34220/2311-8873-2026-13-24



УДК 621.373.8

UDC 621.373.8

2.5.5 – технология и оборудование механической и физико-технической обработки

КОМПЛЕКСНОЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДОВ ЛАЗЕРНОЙ РЕЗКИ МНОГОСЛОЙНЫХ УГЛЕПЛАСТИКОВЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ ПАНЕЛЕЙ

COMPREHENSIVE EXPERIMENTAL STUDY OF LASER CUTTING METHODS FOR MULTILAYER CARBON FIBER COMPOSITE PANELS

Романов Александр Анатольевич, к.т.н., преподаватель кафедры восстановления авиационной техники ВУНЦ ВВС «ВВА», г. Воронеж.

Romanov Alexander Anatolyevich, candidate of technical sciences, teacher at the Air Force Engineering and Aviation Support management department the Air Force «Air Force Academy named after Professor N.E. Zhukovsky and Yu.A. Gagarin», Voronezh.

✉¹ **Трифонов Григорий Игоревич**, к.т.н., заместитель начальника отдела научно-исследовательского ВУНЦ ВВС «ВВА», г. Воронеж, e-mail: i@gtrifonov.ru

✉¹ **Trifonov Grigory Igorevich**, candidate of technical sciences, deputy head of the research department of the Air Force «Air Force Academy named after Professor N.E. Zhukovsky and Yu.A. Gagarin», Voronezh, e-mail: i@gtrifonov.ru

Аннотация. В рамках исследования методов лазерной резки многослойных углепластиковых композитных панелей были проведены эксперименты, целью которых являлась последующая оценка влияния скорости резки, числа проходов, расстояния от лазерной головки до поверхности материала, диаметра сопла, наличия двойной апертуры в сопле и предварительно нанесенной траншеи на качество линейных разрезов. В результате проведенного исследования было установлено, что лазерная резка углепластика, включая траншейную технологию и использование сопла с двойной апертурой, предоставляет возможности для применения волоконного лазера в качестве альтернативы механической резке в процессах восстановления и ремонта деталей, изготовленных из полимерных композитных материалов.

Annotation. As part of the study of laser cutting methods for multilayer carbon fiber composite panels, experiments were conducted to further evaluate the effect of cutting speed, number of passes, distance from the laser head to the surface of the material, nozzle diameter, the presence of a double aperture in the nozzle and a pre-applied trench on the quality of linear cuts. As a result of the research, it was found that laser cutting of carbon fiber, including trench technology and the use of a double-aperture nozzle, provides opportunities for the use of a fiber laser as an alternative to mechanical cutting in the restoration and repair of parts made of polymer composite materials.

Ключевые слова: УГЛЕРОДНОЕ ВОЛОКНО, ПОЛИМЕРНЫЕ КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ, ПОВРЕЖДЕНИЕ ВОЛОКНА, ЛАЗЕРНАЯ РЕЗКА, ОПТИМИЗАЦИЯ, ВОЛОКОННЫЙ ЛАЗЕР, ВОССТАНОВЛЕНИЕ.

Keywords: CARBON FIBER, POLYMER COMPOSITE, FIBER DAMAGE, LASER CUTTING, OPTIMIZATION, FIBER LASER, RESTORATION.

¹ Автор для ведения переписки

1 Состояние вопроса исследования и актуальность работы

В современном авиастроении, благодаря своим механическим свойствам, углепластик стал заменой существующим материалам. Согласно научным исследованиям [1, 2], углепластик обладает следующими эксплуатационными свойствами: малым весом, высокой прочностью, твердостью, устойчивостью к разрушению и низким тепловым расширением. Отметим, что применение углепластика в авиационной отрасли привело к значительному снижению массы конструкций летательных аппаратов, а следовательно, и расхода топлива.

Было установлено, что замена металлических элементов на композитные материалы может обеспечить сокращение общего веса на 30-40 % и затрат на 30-50 % [1-4]. Следовательно, разработка методов и средств обработки (резки) панелей из углепластика является актуальной задачей.

Для использования углепластика в авиационной промышленности необходимо использовать соответствующую технологию обработки. Из-за неоднородной структуры полимерных композиционных материалов (ПКМ) обычная механическая обработка, например, сверление, фрезерование, распиливание и абразивная водоструйная резка, имеет существенные недостатки, такие как расслоение волокон, вырывание материала, внутренние трещины, износ инструмента, поглощение влаги, а это приводит к ухудшению механических свойств изделия, поскольку увлажненные полимеры становятся мягче и ухудшают адгезию волокон с матрицей эпоксидной смолы [5, 6].

Зачастую для резки углепластика используются два метода: электроэрозионная обработка и проволочная электроэрозионная обработка [7, 8]. Оба метода позволяют вырезать небольшие и сложные формы с высокой точностью и гладкой поверхностью. При этом отмечается, что важно учитывать, как движется инструмент и в каком направлении расположены волокна материала, чтобы точно удалить лишний материал. Высокая плотность тока, используемая в процессах электроэрозионной и проволочной электроэрозионной обработки, может вызывать плавление полимера на поверхности разреза, увеличивая степень негативного влияния на поверхность разреза, тем самым удлиняя протяженность зоны термического воздействия (ЗТВ) на поверхности реза. Чтобы уменьшить непропорциональное плавление поверхности среза требуется низкая сила тока, но при малых значениях силы тока скорость удаления материала составляет 2-5 мм³/мин [9].

