

*В.И. Букатый, А.А. Пономарев*  
**Взаимодействие мощного лазерного излучения  
 с пластмассами**

В последнее время большое распространение приобрели материалы, изготовленные из полимеров – таких соединений, молекулы которых представляют собой последовательность большого числа повторяющихся элементов [1]. Данные материалы обладают рядом преимуществ перед традиционными, что и обуславливает их широкое использование практически во всех областях деятельности человека – от зубопротезирования до авиационной и космической промышленности. В связи с этим создание новых полимеров либо модифицирование уже известных приобретает большую практическую ценность. Одним из способов решения данной задачи является использование лазерных технологий, при применении которых возможно направленное изменение структуры приповерхностных слоев [2]. Цель работы – определение пороговых характеристик мощного лазерного излучения, при взаимодействии которого с полимерами возникают необратимые изменения их структуры.

Используемый метод относится к калориметрическим, в котором для регистрации поглощенной мощности излучения фиксируются тепловые эффекты в образце [3; 4]. Периодический нагрев образца и окружающего его газа промодулированным звуковой частотой излучением приводит к возникновению акустических колебаний, регистрация которых производится высокочувствительными приемниками [5], в нашем случае – с помощью широкополосного конденсаторного микрофона. Излучение лазера, промодулированное звуковой частотой, проходит через окно оптико-акустической ячейки (ОАЯ) и частично поглощается в исследуемом образце [6]. В результате безызлучательных релаксационных переходов происходит периодический нагрев образца с частотой, равной частоте модуляции  $\omega$ . В процессе теплопередачи часть теплового потока передается окружающему газу, периодический нагрев которого приводит к изменению давления в ОАЯ, регистрируемому микрофоном. Согласно одномерной модели «акустического поршня» [3], образование оптико-акустического сигнала (ОАС) происходит, в основном, за счет действия нагревающегося от образца тонкого приповерхностного слоя газа толщиной  $2\pi l_T^f$ , где  $l_T^f$  – длина тепловой диф-

фузии в газе. Этот слой при периодическом тепловом расширении действует подобно поршню, вызывая изменение давления газа в ОАЯ.

Совместное решение уравнений теплопроводности и газовой динамики в рамках одномерной модели акустического поршня приводит к выражению для интенсивности ОАС [4]

$$J_{OAC} = \left| \frac{\gamma P q_0 A S (l_T^f)^2}{2\sqrt{2TV} \lambda_T} e^{i(\omega t - \frac{\pi}{4})} \right|,$$

где  $P, T, V$  – давление, температура газа и объем ОАЯ соответственно;  $h$  – толщина образца;

$l_T^0$  – длина тепловой диффузии в образце;

$l_T^f = \sqrt{2a/\omega}$ ;  $A$  – температуропроводность образца;  $\lambda_T$  – теплопроводности газа соответственно;

$\gamma$  – отношение теплоемкости газа при постоянных давлении  $C_p$  и объеме  $C_V$ ;  $q_0$  – плотность мощности лазерного излучения на образце;  $S$  – площадь зоны облучения.

Уравнение (1) не учитывает выделения или поглощения энергии за счет тепловых эффектов в физико-химических процессах, происходящих в материале, и может быть использовано для анализа и оценки ОАС в «инертном» веществе, в котором при лазерном нагреве не происходят эти процессы. В этом случае генерация звука обусловлена тепловым расширением нагреваемых участков материала и окружающего газового слоя, а оптико-акустическая кривая (ОАК) – зависимость  $J_{OAC}$  от  $q_0$  – носит линейный характер.

Получаемый оптико-акустическим методом энергетический спектр позволяет количественно определить пороговое значение  $q_0$ , качественно оценить интенсивность тепловых эффектов при протекании физико-химических процессов. Для изучения основных стадий и пороговых характеристик воздействия лазерного излучения на материалы был использован оптико-акустический метод, базирующийся на установленном факте изменения интенсивности акустического сигнала  $J_{OAC}$  вследствие физико-химических превращений в исследуемом образце. Эти пре-

вращения, сопровождающиеся экзо- или эндотермическим эффектом, приводят к отклонению от линейного закона оптико-акустической кривой, характеризующей зависимость  $J_{OAC}$  от  $q_0$ .

Исследования выполнялись с помощью непрерывного  $CO_2$ -лазера. В качестве основных характеристик излучения измерялись и рассчитывались энергетические характеристики: мощность лазера  $P_0$  и плотность мощности  $q_0$  на поверхности материала (измерялись после прохождения лазерным лучом оптической системы); пороговые значения плотности мощности излучения. Для регистрации энергетического спектра и определения пороговых характеристик взаимодействия лазерного излучения с материалами была создана установка, схема которой приведена на рисунке 1.

