

- Щетинков, Е.С. Физика горения газов / Е.С. Щетинков. – Москва: Наука, 1965. – 476 с.
- Нинбург, А.К. Газопламенная обработка металлов с использованием газов-заменителей ацетилена / А.К. Нинбург. – Москва: Машиностроение, 1976. – 152 с.
- Белый, В.А. Полимерные покрытия / В.А. Белый, В.А. Довгало, О.Р. Юркевич. – Минск, 1976. – 416 с.
- Способ нанесения покрытия порошком термопластичного полимера: пат. 8528 Респ. Беларусь, МПК В 05 D 1/08 / М.А. Белоцерковский, А.В. Голопятин, М.А. Леванцевич, А.М. Гоман; заявитель ИМИНМАШ НАН Беларуси. – № а 20040210; заявл. 16.03.2004; опубл. 30.10.2006.
- Способ получения коррозионностойкого покрытия: пат. 18329 Респ. Беларусь, МПК В05В 7/20 / М.А. Белоцерковский, В.В. Рудый, А.С. Прядко, В.В. Дук, А.В. Сосновский, В.В. Крейнин; заявитель ИМИНМАШ НАН Беларуси. – № а 20120916; заявл. 12.06.2012; опубл. 10.03.2014.
- Малышев, В.Н. Особенности формирования покрытий методом анодно-катодного микродугового оксидирования / В.Н. Малышев // Защита металлов. – 1996. – Т. 32, № 6. – С. 662–667.
- Басинюк, В.Л. Разработка технологии и применение многослойных комбинированных покрытий на основе оксидокерамики / В.Л. Басинюк, М.А. Белоцерковский // Трение и износ. – 2003. – Т. 24, № 2. – С. 203–209.
- Белоцерковский, М.А. Структурные аномалии в стальных газотермических покрытиях и возможности их использования / М.А. Белоцерковский // Упрочняющие технологии и покрытия (РФ). – 2008. – № 10. – С. 39–44.
- Кукареко, В.А. Влияние ионно-лучевого азотирования на структурно-фазовое состояние и триботехнические свойства экономичных газотермических покрытий из проволоочных сталей различных классов / В.А. Кукареко, А.В. Белый, М.А. Белоцерковский, А.Н. Григорчик // Трение и износ. – 2013. – Т. 34, № 6. – С. 621–627.

Материал поступил в редакцию 09.01.15

BELOTSEKOVSKY M.A. Influence of the ratio of gases forming the torch in thermal spraying processes on coatings properties

Results on the effect the amount of oxidant and propane in thermal torch on the properties of spraying coatings are given. It has been shown that it is expedient to change the composition of the combustible mixture during the process.

УДК: 535.14+621.373.826

Лещик С.Д., Зноско К.Ф., Калугин Ю.К.

ИССЛЕДОВАНИЕ ЧАСТИЦ, ГЕНЕРИРОВАННЫХ ЛАЗЕРНОЙ АБЛЯЦИЕЙ ТВЕРДЫХ ТЕЛ В ЖИДКОСТИ

Введение. Эффективные методы получения наночастиц в настоящее время представляют значительный практический интерес. Такой интерес обусловлен тем, что наноразмерные объекты зачастую по своим свойствам отличаются от микро- и макроскопических объектов из того же материала [1]. Это позволяет создавать объекты с иными свойствами из тех же самых атомов. Другой важный фактор заключается в том, что из всего числа атомов доля, находящаяся на поверхности наночастицы, велика. При этом может меняться взаимодействие атомов как между собой, так и с внешней средой. В настоящее время наноматериалы применяются в медицине, машиностроении, электронике. Зачастую это суспензии на основе различных жидкостей. Несомненно, практический интерес представляют методы генерации наночастиц непосредственно в заданной жидкой среде. Одним из таких методов является импульсная лазерная абляция (ИЛА) твердофазных материалов в жидкости. Технологические возможности современных лазерных установок позволяют обеспечить точную дозировку излучения по энергии в импульсе и длительности импульса, что дает широкие возможности применения процесса лазерной абляции в медицине, научной сфере, промышленности. При этом с целью получения наночастиц из того же вещества, что и мишень, следует подбирать жидкость таким образом, чтобы исключить их взаимодействие в процессе абляции. Не менее важна при этом воспроизводимость характеристик частиц, а также возможность контроля и регулирования процесса их получения. Рядом авторов изучалась абляция металлов (золото, серебро, медь, латунь, железо) в жидкостях оптически прозрачных в видимом диапазоне (дистиллированная вода, спирт, ацетон и др.) [2–5]. В меньшей степени в литературе нашли отражение вопросы абляции неметаллических материалов [6, 7] и моделирования процессов абляции [8, 9]. Данные о влиянии технологических параметров про-

цесса абляции на характеристики образующихся частиц встречаются мало и не систематизированы. Все это обосновывает актуальность разработки теоретических и технологических основ формирования наноструктур методом импульсной лазерной абляции твердофазных материалов в жидких средах. Целью данной работы явилось исследование частиц, полученных методом лазерной абляции твердофазных материалов в жидких средах в режиме наносекундных импульсов.

