На правах рукописи

Котов Сергей Александрович

РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ ПРЕЦИЗИОННОЙ РЕЗКИ И СВЕРЛЕНИЯ КОНСТРУКЦИОННЫХ УГЛЕПЛАСТИКОВ ИЗЛУЧЕНИЕМ ВОЛОКОННОГО ИТТЕРБИЕВОГО ЛАЗЕРА

Специальность: 05.02.07 – Технология и оборудование механической и физико-технической обработки

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва, 2018

Работа выполнена в Общество с ограниченной ответственностью научно-техническое объединение «ИРЭ-Полюс».

Научный руководитель: **Лябин Николай Александрович**
доктор технических наук,
начальник лаборатории «Лазеры и лазерные технологии»
АО «НПП «Исток» им. Шокина»

Официальные оппоненты: **Вейко Вадим Павлович**
доктор технических наук, профессор,
заведующий кафедрой Лазерных технологий и экологического приборостроения Санкт-Петербургского национального исследовательского университета информаци

Петровски
кандидат ф
Национальн ... итет
«МИФИ», и

Ведущая организация: Федеральн ... ное
учреждение

У2176320
Котов С.А.
Разработка технологии прецизионной резки и сверления конструкционных углепластиков излучением...
2018 1,00

У2176320

Возвратите книгу не позже обозначенного здесь срока

Защита сост
диссертационного с
образовательном у
технический унив
университет)» (МГТ
д.5, стр. 1.

Ваш отзыв н
просим направлять п

С диссертаци
105005, г. Москва, 2-

Телефон для с

Автореферат р

Ученый секретарь
диссертационного
доктор технически

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность

Конструкционные углепластики относятся к классу волокнистых полимерных композиционных материалов (ПКМ), обладающих уникальным комплексом технологических и эксплуатационных свойств: высокие упругопрочностные свойства, статическая и динамическая выносливость и усталостная прочность, низкий удельный вес. Благодаря этим свойствам углепластики находят широкое применение в ключевых отраслях современной промышленности: авиастроении, судостроении, строительстве, автомобилестроении, электротехнике, ветроэнергетике, трубной и др.

На финальном этапе производства изделий из углепластиков требуется прецизионная размерная обработка по внутренним и внешним контурам формованных заготовок, например, сверление отверстий различного назначения. Для выполнения этих операций применяются механический, гидроабразивный и лазерный способы обработки. Проблемы при обработке углепластика, состоящего из полимерной связующей матрицы и углеродного армирующего наполнителя, определяются его сложным строением: слоистой структурой, неоднородностью состава и высокой анизотропией механических и теплофизических свойств.

Практическое применение в промышленности лазерной обработки углепластиков по сравнению с традиционными способами дает ряд преимуществ: отсутствие износа инструмента и механического воздействия на материал, возможность обработки деталей сложной конфигурации с высокими скоростью, точностью и повторяемостью, возможность создания тонких стенок и узких пазов с минимальными радиусами, отверстий с малым диаметром и под заданным наклоном к поверхности. В качестве источника обрабатывающего излучения выбран высокоэффективный волоконный иттербиевый лазер, обладающий широким диапазоном мощностей (10 Вт – 30 кВт), длин волн (1,06; 0,532; 0,355 мкм), частот следования (1 кГц – 1 МГц) и длительностей (10^{-7} – 10^{-12} с) импульсов.

Г Т У
Баумана
ОТЕКА

Вместе с тем, при обработке лазерным излучением возникает термодеструкция полимерной связующей матрицы, что приводит к нарушению прочности ее сцепления с армирующим углеродным волокном и, следовательно, к снижению эксплуатационных свойств материала, в первую очередь, упругопрочностных. Поэтому исследования, направленные на разработку лазерной технологии для качественной и производительной обработки конструкционных углепластиков, являются актуальными.

Целью диссертационной работы является разработка технологии прецизионной резки и сверления конструкционных углепластиков излучением импульсных и непрерывных волоконных иттербиевых лазеров.

