

УДК 661.66:678.067.7:621.373.826:621.78:621.79

## ПРИМЕНЕНИЕ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ДЛЯ МОДИФИКАЦИИ ПОВЕРХНОСТИ И РАСКРОЯ УГЛЕРОДНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ И УГЛЕРОДНЫХ ТКАНЕЙ

© 2003 С.И. Кузнецов, А.Л. Петров

Самарский филиал Физического института им. П.Н. Лебедева РАН

Рассмотрены особенности использования лазерного излучения для модификации поверхности и раскроя углерод-углеродных композиционных материалов (УУКМ), углепластиков и углеродных тканей. Проведены исследования структурно-фазового состава гомогенно неграфитирующихся углеродных материалов (волокнистые углерод-углеродные композиционные материалы), обработанных непрерывным лазерным излучением в воздушной среде, аргоне, гелии и вакууме. Установлено, что структурно-фазовые изменения в исследуемых материалах протекают схожим образом и характеризуются появлением графитовых фаз гексагональной и ромбоэдрической модификаций.

Изучена возможность формирования защитных покрытий на углерод-углеродных композиционных материалах методом лазерного переплава порошков тугоплавких элементов и соединений. Исследованы процессы реакционного формирования покрытий при лазерном переплаве порошковых смесей Si – C и Si – Mo. Определены оптимальные режимы обработки, составы и толщины наносимых защитных слоёв. Рассмотрены особенности раскроя углепластиков, углерод-углеродных композиционных материалов и углеродных тканей непрерывным и импульсно-периодическим лазерным излучением.

### Введение

Композиционные материалы на основе углеродных волокон и углеродной матрицы обладают редкой по сравнению с другими конструкционными материалами способностью сохранять прочностные характеристики при температурах до 2500 °С, что и обусловило перспективы их применения прежде всего как жаропрочных материалов в авиа- и ракетостроении при температурах выше 1200 °С [1, 2].

Химическая стойкость углерода даёт возможность использовать УУКМ как конструкционные материалы для оборудования, работающего в химически агрессивных средах, например, в химической и нефтяной промышленности. Наконец, совместимость углерод-углеродных композитов с живыми тканями позволяет использовать их как материалы для протезирования.

Основным эксплуатационным недостатком УУКМ является высокая скорость окисления при температурах выше 400-500 °С и коррозия в азоте при высоких температурах, следствием чего является нарастание пористости и быстрое снижение прочности.

Следует отметить также, что абсолютное значение прочности и модуля упругости углерод-углеродных композитов всё-таки ниже соответствующих характеристик конструкционных металлических сплавов.

Основные пути улучшения термических и механических характеристик УУКМ – термическая обработка (при температурах выше 1500 °С) и нанесение защитных покрытий.

Существующая технология термической обработки УУКМ основана на нагреве обрабатываемых материалов в печи сопротивления до температур, не превышающих 3000 °С. Ограничение температуры обработки вызвано как большим расходом электроэнергии, так и отсутствием конструкционных материалов, способных длительное время работать при температурах выше 3000 °С. Длительный нагрев углеродных изделий в печи вынуждает тщательно контролировать состав атмосферы, чтобы избежать окисления обрабатываемых материалов.

На конечный результат термообработки влияют и особенности строения самого материала. Известно, что используемые для получения матрицы УУКМ терморезактивные

смолы дают после карбонизации стекловидные структуры кокса, которые не графитируются вплоть до 3000 °С (такие материалы называют неграфитирующимися). Углеродные волокна, используемые как наполнитель, также относятся в основном к неграфитирующимся углеродным материалам.

Полученные изделия из УУКМ (и углепластиков, которые используют как самостоятельные конструкционные материалы, так и в качестве заготовок для получения УУКМ) могут подвергаться механической обработке: раскрой, формирование отверстий, пазов и т.д. Эти методы имеют свои недостатки, наиболее неприятный из которых – образование большого количества углеродной пыли, а следовательно, чрезвычайно вредные условия труда.