Материалы, методы и техника эксперимента. В качестве материала мишени использовали графит марки МГ-1 ОСЧ по ТУ 48-20-90-82, промышленный политетрафторэтилен (ПТФЭ) марки Ф-4 по ГОСТ 10007-80. Для обеспечения равномерного воздействия лазерного излучения на поверхность мишени шероховатость образцов обеспечивали не хуже R_a 1,6 мкм.

В качестве жидкости, в которой находились образцы при проведении абляции, использовали дистиллированную воду и этанол (96%).

Для проведения абляции твердофазных веществ в жидкости использовали установку, принципиальная схема которой приведена на рисунке 1. Лазерное излучение от ND:YAG лазера с модулированной добротностью резонатора фирмы «LOTIS TII», расположенного на горизонтальном экспериментальном столе, проходило через плоскопараллельную пластину и попадало на призму полного внутреннего отражения, после которой направлялось вертикально вниз. Предварительно фокусируясь линзой, излучение лазера вводилось в кювету с жидкостью, в которую помещен образец (мишень). Кювета располагалась на столике, который имел возможность перемещаться как в вертикальном направлении, так и в горизонтальной плоскости. С его помощью, при необходимости, можно управлять положением кюветы и оптимальным расположением образца относительно лазерного луча как в автоматическом режиме, так и вручную.

Лещик Сергей Дмитриевич, к.т.н., доцент, зав. кафедры машиноведения и технической эксплуатации автомобилей УО «Гродненский государственный университет имени Янки Купаль».

Зноско Казимир Францевич, доцент кафедры лазерной физики и спектроскопии УО «Гродненский государственный университет имени Янки Купаль».

Калугин Юрий Константинович, доцент кафедры машиноведения и технической эксплуатации автомобилей УО «Гродненский государственный университет имени Янки Купаль».

Беларусь, ГрГУ им. Я. Купаль, 230023, г. Гродно, ул. Э. Ожешки, 22.

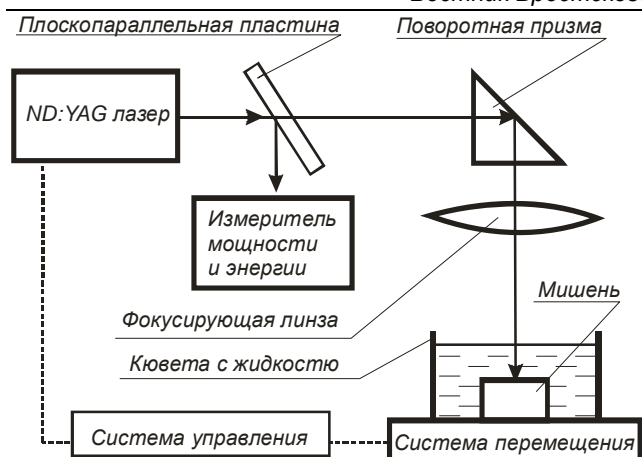


Рис. 1. Схема установки для проведения импульсной лазерной абляции твердофазных веществ в жидкости

Абляцию проводили излучением неодимового лазера LS-2147 с длиной волны равной 1064 нм, 532 нм и 355 нм. Частота импульсов составляла 1...10 Гц. Энергия в импульсе варьировалась от 15 до 130 мДж. Длительность импульсов составляла 30 нс (16 нс на полувысоте импульса). Для указанных режимов лазерного воздействия мишень располагали на глубине в 6 мм под поверхностью жидкости, фокусное расстояние собирающей линзы для лазерного излучения составляло 200 мм, что как показано в работе [10], позволяет получить достаточную воспроизводимость результатов экспериментов. Лазерное излучение фокусировалось на поверхности мишени в пятно диаметром порядка 10–20 мкм.

Исследования размерных характеристик частиц, генерированных лазерной абляцией твердых тел в жидкости, проводили с использованием атомно-силового микроскопа NT-206. При исследовании продуктов абляции подготовка образцов представляла собой нанесение полученной при абляции суспензии на поверхность кварцевого стекла с последующим высушиванием (при необходимости процедура повторялась несколько раз). Сканирование проводили на воздухе при нормальных условиях и комнатной температуре с использованием кантилевера CSC 38/AIBS жесткостью 0,03 Н/м. Визуализация результатов производилась в виде полунумерных фотографий (белый цвет соответствует более высоким участкам топографии поверхности).