Для достижения поставленной цели необходимо было выполнить следующие задачи:

1. Провести обзор отечественной и зарубежной литературы о состоянии и развитии лазерной технологии и оборудования по обработке конструкционных волокнистых ПКМ;
2. Разработать экспериментальную технологическую установку для проведения исследований по обработке конструкционных ПКМ углепластиков на базе высокоэффективных импульсных и непрерывных отечественных волоконных иттербиевых лазеров. Разработать методики оценки качества обработки;
3. Сформулировать, на основе результатов расчетов температурных полей, рекомендации по выбору основных технологических параметров режима лазерной обработки для уменьшения объема экспериментальных исследований ЗТВ;
4. Провести экспериментальные исследования закономерностей формирования и зависимостей дефектов макрогеометриии (ЗТВ и конусности) и микрогеометрии (шероховатости, расслоений и растрескиваний) канала лазерного реза от метода и технологических параметров режима обработки;
5. Провести сравнительные исследования качества и оценку стоимости лазерной обработки углепластиков.

Научная новизна работы заключается в следующих положениях, выносимых на защиту:

1. Разработаны методы эффективной многопроходной послойной лазерной резки и сверления углепластиков излучением волоконного иттербиевого лазера при плотности мощности в импульсном режиме 10^9 Вт/см^2, непрерывном – 10^7 Вт/см^2, когда процесс обработки идет в испарительном режиме;
2. Исследованы зависимости дефектов макрогеометрии (ЗТВ, конусность) и микрогеометрии (шероховатость, расслоение, растрескивание) канала лазерного реза углепластиков толщиной 1-3 мм от параметров излучения, скорости перемещения луча, свойств материала, условий и алгоритма многопроходной обработки. Установлено, что требуемое (максимальное) качество обработки: ЗТВ < 50 мкм, конусность < 100 мкм, шероховатость $R_z \leq 40$ мкм, отсутствие расслоений и растрескиваний в импульсном режиме достигается при скоростях 0,5-2 м/с, частоте следования и длительности импульсов 30-40 кГц и 5-100 нс;
3. Показано, что при резке углепластиков толщиной 1-3 мм излучением непрерывного лазера сопоставимое качество обработки с импульсным лазером достигается при скоростях перемещения луча $\geq$ 1 м/с и паузе между последовательными проходами длительностью 0,5-1 с;
4. Исследованы зависимости механической прочности на растяжение углепластика толщиной 1, 2 и 3 мм с концентратором напряжений в виде отверстий диаметром 6, 8 или 16 мм от способа обработки. Установлено, что при лазерной обработке прочность образцов сопоставима с механической обработкой алмазным инструментом и до 15% выше по сравнению с гидроабразивной резкой.

Практическая значимость работы

1. Создана уникальная экспериментальная технологическая установка для прецизионной резки и сверления углепластиков на базе отечественных промышленных наносекундных импульсных и непрерывных волоконных

иттербиевых лазеров с длиной волны излучения 1,06 мкм; скоростью перемещения луча до 10 м/с; точностью позиционирования ± 5 мкм в рабочем поле до 220x220 мм^2 и плотностью мощности излучения в обрабатывающем световом пятне (30…160 мкм) в непрерывном режиме – 10^7 Вт/см^2, импульсном – 10^9 Вт/см^2;

2. Разработаны технологии по качественной и производительной лазерной резке угле- и стеклопластиков толщиной от 1 до 8 мм с полимерной связующей матрицей на основе термо- и реактопластов;
3. Проведена оценка стоимости лазерной обработки углепластика толщиной 3 мм по суммарным затратам на погонный метр реза по сложному контуру с учетом затрат на амортизацию технологической установки, расходные материалы, энергоресурсы и зарплату оператора. Показано, что разработанная технология лазерной резки излучением непрерывного волоконнного иттербиевого лазера мощностью 1-4 кВт характеризуется более чем на порядок меньшими затратами по сравнению с обработкой импульсным наносекундным лазером с $20 \leq P_{ср} \leq 30$ Вт.

Методы исследования

Для экспериментальных исследований использованы стандартные и специально разработанные микрометрические, оптико-физические, спектральные и расчетные методы, производимые с использованием разработанной технологической установки, стандартных приборов, устройств и элементов. Эксперименты по резке и сверлению углепластиков проводились с использованием промышленных импульсных и непрерывных волоконных иттербиевых лазеров отечественного производства.

Расчет температурных полей в материале проводился по аналитическим решениям для моделей мгновенно-действующего и быстродвижущегося нормально-распределённых (функция Гаусса) круговых источников на поверхности полубесконечного тела в открытой математической программе для научных расчетов Scilab.

Механические испытания образцов на растяжение проводили в научно-исследовательской и испытательной лаборатории НПЦ «НИАТ Композит» на универсальной испытательной машине Tinius Olsen H1000KU.