В работе [9] авторы предложили альтернативу традиционным процессам обработки изделий из ПКМ, а именно лазерную резку, которая не требует механических усилий и износа инструмента. Благодаря малому размеру пятна луча можно вырезать сложные формы.

Помимо длины волны, лазер характеризуется другими параметрами, включая непрерывное и импульсное излучение. Это два разных типа источников лазерного излучения, которые могут использоваться для лазерной резки. Небольшие размеры ЗТВ могут быть достигнуты с помощью импульсного лазерного излучения благодаря очень малому времени воздействия на обрабатываемую поверхность за один импульс и времени охлаждения материала между импульсами [10, 11]. Однако скорость обработки с помощью импульсного лазерного излучения из-за низкого значения средней мощности, доступной на сегодняшний день, ниже, чем у непрерывного лазера [12]. В исследованиях, моделирующих процесс резки углепластика

с помощью одномерного термического анализа [13-16], определено, что максимальная скорость резки зависит от средней мощности лазерного излучения. Степень повреждения матрицы прямо коррелирует с временной интенсивностью лазерного излучения, которая может быть увеличена посредством повышения средней мощности лазера. Это достигается либо путем модуляции лазерной энергии в виде нескольких коротких импульсов, либо посредством оптического уменьшения размера фокального пятна. В результате глубина лазерной обработки снижается. Важно отметить, что при уменьшении пиковой мощности лазерного излучения вследствие сокращения длительности импульса, средняя мощность и энергия, выделяемая на один импульс, также уменьшаются.

В работе [14] использовали импульсный твердотельный лазер, в качестве активной среды которого используется кристалл алюмо-иттриевого граната ($Y_3Al_5O_{12}$), легированный ионами неодима (Nd^{3+}) (Yttrium Aluminum Garnet, (YAG)). Данный лазер может работать в импульсном режиме с длительностью импульса от 0,5 мс до 50 мс. Также использовали дисковый лазер в непрерывном режиме излучения и в квазинепрерывном режиме CO_2 лазер для исследования качества резки. Было определено, что наименьшая ЗТВ была получена при использовании YAG: Nd-лазера.

В работе [14] авторы провели экспериментальное исследование влияния параметров обработки на ширину реза. ЗТВ и область резания с использованием YAG: Yb-лазера. Сделан вывод, что скорость резки, ширина реза и зона термического воздействия зависят от энергии импульса, которая представляет собой энергию, выделяемую на единицу площади и от охлаждающего эффекта. Также определено, что при многопроходном методе уменьшается и улучшается геометрия ЗТВ и реза, и скорость прохода и направление волокон влияют на ширину реза и величину ЗТВ.

В работе [17] использовали волоконный лазер непрерывного действия для изучения качества резки и полученной поверхности реза с использованием многопроходного и однопроходного методов резки. Сделан вывод, что микротрещины, расслоения, отверстия и нависающие волокна являются основными дефектами, обнаруживаемыми во время лазерной резки углепластика.

Авторами данной работы проводились эксперименты по лазерной резке, в ходе которых исследовалось влияние скорости резки, количества проходов, расстояния от сопла до поверхности разреза, диаметра сопла, наличия сопла двойной апертуры (двойного отверстия) и предварительного нанесения траншеи на степень повреждения волокна, для уменьшения степени повреждения волокна до 100 мкм и скорости резки более 2,5 м/мин. При использовании метода нанесения траншеи и использовании сопла двойной апертуры, которая не исследована в литературе, была достигнута ЗТВ 50 мкм и скорость резания 7,5 м/мин. Качество резки анализировали с помощью сканирующего электронного микроскопа и оптического микроскопа.

При лазерной резке расплавленный материал удаляется с помощью вспомогательного газа, при этом образуется пропилен на определенную глубину. Пропил образуется при более низких плотностях лазерного луча, около $102-103 \text{ Вт/см}^2$ в композитных материалах и 106 Вт/см^2 – в металлах. Металлы достигают расплавленного состояния, а затем испаряются или подвергаются сдвигу. Полимерная матрица в композите в некоторой степени ведет себя аналогичным образом. Она также может разрушаться под воздействием облучения и плазмы. Углеродные волокна могут потребовать более высокой плотности лазерного луча, чем металлы. На кромке прореза процесс разрушения материала вызван сдвигом расплава с использованием реактивного газа, химической деградацией и преобразованием [18]. При перемещении режущей головки образуется тонкий слой нагара из-за плавления и охлаждения материала, который повреждает обрабатываемую поверхность и снижает качество реза. Поэтому для минимизации повреждения волокон и образования нагара необходима оптимизация параметров резки.

2 Материалы и методы

Исследуемый тип углепластика – углерод с модулем упругости 12 кПа. В экспериментах использовались квадратные пластины из углепластика размером 100×100 мм и толщиной 2 мм, состоящие из восьми тонких слоёв ткани из углепластика.