Изучение морфологии поверхности мишени после воздействия лазерного излучения производили с помощью метода оптической микроскопии.

Спектры оптической плотности образцов в области 200–1000 нм были получены при использовании спектрофотометра Specord-200 (CarlZeiss, Германия).

Исследование состава продуктов ИЛА в жидкостях проводили методами инфракрасной (ИК) спектроскопии и спектроскопии гигантского комбинационного рассеяния (ГКР). Для получения ИК-спектров использовали ИК-Фурье спектрометр TENSOR 27 фирмы Bruker (Германия). Для возбуждения люминесценции и гигантского комбинационного рассеяния использовали Ar лазер ILA-120 на длине волны, равной 488 нм, мощностью 15 мВт. При этом регистрация спектров осуществлялась на спектрометре ДФС-52 (ЛОМО, Россия). Усиление сигнала комбинационного рассеяния производили за счет применения в качестве платформ для ГКР золь-гель материалов и нанопленки золота на стеклянной подложке, полученной вакуумным напылением с последующим отжигом. Измерения спектров проводились при комнатной температуре (~300 К).

Для оценки достоверности полученных результатов исследований и выводов использовались методы планирования экспериментов. Обработку экспериментальных данных и соответствующие расчеты выполняли на ЭВМ на основе стандартных программ.

Абляция графита. Как показывают исследования методом атомно-силовой микроскопии, с точки зрения морфологии частиц продукты абляции графита в этаноле не имеют принципиальных отличий в сравнении с наноструктурами, полученными при абляции этой же мишени в дистиллированной воде. Кроме того, изображения, полученные для частиц из суспензий, сформированных при

различных режимах абляции в воде и этаноле, качественно не отличаются. Исследуемые наноструктуры представляют собой частицы или конгломераты частиц размером преимущественно от 20 до 100 нм. Ранее установлено [10], что при абляции в воде с увеличением энергии в импульсе в диапазоне от 20 мДж до 125 мДж при постоянной длине волны лазерного излучения размер наночастиц возрастает, а также при уменьшении длины волны лазерного излучения в ряду значений 1064 нм, 532 нм, 355 нм и постоянной энергии в импульсе размер образующихся частиц увеличивается. Указанные зависимости справедливы и по отношению к размерным характеристикам продуктов абляции графита в этаноле. Однако при абляции в этаноле доля частиц, приходящихся на максимум распределения, практически в два раза меньше, чем при абляции в воде, т.е. функция распределения частиц по размеру имеет более пологий вид (рис. 2). Таким образом, при абляции в этаноле при прочих равных условиях разброс по размеру основной массы частиц больше, чем при абляции в воде, а пик кривой распределения смещается сторону увеличения размеров.

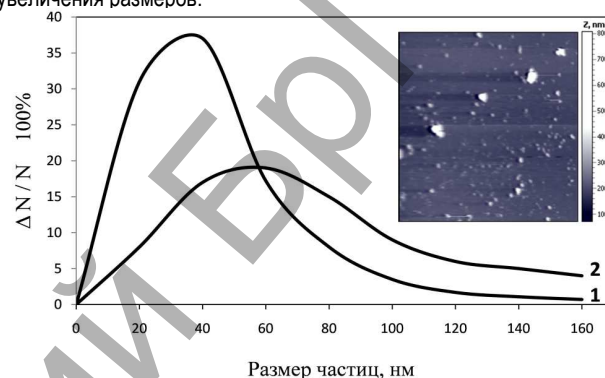


Рис. 2. Распределение по размеру и характерное изображение частиц (поле сканирования 30×30 мкм), полученных при лазерной абляции графита в воде (1) и этаноле (2) излучением с длиной волны равной 532 нм и энергией в импульсе 60 мДж

Для изучения состава продуктов абляции графита была применена рамановская спектроскопия (спектроскопия гигантского комбинационного рассеяния). Установлено наличие в спектрах G-полосы в области 1580 см⁻¹, характерной для графита, а также D-полосы в области 1300 см⁻¹, характерной для структуры алмаза. На полученных спектрах D- и G-полосы имеют сдвиг относительно полос высокоупорядоченных структур графита и алмаза (D- и G-полосы на 1332 см⁻¹ и 1581 см⁻¹ соответственно). Кроме того, наблюдаются уширенные полосы. Названные особенности спектров указывают на образование так называемой микрокристаллической формы графита. Сдвиг полос для микрокристаллических форм углерода проявляется сильнее при уменьшении размеров частиц [1]. Имеется размытая полоса в области 2700–3000 см⁻¹, что также характерно для различных кристаллических форм углерода. Кроме того, для образцов, полученных абляцией мишени в этаноле, в области 520 см⁻¹, 770 см⁻¹, 1248 см⁻¹, 1489 см⁻¹, 1630 см⁻¹ имеются полосы, характерные для фуллерена C₆₀ (рис. 3).