Достоверность полученных результатов обеспечена корректным использованием общих положений фундаментальных наук (уравнения баланса энергии, теплопереноса и т.д.), проверена по известным критериям.

Апробация работы. Результаты работы доложены и обсуждены на научных семинарах кафедры «Лазерные технологии в машиностроении» ФГБОУ ВО МГТУ им. Н.Э. Баумана (Москва, 2017 г.) и научно-технических конференциях, семинарах и конгрессах: 27 и 28-ой Международных конференциях «Лазеры в Науке, Технике, Медицине»; Международных конференциях «Оптика лазеров – 2016» и «Лазерные, плазменные исследования и технологии – ЛаПлаз-2017»; VI Конгрессе техплатформы «Фотоника»; 10-ой Международной конференции «Современное состояние и перспективы развития производства и применения композитных материалов в России»; VI Всероссийском конгрессе молодых ученых; Международных молодежных научных конференциях «Гагаринские чтения – 2017» и «Перспективные подходы и технологии в проектировании производства деталей и изделий аэрокосмической техники – 2017».

Публикации. По результатам исследований опубликовано 9 научных работ в ведущих отечественных и зарубежных рецензируемых журналах, в том числе 8 статей по перечню ВАК РФ общим объемом 1,9 п.л. и 1 статья в журнале, индексируемом в базе данных SCOPUS, объемом 0,2 п.л.

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, общих выводов, списка литературы из 76 наименований и приложения. Работа содержит 157 страниц машинописного текста, в том числе 18 таблиц и 90 рисунков.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность диссертационной работы, сформулированы цель и задачи исследований, представлены основные научные

положения, выносимые на защиту, и практическая значимость работы.

В первой главе проведен обзор отечественных и зарубежных работ о состоянии и перспективах развития лазерной технологии и оборудования по обработке конструкционных волокнистых ПКМ. Эти материалы обладают уникальным комплексом технологических и эксплуатационных свойств: высокими упругопрочностными свойствами, статической и динамической выносливостью и усталостной прочностью, низким удельным весом. ПКМ углепластики характеризуются максимальными прочностью, термической и химической стойкостью и отвечают современным требованиям изделий в авиастроении, судостроении, автомобилестроении, мостостроении, энергетике, трубной и других отраслях промышленности. Существенный вклад в исследование физических основ и особенностей технологического процесса лазерной обработки ПКМ из отечественных научных коллективов внесли МГТУ им. Н.Э. Баумана и Физический Институт им. П.Н. Лебедева РАН, зарубежных – Cambridge University (Англия), Lazer Zentrum Hannover (Германия), Shizuoka University (Япония), фирмы и университеты Италии, Испании, Бразилии и Индии. В этих работах показано, что эффективная лазерная резка и сверление углепластиков достигается при высоких уровнях плотности мощности, достаточных для удаления материала в испарительном режиме. Качество обработки зависит от параметров излучения лазера, фокусирующей оптической системы, скорости перемещения луча, свойств материала и метода лазерной обработки.

Качественная и производительная лазерная обработка углепластиков по сравнению с другими типами ПКМ является наиболее сложной технологической задачей из-за высоких неоднородности и анизотропии теплофизических свойств и чувствительности материала к концентрации напряжений, вызванных дефектами обработки. Основными показателями качества детали из углепластика служат дефекты макрогеометрии (ЗТВ и конусности) и микрогеометрии (шероховатости, расслоений и растрескиваний) канала лазерного реза. Для практического применения лазерной обработки в

промышленности как альтернативы механической обработке режущим инструментом и гидроабразивной резке требуется обеспечить высокое качество реза: ЗТВ $\leq$ 150 мкм, конусность $\leq$ 100 мкм, шероховатость $R_z \leq 50$ мкм, отсутствие расслоений и растрескивания.

Традиционный метод однопроходной лазерной резки и сверления отверстий, характеризуется высокими точностью и производительностью, но имеет существенный недостаток – ЗТВ > 1 мм, что является неприемлемым результатом для практического внедрения в производство. На современном этапе развития технологии к перспективным методам относится многопроходная лазерная обработка с использованием импульсных и непрерывных волоконных иттербиевых лазеров с уникальной совокупностью технико-эксплуатационных свойств и высокоскоростных гальваносканеров с фокусирующей F-Theta линзой. Поэтому разработка лазерной технологии для качественного изготовления деталей из углепластиков, как альтернативы традиционным способам обработки, является задачей актуальной. Для её решения возникла необходимость создания современной технологической установки, проведения расчетов и экспериментальных исследований.