Стремление повысить физико-химические и механические характеристики углеродных материалов стимулирует поиск нетрадиционных подходов к разработке новых технологий их получения и обработки. Одним из таких подходов является использование мощных технологических лазеров для модификации поверхности углеродных композитов. Реализуемая при этом существенная неравновесность условий определяет особенности протекания процессов графитации и диффузионного перераспределения углерода в зонах лазерного воздействия.

С практической точки зрения использование лазерного излучения может позволить контролируемым образом изменять физические, химические и механические свойства поверхности изделий из углеродных материалов, а также применять лазерное излучение для раскроя углеродных материалов и нанесения на них защитных покрытий.

В настоящей работе на основе проведённых авторами исследований обсуждаются возможности и перспективы использования лазерного излучения для улучшения физико-механических и химических характеристик УУКМ.

### **Материалы и методика эксперимента**

В качестве исследуемых материалов использовались двухмерноармированные углепластики и углерод - углеродные композиты

с наполнителем из углеродной ткани «Урал».

В экспериментах по резке углеродных тканей использовались ткани УТ - 900, ТНУ-4 и «Урал», толщиной 3,35 мм, 1,6 мм и 0,45 мм соответственно.

Для раскроя углепластиков и УУКМ применялись технологические CO<sub>2</sub> – лазеры (длина волны излучения  $\lambda = 10,6$  мкм), работающие в непрерывном (максимальная мощность излучения  $P = 1500$  Вт) и импульсно-периодическом (максимальная средняя мощность  $P = 1000$  Вт) режиме излучения, а также твердотельные лазерные установки «Квант – 15» с длиной волны излучения 1,06 мкм (импульсно-периодический режим излучения с максимальной частотой следования импульсов 10 Гц и максимальной энергией в импульсе 8 Дж) и непрерывный YAG:Nd-лазер ЛТН-103 (длина волны излучения  $\lambda = 1,06$  мкм, максимальная мощность излучения  $P = 150$  Вт).

Источником лазерного излучения в процессе термообработки служили непрерывный YAG:Nd-лазер ЛТН-103 и технологический CO<sub>2</sub> – лазер в непрерывном режиме излучения.

Для нанесения покрытий использовался технологический CO<sub>2</sub> – лазер.

Методика лазерной резки углепластиков и УУКМ, термообработки УУКМ и нанесения защитных покрытий на эти материалы подробно описана в работах [3-9].

Структурно-фазовый состав зон лазерного воздействия изучался методом рентгеновского фазового анализа на дифрактометре Дрон-3.

Визуальный анализ поверхности образцов, измерение зоны термического воздействия и микротвёрдости нанесённых покрытий проводились с помощью оптического металлографического микроскопа Neophot-30 и микротвердомера ПМТ-3.

### **Экспериментальные результаты и их обсуждение**

#### *Лазерная резка углеродных композиционных материалов*

Основными характеристиками лазерного раскроя являются ширина и глубина реза, качество формируемых кромок, ширина зоны

термического влияния (ЗТВ).

Проблемы, возникающие при резке углеродных материалов, не присущи металлическим сплавам и связаны с физическими свойствами углерода как вещества. Во-первых, углерод при нормальном давлении не плавится, поэтому основным механизмом лазерного раскроя углеродных материалов является механизм испарения. Во-вторых, температура испарения углерода очень высока, что обуславливает значительную ЗТВ.

В научной литературе процессы лазерной резки волокнистых углеродных композитов, видимо из-за специфики их основного использования, освещены довольно скромно. Причём касаются эти работы резки углепластиков [3-5, 10]. Авторы работы [10] приводят результаты, которые, в основном, совпадают с результатами наших работ [3, 4].

Главным недостатком раскроя углепластиков непрерывным лазерным излучением является образование значительной по размерам зоны термического влияния, которая при малых скоростях резки (менее  $10 \text{ мм}\cdot\text{с}^{-1}$ ) приближается к 3 мм [3, 4]. И хотя размеры ЗТВ при лазерном раскрое УУКМ значительно меньше, чем при раскрое углепластиков [5], возникшие термические напряжения могут привести к снижению механических характеристик материала. Использование для раскроя углепластиков импульсно-периодического излучения снижает ЗТВ, по крайней мере, на порядок (до 0,3-0,5 мм) [3, 4]. При резке УУКМ импульсно-периодическим лазерным излучением ЗТВ не превышает 0,2-0,25 мм [5].