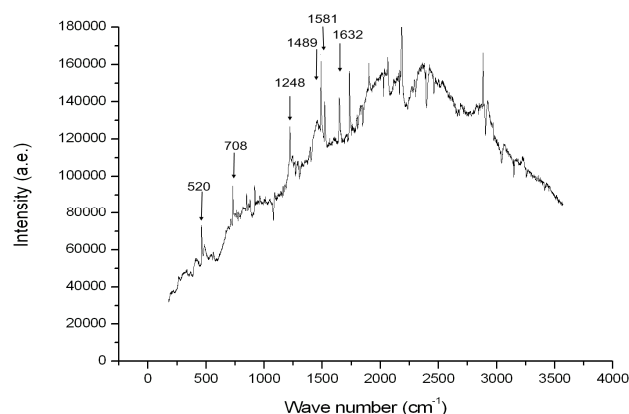


Рис. 3. Рамановский спектр продуктов абляции графита в этаноле

Таким образом, абляция графитовой мишени в воде и этаноле приводит к образованию наноструктур свойственных графиту, алмазу, фуллерену с размером частиц преимущественно до 100 нм.

Абляция политетрафторэтилена. Ввиду того, что при абляции полимеров может происходить полное разрушение исходного материала, первоочередной задачей является оценка того, в какой мере происходит деструкция, карбонизация, образование летучих соединений, присутствуют ли в продуктах абляции фрагменты макромолекул и частицы исходного полимера и т.д. При выявлении, например, 100% деструкции полимерного материала необходимо подбирать другие режимы абляции. Для решения указанной задачи могут быть использованы как прямые методы (спектроскопия), так и косвенные, например, изучение поверхности мишени. Так, при воздействии на мишень из политетрафторэтилена, находящуюся под слоем жидкости, единичными или несколькими импульсами лазерного излучения образуется кратер размером порядка 10 микрометров в диаметре (рис. 4а). Форма кратера не является круглой, хоть и близкой к этому, повидимому в силу неравновесности процесса, а также влияния строения полимера и шероховатости поверхности. После серии порядка 1000 импульсов наблюдается «разбивание» кратера до 30-35 мкм (рис. 4б). Описанная картина характера как при проведении абляции в воде, так и в этаноле.

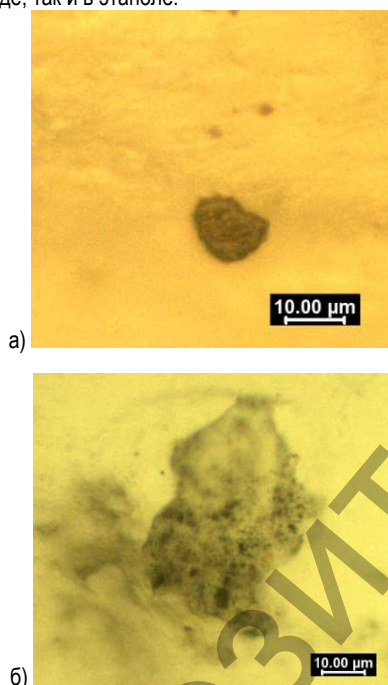


Рис. 4. Изображения поверхности образцов ПЭТФ после импульсного лазерного воздействия (мишень располагалась в дистиллированной воде)

Полимер вокруг кратера приобретает лишь незначительный желтый оттенок, что может свидетельствовать также о незначительной карбонизации материала близлежащих областей из-за возможной термической деструкции материала мишени. Дно кратера также имеет желтый оттенок с несколько большим потемнением. Таким образом, можно предположить, что лазерное излучение, помимо неизбежного термического разложения части материала, приводит к деструкции основной цепи макромолекул полимера с образованием низкомолекулярных соединений, а также к выносу частиц исходного материала с поверхности из-за возникающих термоупругих напряжений, вызванных внешним энергетическим воздействием [9, 11]. Испаренные фрагменты молекул образуют абляционный факел. Вместе с газовым потоком уносятся продукты абляции, которые задерживаются жидкостью образуя суспензию [6].

Данные по размерным характеристикам частиц полученных абляцией политетрафторэтилена в этаноле, хорошо коррелируют с данными, полученными ранее [11] для абляции в дистиллированной

воде (рис. 5). Увеличение энергетического воздействия путем перехода длины волны лазерного излучения из видимой области в ближний ультрафиолет или увеличением энергии в импульсе приводит к образованию более крупных частиц.