Схема расположения ткани подробно представлена в табл. 1. В качестве матрицы в материале использована эпоксидная смола средней вязкости, состоящая из трёх компонентов: смолы, аминного отвердителя и добавки.

Измерения, используемые для оценки качества лазерной резки:

1. Глубина повреждения волокна.
2. Глубина удаления эпоксидной смолы.
3. Верхнее расслоение.
4. Нижнее расслоение.

Таблица 1 – Схема расположения ткани из углепластика в пластине толщиной 2 мм

Номер слоя	Плотность слоя (г/м ²)
1	150
2	148
3	148
4	150
5	150
6	148
7	148
8	150

Первоначальные испытания проводились с использованием волоконного лазера мощностью 2 кВт. Всего было проведено 84 серии испытаний (по 12 для каждого метода). Результаты предварительных испытаний показали, что скорость резки была очень низкой (0,05 м/мин), однако степень повреждения волокна оказалась менее 100 мкм.

В процессе исследований использовался лазерный станок, содержащий двухкоординатный XY-стол. Станок оснащен защитным окном для наблюдения за лазером, как показано на рис. 1.

Оптическое волокно было присоединено к параллельной и перефокусирующей оптической системе с коэффициентом размытия 1:1 с линзой, регулируемой по высоте и имеющей фокусное расстояние 200 мм. Использовалось сменное сопло с различными апертурами, а технологический газ-аргон подавался сонаправлено с пучком. В ходе экспериментов использовались сопла с одинарным и двойным отверстием. Сопло с двойной апертурой (двойным отверстием) использовалось для более точной корректировки направления газовой струи с целью получения более глубоких разрезов.

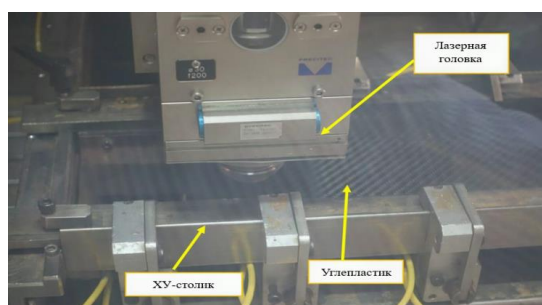


Рисунок 1 – Фокусирующая оптическая лазерная система, размещенная над образцом

Для микроскопического анализа использовались окуляр с 10-кратным увеличением и градуировочной сеткой 100 мкм, микроскоп с 60-100-кратным увеличением и градуировочной сеткой 10 мкм, и USB-микроскоп с 50-кратным увеличением и градуировочной сеткой 50 мкм. Автоэмиссионный анализ проводили с помощью сканирующего электронного микроскопа. Для тепловизионной съемки процесса использовали цифровую тепловизионную камеру Flir с разрешением 320×240 пикселей и температурной чувствительностью 0,1 °С с ручной фокусировкой.

Эксперименты проводились при следующих параметрах: мощность лазера – 1500 Вт, давление газа и расход газа поддерживались постоянными на уровне 16 бар и 126 л/мин. Более детальные параметры экспериментов представлены в табл. 2.

Таблица 2 – Экспериментальные условия проводимых исследований

	Количество испытаний	Отступ, мм	Зазор сопла, мм	Линейная скорость прохода, м/мин	Диаметр сопла, мм	Количество проходов
Многопроходная техника	12	0	1,0	5–10	1,0	2–3
Изменение расстояния от сопла до объекта	12	1–2	1,0	2,5	1,0	1–3
Изменение диаметра сопла	12	1,3	1,0	2,5–12	1,0; 2,0	1–3
Применение канавки	12	1,3	1,0	7,5–15	1–2	1
Применение канавки с двойным проемом	12	1,3	1,0	7,5	2,0; 1,5	1
Использование двойной апертуры сопла	12	1,3	1,0	2,5–10	2,0; 1,5	1–3

Так как температура испарения углеволокна выше, чем у смолы, то резка углепластика занимает больше времени, и это приводит к повреждению волокон. В углепластике волокно имеет высокий коэффициент теплопроводности и проводит тепло быстрее, чем матрица эпоксидной смолы, и это приводит к обширному повреждению волокон.

При многопроходном методе резки материал испаряется лазерным лучом на определённую глубину за один проход. Процесс повторяется до тех пор, пока материал не будет прорезан на всю толщину. При многопроходной технологии снижается риск повреждения волокна, поскольку время между проходами позволяет материалу рассеивать тепло.

Расстояние от сопла до объекта также имеет решающее значение [19, 20]. Оно обеспечивает необходимую плотность энергии на поверхности материала. Расстояние также влияет на структуру потока газа, что напрямую влияет на производительность и качество резки. Сопло подает газ к передней части реза, обеспечивая его соосность с лазерным лучом и стабилизируя давление на образец. Двойное отверстие имеет внешний диаметр 2,0 мм и внутренний диаметр 1,5 мм.