Основным недостатком раскроя углекомпозитов излучением импульсно-периодического лазера с малой частотой следования импульсов ("Квант-15") является очень низкая скорость резки. Так, при энергии импульса 8 Дж скорость резки углепластика и УУКМ толщиной 3,5 мм составила  $1 \text{ мм}\cdot\text{с}^{-1}$ . Увеличение скорости резки излучением импульсно-периодических лазеров возможно только при увеличении частоты следования импульсов. В этом случае можно получать качественныерезы при скорости, сопоставимой со скоростью резки непрерывным излу-

чением, но при существенно меньшей зоне термического воздействия.

Можно предложить простой практический способ оценки параметров лазерной резки рассматриваемых материалов.

Для разрезания углеродного композита сфокусированным лазерным пучком диаметром 0,4-0,5 мм со скоростью 5 мм/с необходимо 150 Вт мощности излучения на каждый мм толщины материала.

Для данной толщины материала при увеличении скорости резки необходимо пропорциональное увеличение мощности.

Оценки справедливы для материалов толщиной, по крайней мере, до 6 мм.

Для лазерного раскроя углекомпозитов предпочтительнее использовать газовые  $\text{CO}_2$  – лазеры из-за меньшего поглощения излучения с длиной волны 10,6 мкм стенками канала реза.

Общей особенностью ЗТВ для всех тканей (как и для углекомпозитов) является наличие пироуглерода на стенках реза, который производит "заварку" кромок и препятствует их махрению. Кромки реза ровные. Величина ЗТВ незначительна и не превышает 0,1-0,2 мм.

Высокое качество реза, полученное в проведённых экспериментах, позволяет утверждать, что применение лазерного излучения для раскроя углеродных тканей является наиболее перспективным и эффективным методом раскроя тканей на основе углеродных волокон.

Основные результаты экспериментов по раскрое углеродных тканей приведены в табл. 1.

#### ***Термическая обработка УУКМ лазерным излучением***

Эффективность использования лазерного излучения для термообработки УУКМ, в отличие от раскроя, неочевидна.

В процессе лазерной обработки создаются условия воздействия, кардинально отличающиеся от условий традиционной термообработки:

- любые температуры на поверхности материала;

**Таблица 1.** Основные характеристики лазерного раскроя углеродных тканей

Тип ткани.	Толщина ткани, мм	Мощность P, Вт	Скорость v, мм·с <sup>-1</sup>	Колич. слоев	Глубина реза, мм	Ширина ЗТВ, мм
УТ – 900	3,36	110	1,8	1	2,25	≤0,2
ТНУ – 4	1,6	110	5,2	2	3,2	≤0,1
Урал	0,45	80	8,1	1	0,45	-
Урал	0,45	110	6,1	4	1,8	-

- большой градиент температур и вызванный им градиент давлений по глубине зоны термического воздействия;

- локальность обработки.

Поверхностный характер и локальность лазерного воздействия являются как достоинством, так и недостатком лазерной обработки, так как не позволяют провести обработку всего объёма изделий, имеющих большую толщину и неизбежно вызывают неоднородность структурно-фазового состава обработанного материала по толщине.

Таким образом, в нашем случае лазерная обработка позволяет:

- создать на поверхности изделия слой материала с изменённым по отношению к основной массе структурно-фазовым составом, что может изменить физико-механические и химические свойства всего изделия;

- на промежуточной стадии изготовления изделий изменить пористую структуру материала (увеличить открытую пористость) и тем самым изменить условия последующих циклов обработки материала.

Лазерная обработка УУКМ ведёт к графитации материала в зоне лазерного воздействия и к увеличению стойкости обработанного материала от 1,5 до 10 раз в кислородсодержащих газовых средах при высоких температурах [6-8]. Увеличение стойкости УУКМ в кислородсодержащих средах зависит от типа исходных компонентов, технологии создания материала и обусловлено, в первую очередь, структурно-фазовыми изменениями углеродной матрицы в процессе лазерной термообработки. Глубина зоны лазерного воздействия определяется параметрами обработки и достигает 3 мм [8].