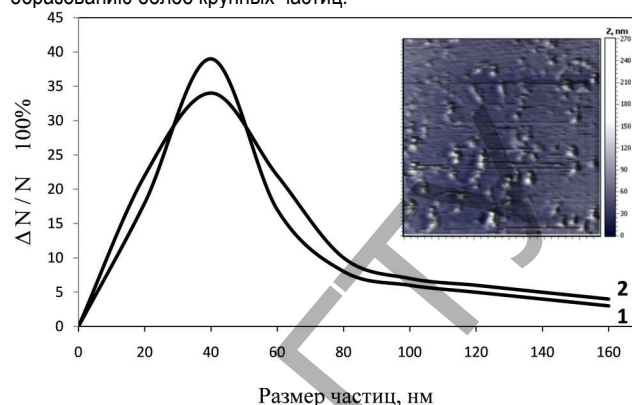


Рис. 5. Распределение по размеру и характерное изображение частиц (поле сканирования 18×18 мкм), полученных при лазерной абляции политетрафторэтилена в воде (1) и этаноле (2) излучением с длиной волны равным 532 нм и энергией в импульсе 60 мДж

При сравнении полос поглощения в ИК-спектрах (рис. 6) исходного ПТФЭ и суспензий, образовавшихся при лазерной абляции в воде и этаноле, наблюдается резкое уменьшение (вплоть до исчезновения) интенсивности полос исходного полимера в области 1211 и 1154 см⁻¹ (валентные колебания CF₂-групп), и появление весьма слабых по интенсивности полос, указывающих на образование различных продуктов деструкции основных цепей полимера при нагреве выше точки плавления. Так, бесструктурный размытый пик поглощения в области 1780-1620 см⁻¹ может свидетельствовать об образовании разветвленных макромолекул, двойных связей в концевых группах и т.п.: -FC=CF- (1730, 1717 см⁻¹), -CF=CF₂ (1786, 1778 см⁻¹), >C=CF₂ (1750 см⁻¹), -FC=C< (1671 см⁻¹) [12]. Есть основания предполагать, что при абляции не происходит полного разрушения молекулярной цепи политетрафторэтилена. По всей видимости, суспензия содержит частицы полимерного материала различной молекулярной массы нано-, субмикронного и микронного размерного уровня, образовавшиеся преимущественно выносом материала с поверхности мишени в результате абляционных микровзрывов.

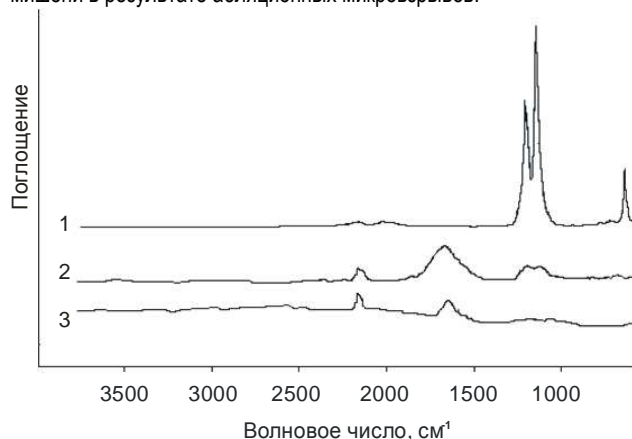
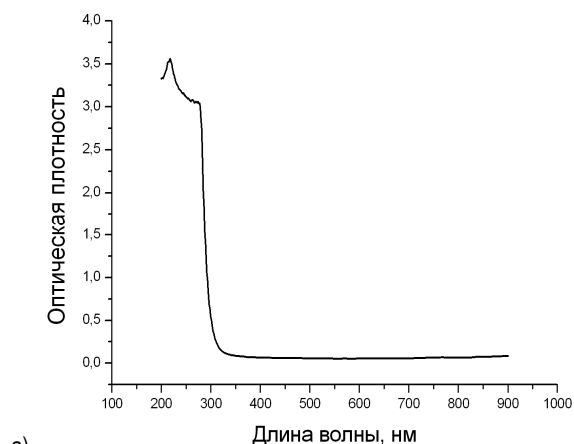


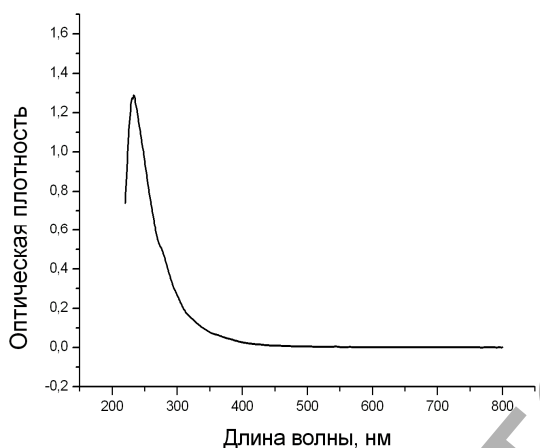
Рис. 6. ИК-спектры исходного политетрафторэтилена (1) и продуктов его абляции в воде (2) и этаноле (3)