Прокладка траншей осуществляется лазером, путём проведения трёх параллельных линий, расположенных рядом друг с другом. Цель – создание канавки или траншеи, ширина которой превышает ширину канала, проложенного одним лучом. После определения ширины траншеи, ее центр располагается по одной из сторон на верхней поверхности траншеи. После того, как зазор был расширен за два прохода вдоль одной из сторон полученной траншеи, лазерный луч проходит третий раз через центр траншеи. Этот подход обеспечивает лучший доступ к более глубоким слоям материала без воздействия лазера на края углепластика, как показано на рис. 2.

3 Результаты исследований

Были проведены эксперименты для изучения влияния скорости резки на качество полученного прореза. Сводка усреднённых результатов измеренных параметров представлена в табл. 3 при мощности лазера 1,5 кВт, числе проходов 1, диаметре сопла 1,0 мм и давлении вспомогательного газа 16 бар. При таких условиях удалось полностью разрезать углепластик.

Авторами было отмечено, что с увеличением скорости резки повреждение волокон уменьшалось, но увеличивался объем удаленной эпоксидной смолы и отслоение верхнего слоя.

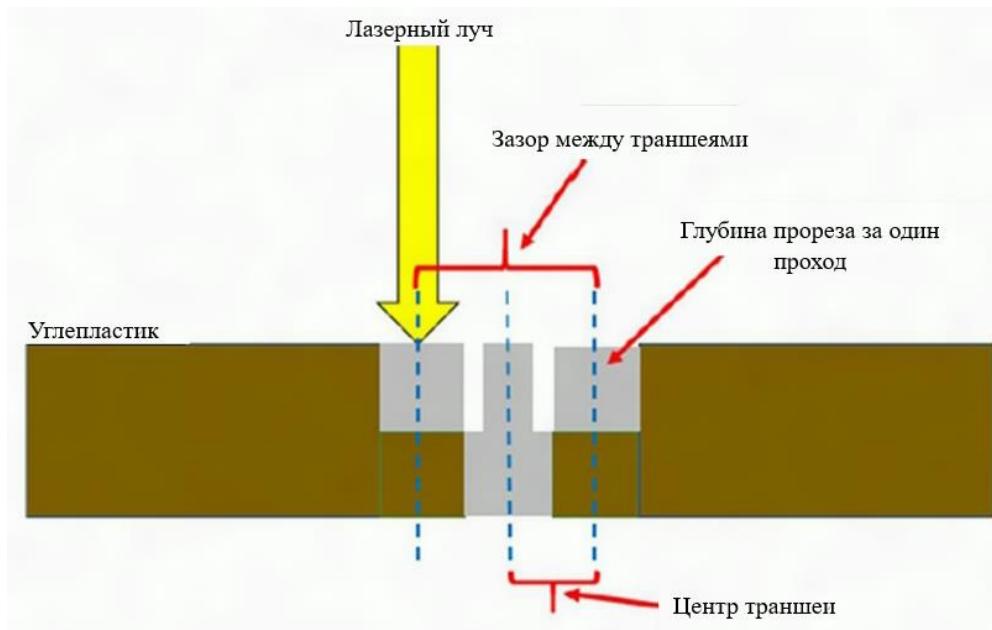


Рисунок 2 – Положение линий реза траншеи относительно центра прореза/траншеи

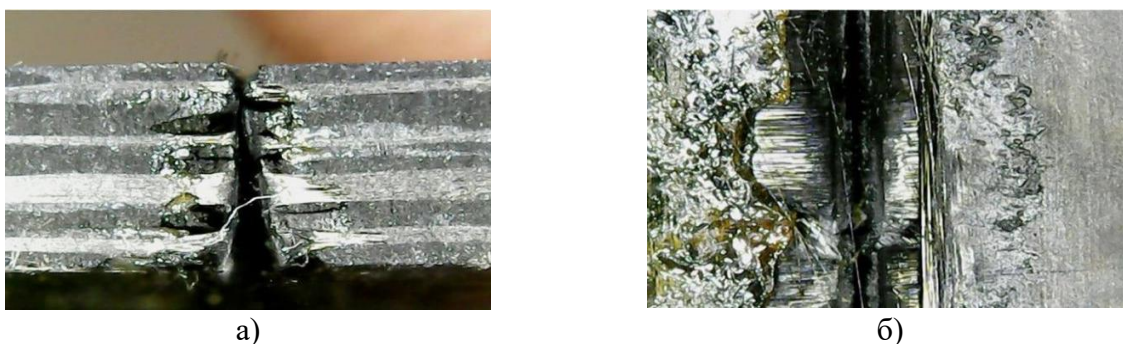
Таблица 3 – Сводка усредненных измеренных параметров

	Скорость резки, м/мин	Степень повреждения волокна, мкм	Степень удаления эпоксидной смолы, мм	Расслоение верхнего слоя, мкм	Расслоение нижнего слоя, мкм	Количество тестов
Многопроходная техника	3,3	89	400	128	60	12
Изменение расстояния от сопла до объекта	2,8	48	312	120	53	12
Изменение диаметра сопла	3,2	99	283	134	88	12
Применение канавки	9,4	31	196	135	102	12
Применение канавки с двойным проемом	3,8	59	157	122	110	12
Использование двойной апертуры сопла	2,8	75	396	139	82	12

В ходе экспериментов наблюдалось значительное истирание поверхности углепластика как снизу, так и сверху, как показано на рис. 3. Это объясняется неплотным плетением образцов с большим расстоянием между узлами. Кромки истирающихся волокон видны на кадрах с микроскопа и представлены на рис. 4. Результаты также подтверждены снимком, полученным с помощью электронного микроскопа и представлены на рис. 5.