Во второй главе представлены разработка экспериментальной лазерной технологической установки (ЛТУ) для прецизионной лазерной обработки углепластиков, разработка методик измерений и расчеты параметров обрабатывающего светового пятна, методики оценки показателей качества обработки. Рассмотрены технологические свойства исследуемых углепластиков. Базовую основу ЛТУ составляют серийные импульсные и непрерывные волоконные иттербиевые лазеры с $P_{ср} \leq 30$ Вт и $P \leq 4$ кВт и двухосевые гальваносканеры с фокусирующей F-Theta линзой, рабочим полем до 220x220 мм^2 и точностью позиционирования по осям ± 5 мкм. Структурная схема ЛТУ представлена на Рисунке 1.

Измерение параметров применяемых импульсных и непрерывных лазеров осуществлялось на современной измерительной аппаратуре: автоматических станциях измерения параметра качества и мощности излучения – Primes LQM,

Focus Monitor FM-120 и Power Monitor PM48, Coherent FieldMax 2-TO; анализаторов спектра Yokogawa AQ6370C и Anritsu MS9740A; цифровых осциллографов Agilent InfiniiVision MSO-X 4054A для измерения длительности и частоты следования импульсов. По результатам измерений с применением известных формул произведены расчеты параметров обрабатывающего светового пятна для выбранных исполнений созданной технологической установки. Плотность мощности с непрерывным лазером составляла 10^7 Вт/см^2 в сфокусированном световом пятне диаметром 30…160 мкм, с импульсным – 10^9 Вт/см^2, что на порядок больше пороговых значений для обработки углепластиков в испарительном режиме.

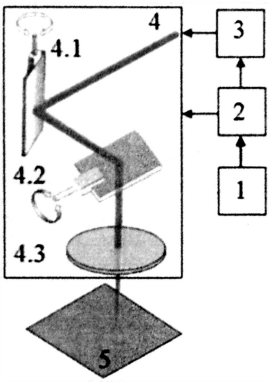

Рисунок 1. Структурная схема экспериментальной ЛТУ: 1 – компьютер; 2 – управляющий контроллер; 3 – волоконный иттербиевый лазер; 4 – двухосевой гальваносканер; 4.1 – зеркало развертки луча по оси X; 4.2 – зеркало развертки луча по оси Y; 4.3 – фокусирующая F-Theta линза; 5 – образец из углепластика

Оценка показателей качества лазерной обработки: дефекты макро- и микрогеометрии канала лазерного реза проводилась с использованием оптического (Olympus GX-51) и электронного сканирующего (Tescan MIRA3) микроскопов, контактных контурографа Mitutoyo Contracer CV-2100 и профилометра Протон «модель 130».

В качестве исследуемых материалов выбраны углепластики отечественных (ВКУ-25) и зарубежных марок (M21/35%/T700, 5320-1/T650/3K) с полимерной связующей матрицей на основе эпоксидной смолы с различными схемами армирования: ортотропная, комбинированная и способами формования: автоклавный, вакуумный, прямое прессование. Такие материалы

наиболее часто применяются при изготовлении деталей и узлов авиационной техники: элементов крыла, обшивок мотогондол, кожухов, люков и др.

В третьей главе проведена теоретическая оценка зоны термического влияния при лазерной обработке углепластиков. Рассмотрена физическая модель взаимодействия сфокусированного лазерного излучения с углепластиком. Определено, что в виду сложного механизма удаления материала и большого количества факторов, влияющих на формирование ЗТВ при лазерной обработке, рациональным направлением по уменьшению объема экспериментальных исследований является использование математических моделей. Выполнен расчет температурных полей при обработке углепластиков наносекундными импульсными лазерами с $P_{ср} \leq 30$ Вт по аналитическому решению уравнения теплопроводности для модели мгновенно-действующего нормально-распределенного (распределение Гаусса) кругового источника (1):

$$T(r,z,t) - T_0 = \frac{Q \cdot A}{c_p \rho}\left(\frac{1}{4\pi a(t+t_0)}\exp\left(-\frac{r^2}{4a(t+t_0)}\right)\right) \times \left(\frac{1}{\sqrt{4\pi a t}}\exp\left(-\frac{z^2}{4at}\right)\right), \qquad (1)$$