Как показали наши работы, лазерную

термообработку можно осуществлять и без создания защитной атмосферы, в воздушной среде.

Глубина ЗТВ существенным образом зависит от среды обработки. Наибольшая глубина обработки при прочих равных параметрах достигается в вакууме. Заметим, что глубина обработки в нашем случае характеризуется границей структурно-фазовых превращений, приводящих к увеличению окислительной стойкости материала.

Рентгеновская дифрактометрия показывает, что для образцов, обработанных в разных газовых средах и вакууме наблюдаются схожие структурно-фазовые изменения: увеличивается интенсивность I пиков отражений (002) и (004), соответствующих гексагональному графиту, и появляются новые фазы. Интенсивность пиков зависит от плотности мощности q, которая определяет температуру обрабатываемой поверхности: при увеличении q увеличивается I [6-8]. В нашем случае можно утверждать, что изменение интенсивности пика связано с изменением количества новой фазы (или нескольких фаз) в обработанном материале. Это отчётливо видно по образцам, обработанным в вакууме: при одинаковой глубине структурных преобразований интенсивность пиков меняется в 1,6 раза в зависимости от режима обработки.

Появление линий графита (100), (101), (110) и (112), соответствующих косым плоскостям рентгеновского отражения указывает на трёхмерную упорядоченность, характерную для структуры гексагонального графита. В некоторых случаях указанные линии для каждой фазы чётко разделить без математической обработки не удаётся.

По рефлексам (002) и (004) можно сле-

лать вывод, что в структуре материала появляются графитовые фазы с межплоскостным расстоянием  $d_{002}=3,42\text{ \AA}$ ,  $d_{002}=3,41\text{ \AA}$ , а также фаза с  $d_{002}=3,37\text{ \AA}$ , то есть со структурой высокоупорядоченного искусственного графита.

Кроме того, на дифрактограммах большинства обработанных образцов можно выделить линии (101) и (012), соответствующие ромбоэдрической модификации графита.

Результаты послойного анализа показывают, что индикация указанных фаз на дифрактограммах, снятых с поверхности плоских образцов возможна потому, что фазы образуются и сосуществуют в исследуемом слое одновременно, меняется лишь их количественное соотношение в зависимости от температуры воздействия и расстояния слоя от поверхности материала.

Отмеченные структурно-фазовые изменения оказывают влияние на механические свойства материала. Так, при двухсторонней обработке образцов в вакууме и аргоне и ЗТВ глубиной 1 мм открытая пористость возрастает на 2-2,5%. Аналогичная обработка в воздушной среде увеличивает пористость на 7%. При этом отмечается снижение модуля упругости материала на 10%. Снижение модуля упругости связано, скорее всего, с потерей массы при обработке (3,5-4,5% в вакууме, аргоне и гелии; до 11% в воздушной среде).

### **Формирование защитных покрытий на УУКМ методом лазерной наплавки**

Появление мощных технологических лазерных установок предоставило возможность использовать преимущества лазерного излучения для нанесения покрытий на широкий класс материалов. Лазерное нанесение покрытий может быть осуществлено различными методами: напылением, наплавкой, лазерной обработкой покрытий, нанесённых другими способами [11,12]. Но если процессы лазерного нанесения покрытий на металлы и металлические сплавы в определённой степени изучены, то данные по использованию лазерного излучения для нанесения жаростойких покрытий на углеграфитовые материалы отсутствуют.

В качестве основы для создания защитных жаростойких покрытий были выбраны карбид кремния SiC и дисилицид молибдена MoSi<sub>2</sub>, что объясняется их высокой стойкостью в окислительных средах при высоких температурах.

Наиболее приемлемым методом нанесения на УУКМ покрытий из SiC и MoSi<sub>2</sub> с помощью лазерного излучения является метод лазерной наплавки порошков, содержащих смеси исходных компонентов образующихся соединений.