На спектрах оптической плотности суспензий политетрафторэтилена как в воде, так и в спирте присутствуют полосы в области 200 нм и выше (рис. 7). Такое поглощение для исходного материала связывают исключительно с дефектами в цепи полимера, возникающими в процессе синтеза, а для материала, подвергнутого внешнему энерге-

тическому воздействию – деструкцией основной полимерной цепи. Наблюдаемая полоса в области 230 нм может свидетельствовать о наличии фторуглеродных и пероксидных радикалов. Уширение пика поглощения с захватом области 273 нм (рис. 7б), наблюдаемое в водных суспензиях, можно связать с поглощением образовавшихся при данных условиях фрагментов цепи с C=O группой.



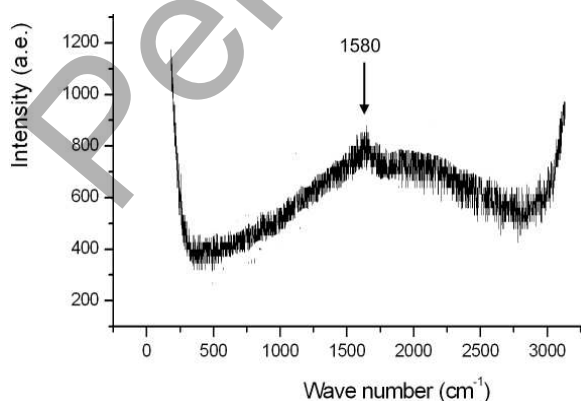
а)



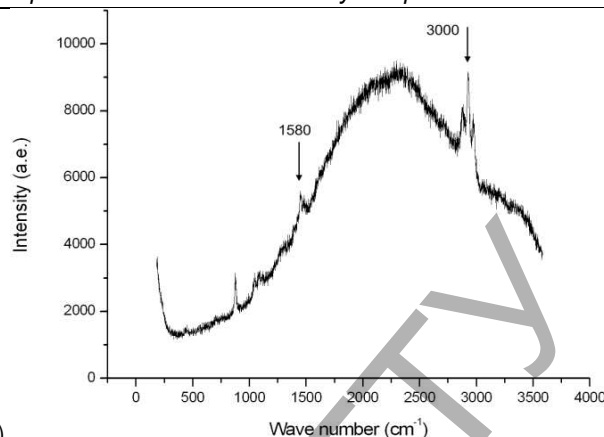
б)

Рис. 7. Спектры поглощения водной (а) и спиртовой (б) суспензий, полученных при абляции политетрафторэтилена импульсным лазерным излучением с длиной волны 532 нм и энергией в импульсе 60 мДж

На рамановских спектрах водных суспензий, полученных при абляции ПТФЭ, наблюдается появление размытых бесструктурных полос с максимумом в области 1580-1590 см^{-1} (рис. 8а). В спиртовых суспензиях зафиксированы полосы в области 1580-1590 см^{-1} и 2800-3000 см^{-1} (рис. 8б). Появление таких полос в спектрах ГРП можно интерпретировать как графитизацию углерода, восстанавливаемого из цепей макромолекул в результате их термического разрушения.



а)



б)

Рис. 8. Спектры ГРП (возбуждение лазером на длине волны 488 нм) водной (а) и спиртовой (б) суспензии, полученной при абляции ПТФЭ

Анализ спектров комбинационного рассеяния и спектров поглощения суспензий, полученных при различных режимах лазерного воздействия в диапазоне энергий в импульсе от 20 мДж до 130 мДж и длинах волн лазерного излучения, которым проводилась абляция, равным 355 нм, 532 нм и 1064 нм, не выявил ярко выраженных отличий, что может свидетельствовать о том, что изменение режимов в указанных пределах не оказывает существенного влияния на состав продуктов абляции политетрафторэтилена.

Заключение. Методами атомно-силовой микроскопии и рамановской спектроскопии исследованы продукты абляции графита в дистиллированной воде и этаноле. Установлено, что при абляции графита в жидкой среде излучением с энергией в импульсе порядка десятков миллиджоулей и на длинах волн 355 нм, 532 нм и 1064 нм образуются суспензии, содержащие частицы со средним размером 40-60 нм. Показано, что возможно образование продуктов абляции по своей структуре схожих с микрокристаллическим графитом, алмазом, фуллереном.