где $r^2=x^2+y^2$ – положение в системе координат относительно центра сфокусированного светового пятна излучения (мкм); T_0 – температура окружающей среды (К); Q – энергия одного импульса излучения (Дж); c_p – теплоемкость материала (Дж/(кг·К)); ρ – плотность материала (кг/м^3); a – коэффициент температуропроводности (м^2/с); C – коэффициент сосредоточенности нормально распределенного кругового источника (1/м^2); A – коэффициент поглощения излучения; $t_0=1/(4aC)$. Показано, что этот класс лазеров позволяет минимизировать ЗТВ до значений < 50 мкм и для практического применения целесообразно использовать режимы обработки со следующими технологическими параметрами: энергия в импульсе $E_{имп} \geq 0{,}5$ мДж, частота повторения импульсов $30 \leq f_{имп} \leq 100$ кГц и скорость перемещения луча $0{,}5 \leq V_{скан} \leq 2$ м/с.

Расчет температурных полей при обработке углепластиков излучением непрерывных волоконных иттербиевых лазеров мощностью до 4 кВт выполнен по аналитическому решению уравнения теплопроводности для модели

быстродвижущегося нормально-распределенного (распределение Гаусса) кругового источника (2):

$$T(y,z,t) - T_0 = \frac{A \cdot 2 \cdot P/V_{скан}}{c_p \rho}\left(\frac{1}{\sqrt{4\pi a(t+t_0)}}\exp\left(-\frac{y^2}{4a(t+t_0)}\right)\right) \times \left(\frac{1}{\sqrt{4\pi a t}}\exp\left(-\frac{z^2}{4at}\right)\right), \quad (2)$$

где $V_{скан}$ – скорость перемещения луча (м/с); P – мощность непрерывного источника (Вт). Показано, что ширина формируемого канала реза в 2 раза и более превышает диаметр сфокусированного светового пятна и составляет 200...450 мкм; ЗТВ уменьшается до требуемого уровня (<150 мкм) при скоростях перемещения луча $V_{скан} \geq 1$ м/с; рациональным технологическим методом, уменьшающим ЗТВ, является введение паузы между последовательными проходами.

В Главе 4 на разработанной экспериментальной технологической установке проведены исследования по лазерной обработке углепластиков толщиной 1-3 мм. Установлены закономерности формирования дефектов макро- и микрогеометрии канала лазерного реза от энергетических, пространственных и временных параметров излучения лазера, скорости перемещения луча, свойств материала и алгоритма многопроходной обработки. На их основе разработаны новые методы прецизионной лазерной резки и сверления, повышающие качество детали за счет комплексного управления скоростью перемещения и алгоритмом развертки луча по сложносоставному треку как показано на Рисунке 2.

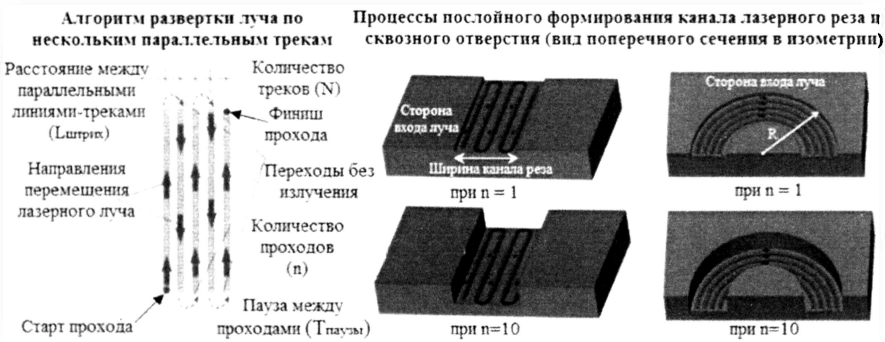

Рис. 2. Методы лазерной многопроходной резки и сверления углепластика по нескольким параллельным трекам

В результате экспериментов определены оптимальные технологические параметры режима многопроходной лазерной обработки углепластиков, позволяющие достигать требуемого (максимального) качества и высокой производительности. Показано, что при резке излучением наносекундных импульсных и непрерывных волоконных иттербиевых лазеров достигается высокое качество обработки: ЗТВ ≤ 50 мкм, конусность u $\leq$ 100 мкм, шероховатость $R_z \leq 40$ мкм, такие дефекты как расслоение и растрескивание отсутствуют (см. Рисунки 3 и 4). Скорость резки непрерывным излучением составляет 1…5 м/мин, что на 1-2 порядка выше результатов импульсных лазеров. Исследования по влиянию технологических газов (азот, аргон, гелий), свойств материала и длины волны излучения на качество лазерной резки показали, что рациональным технологическим методом является лазерная обработка излучением с λ=1,06 мкм в атмосфере воздуха, обеспечивающая стабильно высокое качество, сопоставимое с результатами при λ=0,51 и 0,355 мкм вне зависимости от свойств обрабатываемого углепластика.