Для получения покрытий, содержащих SiC и MoSi<sub>2</sub>, использовались механические смеси порошкового кремния с размером зёрен не более 63 мкм и мелкодисперсного углерода (сажа), а также порошков кремния и молибдена с размером зёрен не более 63 мкм. Закрепление смеси порошков на углеродной подложке осуществлялось связующими веществами.

Нанесение на УУКМ покрытия из карбида кремния возможно только при использовании смеси, содержащей свободный кремний, так как SiC не плавится и начинает разлагаться при температуре 2700 °С. Фактически, применённый нами метод нанесения покрытий, содержащих большое количество SiC, - это метод реакционного образования тугоплавких соединений через жидкую фазу по крайней мере одного из исходных компонентов, в нашем случае – кремния. Образование жидкой фазы является обязательным при лазерной обработке порошковых смесей, так как спекание порошкового слоя не обеспечивает необходимой плотности и прочности сцепления покрытия с защищаемым материалом.

Эксперименты показали, что качество образующегося покрытия зависит не только от параметров лазерной обработки, но и от толщины шликерного слоя. Ровные и сплошные покрытия образовывались при толщине шликера меньше 0,3 мм.

Верхняя граница покрытия достаточно ровная и гладкая. Нижняя граница резко очерчена и повторяет рельеф поверхности образца. Часть расплава затекает в трещины и поры на поверхности УУКМ. Глубина затекания достигает 250 мкм и тем больше, чем выше

интенсивность лазерного излучения и меньше скорость обработки.

Оптимальные режимы обработки шликерного слоя разного состава круглым пятном приведены в табл.2.

Нужно отметить, что область оптимальных режимов зависит от толщины шликерного слоя. Необходимость использования малых скоростей связана с увеличением времени воздействия лазерного излучения на слой шликера, в результате чего увеличивается площадь расплава, время взаимодействия между расплавом и материалом подложки, а также глубина затекания расплава в поры и трещины на поверхности образца. Ширина оплавленного слоя при малых  $v$  практически равна эффективному диаметру сфокусированного лазерного луча. Ширина оплавленного слоя, имеющего хорошее сцепление с подложкой, значительно меньше эффективного диаметра и при увеличении скорости обработки уменьшается.

Обработка шликера пятном круглой формы имеет два существенных недостатка. Во-первых, изменение  $q$  по диаметру пятна вызывает значительные градиенты температур по ширине зоны термического воздействия и, вследствие этого, неудовлетворительное сцепление краёв зоны оплава с подложкой. Этот недостаток отчасти может быть устранён увеличением зоны перекрытия расположенных рядом проходов, которая в наших экспериментах составляла 0,3 эффективного диаметра пятна фокусировки. Второй недостаток более серьёзен и является следствием первого. Под действием периферийных участков лазерного пучка, недостаточного для полного проплавления присадочного матери-

ала, происходит разложение связующего вещества рядом с наплавленным слоем и затягивание частиц порошка в формируемый валик силами поверхностного натяжения. Указанное явление затрудняет наплавку соседнего валика, так как требуется восстановление шликерного слоя. Устранить этот эффект можно уменьшением толщины шликера и добавкой в шихту термостойких веществ, таких как графит или тугоплавкие керамики. Другой способ повышения качества наплавки – использование лазерного пятна прямоугольной формы с выровненным распределением интенсивности по ширине пятна.

Изучение наплавленных покрытий методом оптической микроскопии показало, что толщина однослойного покрытия на различных участках образца может отличаться в 3-4 раза. Различия в толщине покрытия связаны с неоднородностью шликерного слоя по толщине, с затеканием расплава в поры подложки и неравномерным испарением наплавленного материала в процессе лазерной обработки. Затекание расплава в трещины и поры подложки благоприятно сказывается на прочности сцепления покрытия с основой. Пористость покрытий низкая и зависит от содержания углерода в исходной шихте. Покрытия имеют двухфазную структуру. Одна фаза имеет более тёмный цвет, другая – более светлый. Измерения микротвёрдости светлых участков показали значение 9,12 ГПа, что хорошо согласуется с известными данными о микротвёрдости кремния. Микротвёрдость тёмных участков значительно выше и находится в пределах от 23 ГПа до 35 ГПа, что соответствует микротвёрдости SiC. Кристаллы SiC имеют вытянутую форму и