Установлено, что частицы, полученные в результате абляции политетрафторэтилена как в воде, так и в этаноле представляют собой продукты термического разложения полимера, низкомолекулярные продукты деструкции основных цепей полимера различного строения и фрагменты исходного материала в виде частиц размером преимущественно до 100 нм. Ярко выраженных различий в спектрах комбинационного рассеяния и спектрах поглощения суспензий, полученных при различных режимах абляции политетрафторэтилена, не наблюдается.

Работа выполнена в рамках задания 2.3.11. Государственной программы научных исследований «Функциональные и композиционные материалы, наноматериалы».

СПИСОК ЦИТИРОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Поул, Ч. Нанотехнологии / Ч. Поул – мл., Ф. Оуэнс. – Москва: Техносфера, 2006. – 336 с.
2. Казакевич, П.В. Образование наночастиц меди и латуни при лазерной абляции в жидкости / П.В. Казакевич [и др.] // Квантовая электроника. – 2004. – Т. 34, № 10. – С. 951–956.
3. Симакин, А.В. Образование наночастиц при лазерной абляции твердых тел в жидкостях / А.В. Симакин [и др.] // Труды института общей физики им. А.М. Прохорова. – 2004. – Том 64. – С. 83–107.
4. Казакевич, В.С. Влияние физико-химических свойств жидкости на процессы лазерной абляции и фрагментации наночастиц Au в изолированном объеме / С.В. Казакевич [и др.] // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2012. – Т. 14, № 4. – С. 64–69.
5. Сухов, И.А. Генерация наночастиц при лазерной абляции железной мишени в жидкости / И.А. Сухов [и др.] // Квантовая электроника. – 2012. – Т. 42, №5. – С. 453–456.
6. Голодков, О.Н. Влияние гамма-облучения на лазерную абляцию поликетона / О.Н. Голодков [и др.] // Взаимодействие излучения с

- твердым телом: материалы 10-й Междунар. конф., Минск, 24-27 сентября 2013г. / М-во образования Респ. Беларусь [и др.]: ред. кол.: В.М. Анищик (отв. ред.) [и др.]. – Минск: БГУ, 2013. – С. 24–26.
7. Гракович, П.Н. Лазерная абляция политетрафторэтилена / П.Н. Гракович [и др.] // Журнал Российского химического общества им. Д.И. Менделеева. – 2008. – Т. LII, № 3. – С. 97–105.
 8. Захаров, Л.А. Численное моделирование лазерной абляции металлов и полимеров при воздействии импульсами инфракрасного излучения: влияние начальной температуры образца / Вестник НГУ. Серия: Физика. – 2010. – Т. 5, выпуск 1. – С. 37–47.
 9. Булгаков, А.В. Синтез наноразмерных материалов при воздействии мощных потоков энергии на вещество / А.В. Булгаков [и др.]. – Новосибирск: Институт теплофизики СО РАН, 2009. – 462 с.
 10. Лещик, С.Д. Получение наночастиц лазерной абляцией твердых тел в жидкости в режиме наносекундных импульсов / С.Д. Лещик, К.Ф. Зноско, И.Г. Сергиенко, М.Ю. Серенко // Фундаментальные проблемы радиоэлектронного приборостроения: материалы междунар. науч.-техн. конф. INTERMATIC – 2014, Москва, 1–5 декабря 2014 г. / Российская академия наук; ред. кол.: А.С. Сигов (отв. ред.) [и др.]. – Москва: МГТУ МИРЭА, 2014. – Ч. 2. – С. 84–87.
 11. Лещик, С.Д. Получение наночастиц методом импульсной лазерной абляции политетрафторэтилена в жидкости и исследование их размерных характеристик / С.Д. Лещик, К.Ф. Зноско, П.И. Шупан, А.И. Волков // Новые технологии и материалы, автоматизация производства: материалы междунар. научно-техн. конф., Брест, 29–30 октября 2014 г. / М-во образования Респ. Беларусь; ред. кол.: А.В. Драган [и др.]. – Брест: БрГТУ, 2014. – С. 153–155.
 12. Игнатъева, Л.Н. ИК-спектроскопические исследования политетрафторэтилена и его модифицированных форм / Л.Н. Игнатъева, В.М. Бузник // Российский химический журнал. – 2008. – Т. LII, № 3. – С. 139–146.

Материал поступил в редакцию 15.12.14

LESHCHIK S.D., ZNOSKO K.F., KALUGIN Yu.K. Research of the particles generated by laser ablation of solid bodies in liquid

Particles obtained by laser ablation of graphite and polytetrafluoroethylene in water and ethanol were investigated. According to microscopy, the average particle size is 40–60 nm. By the method of Raman, IR and optical spectroscopy the composition of the particles was studied.