Рисунок 3 – Образец тестовых резов углепластика при скорости резки 2,5 м/мин



а)

б)

а – вид сбоку, *б* – вид сверху

Рисунок 4 – Микроскопическое изображение испытаний с использованием 1 прохода при скорости резки 2,5 м/мин с давлением газа 16 бар через газовое сопло 1 мм



Рисунок 5 – Микрофотография с электронного микроскопа

Эффект многопроходного метода резки исследовался путем увеличения количества проходов до 2 и 3. С каждым шагом скорость прохода также пропорционально увеличивалась для поддержания общей скорости резки 2,5 м/мин. Второй и третий проходы – скорость 5 м/мин и 7,5 м/мин соответственно. В моменте было зафиксировано, что с ростом числа проходов наблюдалось снижение степени повреждения волокон и расслоения верхнего слоя. При этом линейная скорость дополнительно увеличена до 10 м/мин, что привело к уменьшению глубины повреждения волокон, уменьшению глубины расслоения верхнего слоя и уменьшению глубины удаления эпоксидной смолы, в то время как расслоение нижнего слоя увеличилось на 60 мкм. Повреждение, возможно, вызвано во время 3-го прохода, когда сжатый газ и перегрев лазерным излучением вытесняют нижний слой волокон из стабильного положения.

При скорости прохода 10 м/мин и количестве проходов, установленном на 2, измеренные характеристики улучшаются, за исключением степени удаления эпоксидной смолы, которая достигает глубины 180 мкм.

На рис. 6 показан образец, разрезанный при скорости резки 2,5 м/мин с 3 проходами и без истирания верхнего слоя. На рис. 7 показана микрофотография, полученная с помощью электронного микроскопа, со степенью повреждения волокна на глубину 65,6 мкм. Оптимизация изменения расстояния от сопла до объекта не привела к заметному улучшению измеряемых характеристик. Однако наблюдалось некоторое визуальное улучшение ориентации волокон и расслоения. Микрофотографии, полученные с помощью электронного микроскопа при резке со скоростью 2,5 м/мин, показали повреждения волокон на глубину 42,3 мкм.

Размер отверстия сопла был увеличен с 1,0 до 2,0 мм. Однако это не привело к существенному улучшению измеряемых характеристик, а глубина повреждения волокон и расслоение нижнего слоя увеличились в 1,5 и 2 раза соответственно. На рис. 8 представлена фотография опытного образца, разрезанного соплом 2,0 мм и тремя проходами, где видно значительно меньшее истирание верхнего слоя.



Рисунок 6 – Контрольный разрез без истирания верхнего слоя

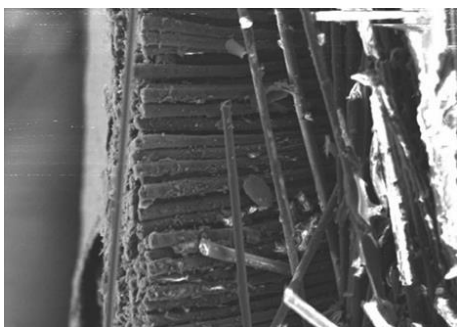


Рисунок 7 – Микрофотография, полученная с помощью электронного микроскопа, со степенью повреждения волокна при 65,6 мкм



Рисунок 8 – Результат обработки углепластика с использованием сопла диаметром 2 мм и 3-мя проходами

Повреждение волокон достигало глубины 30-80 мкм при использовании сопла двойной апертуры. Глубина удаления эпоксидной смолы снизилась в среднем до 157 мкм. Это сравнительно меньше среднего значения глубины удаления эпоксидной смолы, равной 341 мкм для резки с использованием сопла диаметром 2,0 мм и глубины 345 мкм с использованием сопла диаметром 1,0 мм. Сопло двойной апертуры создает поток воздуха под высоким давлением, направленный вниз на поверхность, и уменьшает количество воздуха, направляемого в сторону. Это снижает давление, отталкивающее верхний слой эпоксидной смолы от лазерного излучения или потока газа во время обработки.

Для испытаний использовались два размера зазора между траншеями: 50 мкм и 100 мкм при высокой скорости прохода 15 м/мин. Однако установленная скорость прохода не обеспечила получения разреза у образца толщиной 2 мм. Полные разрезы были успешно реализованы при значительно сниженной скорости проходки, составляющей 7,5 метров в минуту. При этом удовлетворительные результаты по уменьшению глубины повреждения волокон были достигнуты при диаметре сопла 1,0 мм и зазоре между траншеями в 100 мкм. Зазор между траншеями 50 мкм дал лучшие результаты с точки зрения глубины удаления эпоксидной смолы 55 мкм. При использовании метода траншеи был сделан вывод о том, что средняя глубина повреждения волокна составила 31 мкм, а глубина удаления эпоксидной смолы – 196 мкм по сравнению с другими методами.