**Таблица 2.** Оптимальные режимы обработки шликерного слоя с различным содержанием кремния и углерода круглым пятном

Состав смеси, вес %	Толщина шликера, мм	$q$ , Вт·см <sup>-2</sup>	Диаметр пятна, мм	$v$ , мм·с <sup>-1</sup>
Si – 85% C – 15%	0,25 – 0,3	1400 - 2000	6,5 – 7,6	2 – 2,7
Si – 90% C – 10%	0,25 – 0,3	1400 - 2100	6,4 – 7,6	2 – 2,7
Si – 95% C – 5%	0,15 – 0,3	1500 - 2200	6,5 – 7,5	2 – 3

ориентированы по направлению к подложке. Содержание SiC зависит от весового содержания углерода в исходной смеси и равно 16-18% при содержании углерода 5%, 30 - 35% при содержании углерода 10% и 68-76% при содержании углерода 15%. Рентгеноструктурный анализ подтвердил наличие в покрытии двух фаз – Si и  $\beta$  - SiC.

Увеличение содержания углерода в исходной шихте приводит к увеличению пористости покрытия, которая может достигать 30%. С этой точки зрения оптимальным является содержания углерода 12 – 13%, которое позволяет получать в покрытии до 60% SiC с минимальной пористостью. Вследствие ухудшения текучести расплава с добавками углерода ухудшается прочность сцепления покрытия с подложкой. Для устранения этого нежелательного явления на образцы предварительно наносился слой кремния толщиной до 100 мкм. Нанесение кремниевого подслоя уменьшило количество пор на границе между покрытием и подложкой и увеличило прочность сцепления покрытия с основным материалом. Прочность сцепления однофазного покрытия из чистого кремния и двухфазного покрытия Si – SiC с УУКМ очень высокая. При сдвиге отрыв покрытия происходит по основному материалу, а не по границе раздела покрытие – основа.

Один из основных недостатков лазерной наплавки защитных покрытий на УУКМ – образование трещин в наплавленном слое. Причин образования трещин несколько. К ним относятся различие коэффициентов термического расширения подложки и покрытия, наличие концентраторов напряжений на поверхности подложки, быстрое охлаждение наплавленного слоя и основного материала. Полностью устранить все трещины при многопроходной наплавке очень сложно, так как многократный нагрев соседних валиков и нижележащих слоёв при наплавке очередного слоя увеличивает вероятность образования трещин. Однако существенно снизить вероятность их образования можно, например, добавочным подогревом изделия при лазерной обработке.

Защитные свойства покрытий изучались при нагреве образцов с покрытием SiC – Si в

электрической печи при температуре 1000 °С в статической атмосфере воздуха. Потери массы образцов с покрытием толщиной 300 мкм составили 30% за 3 часа нагрева. Материал без покрытия (обработанный лазерным излучением) полностью разрушился за 2 часа нагрева.

Основной причиной окисления образца с покрытием является проникновение кислорода через трещины и поры покрытия к поверхности УУКМ. В результате окисления углерода поверхности происходит снижение прочности сцепления покрытия с подложкой и частичное отслоение покрытия.

Покрытия из дисилицида молибдена обладают хорошей жаростойкостью до температуры 1700 °С. Традиционный способ нанесения силицидных покрытий – диффузионное силицирование молибдена. Для нанесения покрытий из MoSi<sub>2</sub> на УУКМ, как и в случае нанесения покрытий SiC – Si, был использован метод реакционного образования тугоплавких соединений в жидкой фазе при лазерной обработке механической смеси порошков Mo и Si. В этом случае в жидкой фазе находились оба исходных элемента.

Порошковая смесь наносилась на поверхность слоем 0,3 мм и обрабатывалась лазерным излучением интенсивностью  $(6,5-7,5) \times 10^3$  Вт·см<sup>-2</sup> со скоростью 2,3 мм·с<sup>-1</sup>. Толщина образующегося покрытия составляла 100-120 мкм. Можно отметить высокую прочность сцепления образующегося покрытия с основным материалом, которая обусловлена затеканием расплава в поры углекомполита.