УДК 62.431

Кастрюк А.П., Дудан А.В., Вигерина Т.В.

ФРАКТОГРАФИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ИЗЛОМОВ ОБРАЗЦОВ С НАПЛАВЛЕННЫМИ ПОКРЫТИЯМИ, ПОЛУЧЕННЫХ В УСЛОВИЯХ ЦИКЛИЧЕСКОГО НАГРУЖЕНИЯ

Введение. При работе валы периодически нагружаются силами от давления газов и инерции от поступательно движущихся и вращающихся масс. Под действием циклических напряжений в материале детали зарождаются и постепенно развиваются трещины, из-за которых может произойти излом детали. Это разрушение опасно тем, что оно происходит под действием напряжений, намного меньших предела текучести. Более 80 % всех случаев эксплуатационного разрушения валов происходит в результате циклического нагружения [1, 2].

Усталостная трещина зарождается в поверхностных слоях детали и затем развивается вглубь ее, образуя острый надрез. Распространение усталостной трещины обычно длительное, продолжающееся до тех пор, пока сечение не окажется столь малым, что действующие в нем напряжения достигнут разрушающих. Тогда происходит быстрое разрушение детали, как правило, хрупкое.

Работы И.А. Одина, В.В. Болотина, В.С. Ивановой, В.Ф. Терентьева, Е.К. Почтенного, Н.В. Олейника, Л.М. Школьника, В.Э. Завистовского и других исследователей большей частью посвящены развитию теории усталостной прочности изготовленных деталей. Модель механизма зарождения трещины в композиции «основа-покрытие» при циклическом нагружении предложена в работе [3], которая основана на предположении о том, что покрытие блокирует дислокации в поверхностном слое основного металла и стесняет развитие пластического деформирования. При нагружении источник дислокаций начинает их испускать. Граница «покрытие-основа» тормозит движение дислокаций, создавая локальные повышения их плотности. В микрообъеме материала, непосредственно прилегающем к границе, образуется скопление краевых дислокаций, причем они могут находиться на столь близком расстоянии друг от друга, что их экстраплоскости сливаются, вызывая появление растягивающих напряжений.

Если покрытие достаточно хрупкое, то растягивающие напряжения приводят к возникновению в покрытии микротрещин, распространяющихся в основной металл.

Согласно другим представлениям [4], появление трещин может

происходить непосредственно на наружной поверхности покрытия. Установлено, что даже на идеально гладких образцах при циклическом нагружении трещины появляются, прежде всего, на поверхности. Поверхность покрытия, обращенная к восстанавливаемой поверхности детали, играет роль источника трещин, так как на ней всегда имеются готовые концентраторы напряжений в виде пор, несплошностей, трещин, возникающих при напылении и наплавке. Имеются также рыхлые границы и между слоями и др.

Если покрытие наносит при высокой температуре, то в диффузионной зоне образуются фрагменты материала с повышенной плотностью дислокаций и вакансий. Перераспределение избыточных вакансий и их сток в определенных точках обуславливают появление микропор. Образующиеся в диффузионной зоне области растяжения и сжатия способствуют микропластическому деформированию основного металла и превращению микропор в трещину. Таким образом, нанесение покрытия в этом случае сопровождается повышением дефектности поверхностных слоев основного металла. Причем, чем больше упрочнено покрытие, т. е. чем больше оно склонно к хрупкому разрушению, тем опаснее становятся любые несплошности, поры и другие дефекты [4, 6].

Как правило, разрушение деталей машин происходит по нескольким одновременно или последовательно протекающим механизмам. Включение в работу того или иного механизма разрушения зависит от материала основы и покрытия, рабочей среды, режимов нагружения, схемы напряженно-деформационного состояния и др.

Основное условие сохранения и повышения усталостной прочности покрытий, нанесенных при восстановлении шеек валов, заключается в создании, как в наплавленном металле, так и в зоне термического влияния (ЗТВ) сжимающих напряжений. Существующие способы наплавки не обеспечивают выполнение этого условия, что приводит к снижению усталостной прочности валов, восстановленных с ее использованием, на 30–40 %. Отрицательное влияние на сопротивление усталости оказывают остаточные растягивающие напряжения, которые вызываются неоднородностью пластического

Кастрюк Александр Петрович, к.т.н., декан факультета машиностроения и автомобильного транспорта Полоцкого государственного университета.

Дудан Александр Витальевич, к.т.н., доцент кафедры автомобильного транспорта Полоцкого государственного университета.

Вигерина Татьяна Владимировна, к.т.н., доцент кафедры автомобильного транспорта Полоцкого государственного университета. 211440, Беларусь, г. Новополоцк Витебской обл., ул. Блохина, 29.