Глубина удаления эпоксидной смолы была уменьшена с помощью сопла двойной апертуры, достигнув значения 157 мкм по сравнению со средним значением 308 мкм без сопла двойной апертуры. Минимальная достигнутая глубина удаления эпоксидной смолы составила 110 мкм с траншеей и 130 мкм без траншеи.

Было отмечено, что увеличение скорости обработки за счёт большего количества проходов может уменьшить глубину удаления эпоксидной смолы и параметры отслоения верхнего слоя. Это обусловлено малым временем пребывания луча над облучаемой областью в процессе обработки, что позволяет материалу рассеивать тепло до того, как лазерный луч нанесет ему какой-либо ущерб до следующего прохода.

Таким образом, многопроходный метод резки обеспечивает подачу одинакового количества энергии на облучаемую область в течение более длительной продолжительности общего времени обработки, что снижает плотность энергии, выделяемой на обрабатываемую поверхность за единицу времени при каждом проходе.

4 Обсуждение и заключение

В экспериментальном исследовании было проанализировано влияние различных параметров процесса лазерной резки на качество поверхности углепластика. Был сделан вывод о том, что изменение параметров материала во время резки обусловлено плетением углеволокна, особенно в верхнем и нижнем слоях, где материал подвергается значительному истиранию при обработке. Можно использовать многопроходный метод, выполняя каждый проход с эквивалентно более высокой скоростью. Фактически, при таком подходе и пропорциональном увеличении скорости, можно получить преимущество в скорости резки без потери качества резки. Обнаружено, что многопроходный метод резки углепластика с тремя проходами значительно снижает истирание верхнего и нижнего слоев и улучшает качество резки, независимо от того, обрабатывались ли они соплами с большим или малым диаметром, а также соплом с двойным отверстием. Резка, выполненная с использованием одного прохода, не достигает требуемой скорости резки и приводит к повреждению волокон.

Испытания, проведенные с использованием одного прохода, повредили волокна на глубину более 100 мкм. Дальнейшие испытания с использованием одного прохода были проведены с различными расстояниями от поверхности материала до лазера, и повреждение волокна на глубину менее 70 мкм было достигнуто при скорости резки от 2,5 м/мин до 3,5 м/мин. Резка с использованием траншеи обеспечивает стабильное качество резки. Траншейная резка или

обработка с использованием двух апертур (двойного отверстия) обеспечивает низкую степень повреждения волокна: глубина менее 100 мкм, в среднем глубина около 50 мкм. Также было отмечено, что температура образца не превышает 100 °С. Лазерная резка углепластика как траншейная, так и с использованием сопла двойной апертуры открывают возможности для использования волоконного лазера в качестве замены механической резке в процессах ремонта и восстановления деталей авиационной техники из ПКМ, обеспечивая более высокую точность, производительность и значительное снижение экономических затрат.