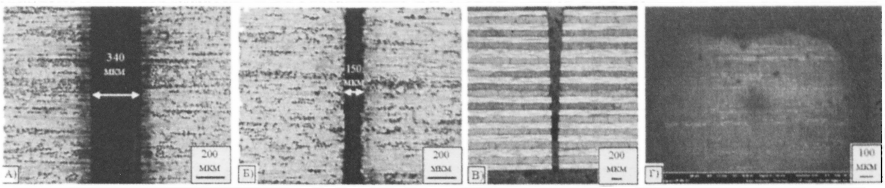

Рисунок 3. Результаты резки углепластика толщиной 3 мм излучением лазера модели YLPP-1-150-30-M с $P_{ср}$ = 30 Вт. Изображения поверхности: А) и Б) – со стороны входа и выхода луча, В) – микрошлифа поперечного сечения канала реза, Г) – канала реза на электронном микроскопе

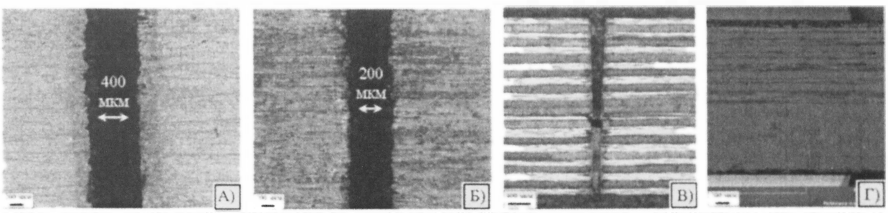

Рисунок 4. Результаты обработки углепластика толщиной 3 мм излучением лазера модели ЛК-1000-ОМ с Р = 1 кВт. Изображения поверхности: А) и Б) – со стороны входа и выхода луча, В) – микрошлифа поперечного сечения канала реза, Г) – канала реза на электронном микроскопе

Лазерное сверление отверстий диаметром 2-16 мм в углепластиках толщиной 1-3 мм излучением импульсных и непрерывных волоконных иттербиевых лазеров при оптимальных технологических параметрах позволяет выполнять обработку с высокими точностью: допуск на диаметр отверстий по квалитетам H9…H12, качеством: ЗТВ $\leq$ 100 мкм, шероховатость $R_z \leq 40$ мкм, отсутствием расслоений и растрескиваний и производительностью сопоставимой с механической обработкой (см. Рисунок 5). Лазерная технология позволяет потенциально увеличить производительность до 5-10 раз при решении актуальной в промышленности задачи – сверлении массива отверстий за счет эффективного использования времени паузы между последовательными проходами для транспортных переходов.

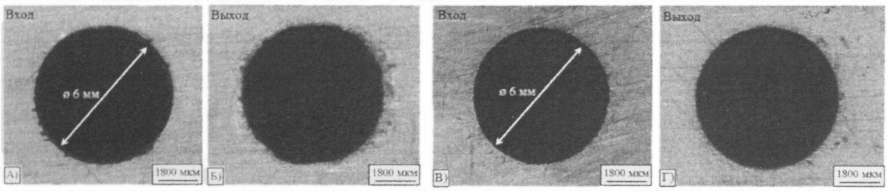

Рисунок 5. Изображения поверхности образца со сквозным отверстием диаметром 6 мм из углепластика толщиной 3 мм со стороны входа – А) и выхода – Б) луча при обработке излучением лазера модели модели ЛК-1000-ОМ; В), Г) – лазера модели YLPP-1-150-30-M

В главе 5 проведена оценка качества и стоимости лазерной обработки углепластиков. Показано, что при лазерной обработке механическая прочность на растяжение образцов из углепластика толщиной 1, 2 и 3 мм с концентратором напряжений в виде отверстий диаметром 6, 8 или 16 мм сопоставима с механической обработкой алмазным инструментом и до 15% выше по сравнению с гидроабразивной резкой (см. Рисунок 6). Механические испытания на прочность проводились в соответствие с ГОСТ 33375-2015 «Композиты полимерные. Метод испытания на растяжение образцов с открытым отверстием» (ASTM D5766).