При исследовании с помощью металлографического микроскопа в поляризованном свете в структуре покрытия можно различить три фазы. Количественное содержание этих фаз и размер их зёрен меняются в направлении, перпендикулярном направлению движения лазерного пучка. Вероятнее всего, это связано с наложением проходов при формировании покрытия и с повторным перепадом покрытия в месте наложения.

Рентгеновский анализ подтвердил наличие нескольких фаз в силицидных покрытиях. Установлено наличие в покрытии чистого Si,  $\beta$  - SiC и MoSi<sub>2</sub>. На рентгенограмме от-

сутствуют линии чистого молибдена. Основным недостатком образующегося силицидного покрытия также является наличие пор и трещин.

### Выводы

На основании проведённых экспериментов можно сделать следующие выводы.

Непрерывное и импульсно-периодическое лазерное излучение может быть эффективно использовано для резки углеродных композиционных материалов.

Использование для резки углекомпозитивов импульсно-периодического лазерного излучения позволяет существенно снизить или практически полностью исключить при малой частоте следования импульсов зону термического воздействия. Основным недостатком процесса резки импульсно-периодическим излучением при малой частоте следования импульсов является низкая скорость резки ( $1 \dots 2 \text{ мм} \cdot \text{с}^{-1}$ ). Перспективным вариантом является использование высокочастотного (более 100 Гц) лазерного излучения, что позволит получать качественный рез при скорости, сопоставимой со скоростью резки непрерывным излучением, но при существенно меньшей зоне термического воздействия.

Лазерное излучение является, по нашему мнению, наилучшим в настоящее время инструментом для раскроя углеродных тканей. При лазерной резке углеродных тканей не только отсутствует махрение кромок, но и происходит их “заварка” благодаря осаждению углерода, испарённого из зоны реза. Зона термического влияния практически отсутствует. Для резки углеродных тканей лазерным излучением можно использовать как непрерывные, так и импульсно-периодические лазеры с высокой частотой повторения импульсов.

Установлено, что процесс структурно-фазовых изменений при лазерной обработке УУКМ в воздушной среде, аргоне, гелии и вакууме происходит схожим образом с четко выраженной гетерогенностью. В структуре обработанного лазерным излучением материала кроме неупорядоченной углеродной фазы с  $d_{002} > 0,344 \text{ нм}$  образуется несколько углеродных фаз гексагонального и ромбоэдричес-

кого графита с различной степенью упорядоченности. Процесс графитации наиболее интенсивно протекает в диапазоне температур  $3000 \dots 4000 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Увеличение стойкости к воздействию кислородсодержащей газовой среды наблюдается для УУКМ, обработанных во всех газовых средах и вакууме.

Обработка УУКМ в вакууме при оптимальных режимах не изменяет макроструктуру поверхности материала в отличие от обработки в газовых средах. При этом глубина обработки УУКМ в вакууме сохраняется неизменной в более широких пределах параметров лазерного воздействия, чем в газовых средах.

Исходя из проведённых исследований можно сделать вывод, что наиболее оптимальной средой для лазерной термообработки УУКМ является низкий ( $10^{-1} - 10^{-2} \text{ мм рт.ст}$ ) вакуум. В этом случае обеспечивается защита обрабатываемого УУКМ от окисления, максимальная глубина обработки, высокая степень структурно-фазовых изменений, увеличение стойкости обработанного материала к воздействию кислородсодержащей газовой среды и сохранение макроструктуры поверхности материала.

Метод лазерной наплавки может быть использован не только для нанесения покрытий на металлы и сплавы, но и на неплавящиеся углерод-углеродные композиционные материалы.

Экспериментально доказана возможность получения защитных покрытий из Si, кремнесвязанного SiC, а также Si – MoSi<sub>2</sub> – SiC. Прочность сцепления покрытий с материалом углеродной подложки определяется её пористостью и смачиваемостью расплавом покрытия. Прочность сцепления полученных покрытий с подложкой из УУКМ превосходит прочность на сдвиг основного материала.