Список литературы

- 1 Галиев, Л.С. Оценка конкурентных преимуществ композиционных материалов в строительных конструкциях / Л.С. Галиев, В.В. Полити, В.С. Канхва // Отходы и ресурсы. – 2022. – Т. 9. – № 3. URL: <https://resources.today/PDF/19ECOR322.pdf> DOI: 10.15862/19ECOR322.
- 2 Dudarev, A. S. Study of thermophysics during diamond drilling of fibreglass and carbon fibre-reinforced polymer composites / A. S. Dudarev, E. Kh. Gumarov // Proceedings of Irkutsk State Technical University. – 2021. – Vol. 25. No. 3(158). – P. 290-299. – DOI 10.21285/1814-3520-2021-3-290-299.
- 3 Pasechnik, K. A. Numerical and experimental study on CFRP structure optimization for coefficient of thermal expansion / K. A. Pasechnik, I. V. Obvertkin, A. Y. Vlasov // PNRPU Mechanics Bulletin. – 2023. – No. 3. – P. 114-123. – DOI 10.15593/perm.mech/2023.3.10.
- 4 Chashchin, N. S. Optimisation of the bore reaming process in hybrid stacks made of carbon fibre and metal alloys / N. S. Chashchin // iPolytech Journal. – 2022. – Vol. 26. No. 1. – P. 35-42. – DOI 10.21285/1814-3520-2022-1-35-42.
- 5 Раскутин, А.Е. Технологические особенности механообработки композиционных материалов при изготовлении деталей конструкций // А.Е. Раскутин, А.В. Хрульков, Р.И. Гирш // Труды ВИАМ. – 2016. – №9. URL: <https://dx.doi.org/10.18577/2307-6046-2016-0-9-12-12>.
- 6 Stress-deformable state of glass during waterjet cutting / G.M. Bazenov, G.T. Itybayeva, R.V. Kussainov [et al.] // Science and Technology of Kazakhstan. 2023. No. 3. – P. 93-101. DOI 10.48081/GOJT6833.
- 7 Алтынбаев А.К. Электроэрозионные методы обработки глубоких прецизионных отверстий в деталях авиационных двигателей / А.К. Алтынбаев, В.А. Гейкин // Металлообработка. – 2003. – № 6 (18). – С. 47-49.
- 8 Сабельников, Б. Н. Композитные материалы в строительстве: стеклопластик и углепластик / Б. Н. Сабельников, А. В. Шлеенко, Н. М. О. Алиев // БСТ: Бюллетень строительной техники. – 2025. – № 9(1093). – С. 56-58.
- 9 Петров М.Г. Влияние низких температур и влаги на прочностные свойства углепластика / М.Г. Петров, М.П. Лебедев, О.В. Старцев, М.М. Копырин // Доклады Российской академии наук. Химия, науки о материалах. – 2021. – Т. 500. – № 1. – С. 62-68.
- 10 Либенсон М.Н., Яковлев Е.Б., Шандыбина Г.Д. Взаимодействие лазерного излучения с веществом (силовая оптика). Часть II. Лазерный нагрев и разрушение материалов. Учебное пособие. Под общей редакцией В.П. Вейко – СПб: НИУ ИТМО. –2014. – 181 с.
- 11 Chashchin, N. S. Optimisation of the bore reaming process in hybrid stacks made of carbon fibre and metal alloys / N. S. Chashchin // iPolytech Journal. 2022. Vol. 26. No. 1. – P. 35-42. – DOI 10.21285/1814-3520-2022-1-35-42.
- 12 Борейшо А.С., Ивакин С.В. Лазеры: устройство и действие: Учебное пособие. – СПб.: Издательство «Лань». – 2016. – 304 с.
- 13 Мазеин П.Г. Применение станков лазерной резки: учебное пособие / П.Г. Мазеин, М.Р. Ахметов, С.Р. Сайфутдинов // Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ. 2011. – 106 с.
- 14 Григорьянц А.Г. Теоретические основы лазерной обработки / А.Г. Григорьянц, И.Н. Шиганов, А.И. Мисюров // Под редакцией А.Г. Григорьянца. Москва: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана. – 2022. – 286 с.
- 15 Bogachkov, I. V. Identification of single-mode optical fiber types and determination of the parameters of their longitudinal strain / I. V. Bogachkov // T-Comm. – 2023. – Vol. 17. - No. 11. – P. 51-57. – DOI 10.36724/2072-8735-2023-17-11-51-57.

16 Rimshin, V. I. Strengthening of reinforced concrete structures by composite materials taking into consideration the carbonization of concrete / V. I. Rimshin, P. S. Truntov // *Structural Mechanics of Engineering Constructions and Buildings*. – 2023. – Vol. 19. - No. 2. – P. 178-185. – DOI 10.22363/1815-5235-2023-19-2-178-185.

17 Галиновский А.Л. Новые методы и технологии обработки углепластиков / А.Л. Галиновский, Цзя Чженьюань, С.Н. Цыпышева, К. А. Терновских, С.А. Рябенкова, С.А. Ерохин // *Справочник. Инженерный журнал с приложением*. – 2021. – № 8. – С. 10-19.

18 Богданов А.В. Волоконные технологические лазеры и их применение [Электронный ресурс]: учебное пособие для вузов // А.В. Богданов, Ю.В. Голубенко. 5-е изд., стер. – Санкт-Петербург: Лань. – 2023. – 236 с.

19 Trifonov G.I. Surface Restoration of Metal Parts by Plasma Spraying of Powder / G.I. Trifonov, S.Yu. Zhachkin, I.N. Kravchenko // *Russian Engineering Research*. 2025. Vol. 45. No. 5. – P. 635-640.

20 Panov, D. I. Laser Processing of Gallium Oxide Crystals in the Preparation of Samples for Microelectronics / D. I. Panov, V. A. Spiridonov, O. S. Vasilev [et al.] // *Reviews on Advanced Materials and Technologies*. 2025. Vol. 7. No. 3. – P. 198-202. – DOI 10.17586/2687-0568-2025-7-3-198-202.

References

1 Galiev, L.S. Evaluation of Composite Materials' Competitive Advantages in Building Structures / L.S. Galiev, V.V. Politi, V.S. Kankhva // *Waste and Resources*. - 2022. - Vol. 9. - No. 3. URL: <https://resources.today/PDF/19ECOR322.pdf> DOI: 10.15862/19ECOR322.

2 Dudarev, A. S. Study of Thermophysics during Diamond Drilling of Fiberglass and Carbon Fiber-Reinforced Polymer Composites / A. S. Dudarev, E. Kh. Gumarov // *Proceedings of Irkutsk State Technical University*. - 2021. - Vol. 25. No. 3(158). - P. 290-299. – DOI 10.21285/1814-3520-2021-3-290-299.

3 Pasechnik, K. A. Numerical and experimental study on CFRP structure optimization for coefficient of thermal expansion / K. A. Pasechnik, I. V. Obvertkin, A. Y. Vlasov // *PNRPU Mechanics Bulletin*. – 2023. – No. 3. – P. 114-123. – DOI 10.15593/perm.mech/2023.3.10.