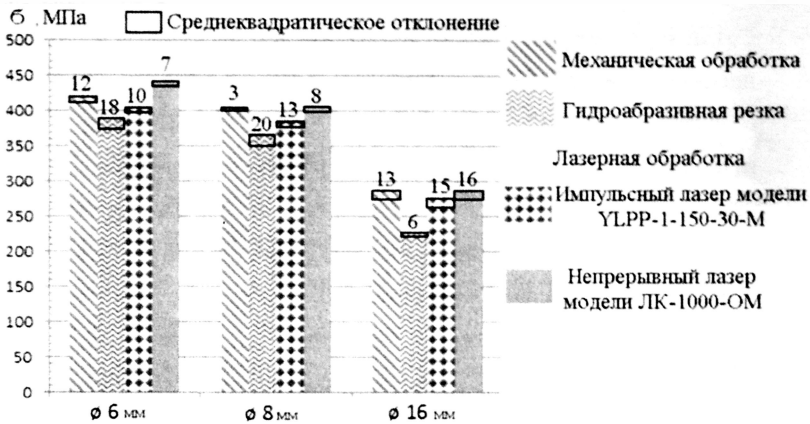

Рисунок 6. Диаграммы механических испытаний образцов из углепластика толщиной 3 мм при механической, гидроабразивной и лазерной обработке

Оценка стоимости лазерной обработки по методике расчета суммарных затрат на погонный метр реза по сложному контуру с учетом амортизации технологической установки, расходных материалов, энергоресурсов и зарплаты оператора показала, что стоимость резки углепластика толщиной 3 мм непрерывным излучением мощностью 1 кВт характеризуется более чем на порядок меньшими затратами – 45 руб./м, по сравнению с обработкой импульсным наносекундным лазером со средней мощностью 30 Вт, что делает непрерывный лазер более предпочтительным для внедрения в промышленности.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ

1. На основе отечественных и зарубежных работ проведен анализ основных свойств, областей применения и способов обработки конструкционных углепластиков. Применение в современном технологическом оборудовании волоконных иттербиевых лазеров в качестве высокоинтенсивного светового инструмента является перспективным направлением для обработки углепластиков с требуемыми для практического применения качеством и производительностью.

2. Создана уникальная экспериментальная технологическая установка для прецизионной резки и сверления углепластиков на базе серийно выпускаемых наносекундных импульсных и непрерывных волоконных иттербиевых лазеров с длиной волны 1,06 мкм и мощностью излучения 20-30 Вт и 1-4 кВт и оптических гальваносканеров с фокусирующей F-Theta линзой со скоростью перемещения луча до 10 м/с и точностью позиционирования по осям ± 5 мкм в рабочем поле до 220x220 мм^2.
3. Показано, что для эффективной обработки углепластиков в испарительном режиме необходимо формирование обрабатывающего светового пятна диаметром 30…160 мкм с плотностью мощности излучения в непрерывном режиме 10^7 Вт/см^2, импульсном – 10^9 Вт/см^2.
4. Проведены расчеты температурных полей в углепластике по аналитическим решениям уравнения теплопроводности для моделей мгновенно-действующего и быстродвижущегося нормально-распределенных круговых источников. Расчеты показали, что для достижения требуемого уровня ЗТВ ≤ 50…150 мкм необходимо использовать режимы лазерной обработки со следующими технологическими параметрами: $E_{имп} \geq 0{,}5$ мДж, $30 \leq f_{имп} \leq 100$ кГц и $0{,}5 \leq V_{скан} \leq 2$ м/с в импульсном режиме и $V_{скан} \geq 1$ м/с, $0{,}25 \leq T_{паузы} \leq 1$ с в непрерывном.
5. Исследованы зависимости дефектов макрогеометрии (ЗТВ, конусность) и микрогеометрии (шероховатость, расслоение, растрескивание) канала лазерного реза углепластиков толщиной 1-3 мм от технологических параметров режима обработки, ставшие основой для разработки технологии прецизионной резки и сверления.

6. Разработана технология многопроходной послойной лазерной резки углепластиков толщиной 1-3 мм. Показано, что максимальное (высокое) качество обработки: ЗТВ ≤ 50 мкм, конусность ≤ 100 мкм, шероховатость $R_z \leq 40$ мкм, отсутствие расслоения и растрескивания достигается в импульсном режиме при $5 \leq \tau_{имп} \leq 100$ нс, $0{,}5 \leq E_{имп} \leq 1$ мДж, $0{,}5 \leq V_{скан} \leq$

2 м/с, $50 \leq L_{штрих} \leq 100$ мкм, $4 \leq N \leq 8$ и в непрерывном режиме при $1 \leq V_{скан} \leq 5$ м/с, $200 \leq L_{штрих} \leq 300$ мкм, $0,5 \leq T_{паузы} \leq 1$ с и $N = 2$.