Устранение пористости и трещин в покрытии является одной из главных задач при разработке технологии нанесения защитных покрытий на УУКМ методом лазерной наплавки.

Лазерная наплавка даёт возможность последующего применения других методов



нанесения покрытий, например, плазменного напыления, на наплавленный слой для увеличения их толщины и получения многослойных покрытий.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Гардымов Г.П., Мешков, Е.В. и др.* Композиционные материалы в ракетно-космическом аппаратостроении. СПб.: СпецЛит, 1999.
2. *Фиалков А.С.* Углерод, межслоевые соединения и композиты на его основе. М.: Аспект Пресс, 1997.
3. *Gureev D.M., Kuznetsov S.I., Petrov A.L.* Laser-Beam Pattern Cutting of Carbon-Based Composites // Journal of Russian Laser Research. 1999. V.20. №4.
4. *Гуреев Д.М., Кузнецов С.И., Петров А.Л.* Лазерный раскрой углеродных композиционных материалов // Известия Самарского научного центра РАН. 1999. №2.
5. *Kuznetsov S.I., Gureev D.M., Levin D.S., Petrov A.L.* Laser-beam pattern cutting of carbon-carbon composites // Proc. SPIE. 4/2002. Vol. 4644.
6. *Gureev D.M., Kuznetsov S.I., Petrov A.L.* Influence of Laser Treatment on Structure and Properties of Carbon-Carbon Composites // Proc. SPIE. 1998. V.3688.
7. *Гуреев Д.М., Кузнецов С.И., Петров А.Л.* Влияние лазерной обработки на структуру и свойства углерод-углеродных композиционных материалов // Известия Академии наук. Сер. Физическая. 1999. Т.63. №10.
8. *Gureev D.M., Kuznetsov S.I., Petrov A.L.* Changes in the Structure and Surface Properties of Carbon-Carbon Composites under the Action of Laser Radiation // Journal of Russian Laser Research. 2000. V.21. №3.
9. *Kuznetsov S.I., Gureev D.M., Petrov A.L.* Getting protective high-temperature coatings on carbon-carbon composites by means of laser beam // Proc. SPIE. 4/2002. Vol.4644.
10. *Верхотуров А.Д., Кузьменко Н.А.* Лазерная резка композиционных материалов // Физика и химия обработки материалов. 2002. №2.
11. *Рыкалин Н.Н., Углов А.А., Зуев И.В., Кокора А.Н.* Лазерная и электронно-лучевая обработка материалов. Справочник. М.: Машиностроение, 1985.
12. *У. Дьюли.* Лазерная технология и анализ материалов. М.: Мир, 1986.

#### **SURFACE MODIFICATION AND CUTTING OF CARBON COMPOSITES AND CARBON FABRICS UNDER THE ACTION OF LASER RADIATION**

© 2003 S.I. Kuznetsov, A.L. Petrov

Samara Branch of Physics Institute named for P.N. Lebedev  
of Russian Academy of Sciences

The main features of use of laser radiation for a surface modification and cutting of carbon composites and carbon fabrics were considered. The effect of laser treatment in air, argon, helium and vacuum on microstructure of a carbon fabric reinforced carbon/carbon composite with non-graphitising carbon matrix was investigated by X-ray diffraction. The change of microstructure of carbon composite after laser treatment was characterized by appearance of hexagonal and rhombohedral graphite phases. The percentage contents of graphite phases depend on parameters of laser processing. An experimental investigations of getting of protective high temperature coatings on carbon/carbon composites by means of laser cladding were accomplished. The reactionary formation of coatings was investigated during laser melting of powders Si - C and Si - Mo. The optimum parameters of processing, structures and thickness of protective layers were determined. The main features of laser-beam pattern cutting by pulse-recurrent and continuous – wave laser radiation of carbon plastics, carbon/carbon composites and carbon fabrics were analyzed. It is shown that the use of pulse-recurrent laser radiation for cutting of carbon composites allows essentially to lower or completely exclude a thermal-influence zone and improve quality of cutting. Laser method is the best for cutting of carbon fabrics.