4 Chashchin, N. S. Optimization of the bore reaming process in hybrid stacks made of carbon fiber and metal alloys / N. S. Chashchin // *iPolytech Journal*. – 2022. – Vol. 26.No. 1. – P. 35-42. – DOI 10.21285/1814-3520-2022-1-35-42.

5 Raskutin, A.E. Technological Features of Mechanical Processing of Composite Materials in the Manufacturing of Structural Parts // A.E. Raskutin, A.V. Khrulkov, R.I. Girsh // *Proceedings of VIAM*. – 2016. – No. 9. URL: <https://dx.doi.org/10.18577/2307-6046-2016-0-9-12-12>.

6 Stress-deformable state of glass during waterjet cutting / G.M. Bazenov, G.T. Itybayeva, R.B. Kussainov [et al.] // *Science and Technology of Kazakhstan*. 2023. No. 3. – P. 93-101. DOI 10.48081/GOJT6833.

7 Altynbaev A.K. Electrical discharge methods for machining deep precision holes in aircraft engine parts / A.K. Altynbaev, V.A. Geikin // *Metalworking*. - 2003. - No. 6 (18). - P. 47-49.

8 Sabelnikov, B.N. Composite materials in construction: fiberglass and carbon fiber / B.N. Sabelnikov, A.V. Shleenko, N.M.O. Aliyev // *BST: Bulletin of construction equipment*. - 2025. - No. 9 (1093). - P. 56-58.

9 Petrov M.G. Influence of low temperatures and moisture on the strength properties of carbon fiber / M.G. Petrov, M.P. Lebedev, O.V. Startsev, M.M. Kopyrin // *Reports of the Russian Academy of Sciences. Chemistry, Materials Science*. - 2021. - Vol. 500. - No. 1. - Pp. 62-68.

10 Libenson M.N., Yakovlev E.B., Shandybina G.D. Interaction of Laser Radiation with Matter (Power Optics). Part II. Laser Heating and Destruction of Materials. Tutorial. General editor V.P. Veiko - St. Petersburg: NRU ITMO. -2014. - 181 p.

11 Chashchin, N. S. Optimization of the Bore Reaming Process in Hybrid Stacks Made of Carbon Fiber and Metal Alloys / N. S. Chashchin // *iPolytech Journal*. 2022. Vol. 26. No. 1. - Pp. 35-42. – DOI 10.21285/1814-3520-2022-1-35-42.

12 Boreysho A.S., Ivakin S.V. Lasers: device and operation: Textbook. – St. Petersburg: Lan Publishing House. – 2016. – 304 p.

13 Mazein P.G. Application of laser cutting machines: textbook / P.G. Mazein, M.R. Akhmetov, S.R. Saifutdinov // Chelyabinsk: Publishing center of SUSU. 2011. – 106 p.

14 Grigoryants A.G. Theoretical foundations of laser processing / A.G. Grigoryants, I.N. Shiganov, A.I. Misyurov // Edited by A.G. Grigoryants. Moscow: Publishing house of MSTU im. N.E. Bauman. – 2022. – 286 p.

15 Bogachkov, I. V. Identification of single-mode optical fiber types and determination of the parameters of their longitudinal strain / I. V. Bogachkov // T-Comm. – 2023. – Vol. 17. - No. 11. – P. 51-57. – DOI 10.36724/2072-8735-2023-17-11-51-57.

16 Rimshin, V. I. Strengthening of reinforced concrete structures by composite materials taking into consideration the carbonization of concrete / V. I. Rimshin, P. S. Truntov // Structural Mechanics of Engineering Constructions and Buildings. – 2023. – Vol. 19. - No. 2. – P. 178-185. – DOI 10.22363/1815-5235-2023-19-2-178-185.

17 Galinovsky A.L. New methods and technologies for processing carbon fiber reinforced plastics / A.L. Galinovsky, Jia Zhenyuan, S.N. Tsypysheva, K. A. Ternovskikh, S.A. Ryabenkova, S.A. Erokhin // Handbook. Engineering journal with supplement. – 2021. – No. 8. – P. 10-19.

18 Bogdanov A.V. Fiber technological lasers and their application [Electronic resource]: a textbook for universities // A.V. Bogdanov, Yu.V. Golubenko. 5th ed., reprinted. – St. Petersburg: Lan. – 2023. – 236 p.

19 Trifonov G.I. Surface Restoration of Metal Parts by Plasma Spraying of Powder / G.I. Trifonov, S. Yu. Zhachkin, I.N. Kravchenko // Russian Engineering Research. 2025. Vol. 45.No. 5. – P. 635-640.

20 Panov, D. I. Laser Processing of Gallium Oxide Crystals in the Preparation of Samples for Microelectronics / D. I. Panov, V. A. Spiridonov, O. S. Vasilev [et al.] // Reviews on Advanced Materials and Technologies. 2025. Vol. 7.No. 3. – P. 198-202. – DOI 10.17586/2687-0568-2025-7-3-198-202.

© Романов А. А., Трифонов Г. И., 2026