Подача технологического газа (азот, аргон, гелий) и свойства материала влияния на качество обработки не оказывают.

7. Показано, что при мощности излучения 1-4 кВт в непрерывном режиме работы лазера производительность обработки по сравнению с импульсным режимом со средней мощностью 20-30 Вт на два порядка выше при сопоставимом качестве обработки.
8. Разработана технология многопроходного послойного лазерного сверления сквозных отверстий диаметром 2-16 мм в углепластиках толщиной 1-3 мм. Точность позиционирования по осям рабочего светового пятна ±5 мкм и наклонное падение луча на заготовку обеспечивают выполнение отверстий с допуском на диаметр по квалитетам H9...H12, при сохранении высокого качества и производительности.
9. Экспериментальные данные о механической прочности на растяжение образцов с концентратором напряжений (сквозные отверстия) из углепластика толщиной 1, 2 и 3 мм показывают, что лазерная обработка обеспечивает прочность сопоставимую с механической обработкой алмазным инструментом и до 15% большую по сравнению с гидроабразивной резкой.
10. Оценка стоимости лазерной обработки углепластика толщиной 3 мм показала, что для практического применения в промышленности предпочтительнее использовать в технологических установках непрерывные волоконные иттербиевые лазеры мощностью ≥ 1 кВт, обеспечивающие более чем на порядок меньшую стоимость обработки по сравнению с импульсными наносекундными лазерами с $P_{ср} \leq 30$ Вт.

Список опубликованных работ по теме диссертации

1. Экспериментальная оценка режимов размерной обработки углепластиков импульсным наносекундным излучением волоконного иттербиевого лазера/ С.А. Котов [и др.] // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Серия

«Машиностроение». 2017. №1. С. 73-85. (0,6 п.л. / 0,2 п.л.)

2. Котов С.А., Блинков В.В., Кондратюк Д.И. Зависимость качества детали из термореактивного углепластика от вида обработки // Авиационная промышленность. 2016. №4. С. 43-47. (0,3 п.л. / 0,1 п.л.)

3. Котов С.А. Наукоемкая технология повышения эффективности размерной обработки углепластиков импульсным наносекундным излучением волоконного иттербиевого лазера // Наукоемкие технологии в машиностроении. 2017. №1. С. 30-36. (0,5 п.л.)

4. Котов С.А., Лябин Н.А. Экспериментальное исследование влияния длины волны лазерного излучения на эффективность размерной обработки углепластика // Вестник НИЯУ «МИФИ». 2017. Т. 6, №5. С. 396-404. (0,5 п.л. / 0,25 п.л.)

5. Качество и оценка эффективности размерной обработки углепластиков излучением волоконных лазеров/ С.А. Котов [и др.] // Авиационная промышленность. 2017. №3. С. 42-47. (0,5 п.л. / 0,15 п.л.)

6. Kotov S.A. Dimensional processing of composite materials by picosecond pulsed ytterbium fiber laser // IOP Conf. Series: Journal of Physic: Conf. Series. 2017. v. 941. 012039. (0,2 п.л.)

7. Наукоемкая технология повышения эффективности размерной обработки углепластиков непрерывным излучением волоконного иттербиевого лазера/ С.А. Котов [и др.] // Наукоемкие технологии в машиностроении. 2017. №11. С. 33-39. (0,45 п.л. / 0,1 п.л.)

8. Современные полимерные композиционные материалы и возможности их лазерной обработки/ С.А. Котов [и др.] // Альтернативная энергетика и экология. 2018. №10-12. С. 82-104. (2,1 п.л. / 0,5 п.л.)

9. Формирование отверстий излучением волоконного лазера в стеклокомпозиционном материале/ С.А. Котов [и др.] // Технология машиностроения. 2018. №6. С. 32-38. (0,6 п.л. / 0,1 п.л.)

Подписано в печать: 25.07.2018
Объем: 1,25 п.л
Тираж: 70 экз. Заказ №91
Отпечатано в типографии “Реглет”
г.Москва, ул. Фридриха Энгельса
3-5с2
8 (499) 267-54-64