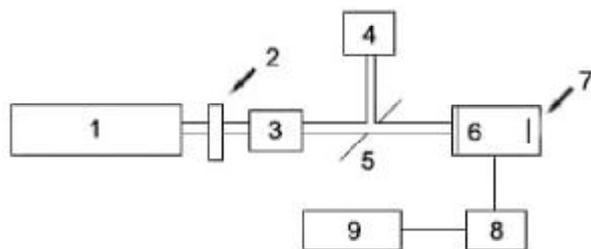


Рис. 1. Схема экспериментальной оптико-акустической установки:  
1 –  $CO_2$ -лазер; 2 – аттенюатор; 3 – блок регулировки плотности мощности; 4 – измеритель мощности ИМО-2; 5 – поворотное зеркало; 6 – оптико-акустическая ячейка; 7 – образец; 8 – усилитель; 9 – осциллограф

Излучение непрерывного  $CO_2$ -лазера 1, промодулированное аттенюатором 2, после оптической системы, состоящей из блока тонкой регулировки плотности мощности 3, попадает в оптико-акустическую ячейку 6, в которой находится образец 7. Колебания давления газа в оптико-акустической ячейке регистрируются микрофоном, сигнал с которого после прохождения усилителя 8 выводится на цифровой запоминающий осциллограф 9 типа С9-8. Оптическая система предназначена для задания требуемой плотности мощности лазерного излучения. Блок 3 тонкой регулировки плотности мощности представляет собой набор плоскопараллельных  $CsJ$  – пластин.

Исследования проводились в режиме дискретного сканирования  $q_0$ , позволяющего проследить временной ход ОАС как переходной функции на внешнее воздействие, и по виду ОАС определить пороговые характеристики деструкционного процесса. Полученные оптико-акустические диаграммы приведены на рисунках 2, 3.

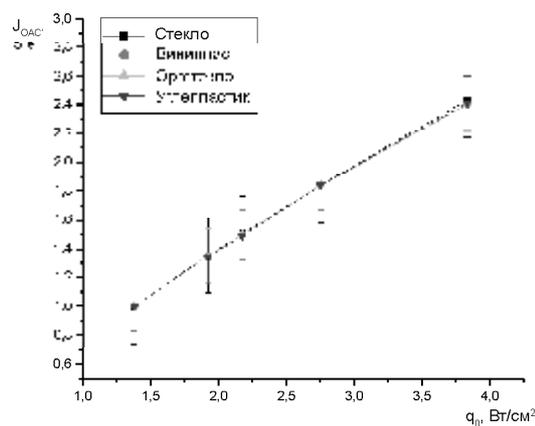


Рис. 2. Оптико-акустическая диаграмма (начальный участок)

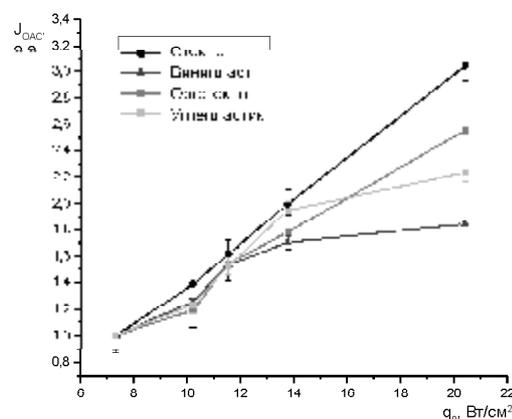


Рис. 3. Оптико-акустическая диаграмма (конечный участок)

Интерпретировать данные диаграммы можно следующим образом: первой стадии  $0 \leq q_0 \leq 7,3 \text{ Вт/см}^2$  соответствует линейный участок ОА-кривой, характеризующий упругие колебания как отдельных фрагментов, так и всей полимерной системы. Линейная зависимость  $J_{OAC}$  от  $q_0$  показывает, что вследствие малости  $q_0$  образец не аккумулирует количество тепла, необходимое и достаточное для начала деструкционных процессов. Воздействие лазерного излучения не приводит к изменению агрегатного состояния полимерной системы, а генерация звука обусловлена тепловым расширением участков материала, нагреваемых излучением, и теплопередачей в газовом слое. С увеличением плотности мощности  $q_0$  (вторая стадия процесса (рис. 3)  $7,3 \leq q_0 \leq 20,4 \text{ Вт/см}^2$ ) возрастает суммарное количество тепла, выделяющееся в облучаемой зоне материала. ОА-кривая на этой стадии носит сложный характер. Вторая стадия характеризуется наличием экзо- и эндотермических эффектов. Дальнейшее повышение  $q_0$  приводит

к быстрому образованию конденсированной структуры (типа пироуглерода). ОА-кривая выходит на линейный участок. Дальнейший линейный характер кривой обусловлен тепловым расширением и, вследствие этого, термоупругими колебаниями образовавшейся конденсированной структуры.

В ходе экспериментальных исследований обнаружено, что при плотности мощности лазерного излучения в интервале от 0 до 7,3 Вт/см<sup>2</sup> оптико-акустический сигнал для всех исследуемых материалов имеет линейную зависимость, что свидетельствует об отсутствии протекания в данных материалах процессов разрушения. При превышении энергетического порога ( $q_0 \geq 7,3 \text{ Вт/см}^2$ ) начинаются деструкционные процессы, различные для исследуемых материалов.

Была изучена динамика деструкционного процесса и получены зависимости, позволяющие определить пороговые характеристики воздействия мощного лазерного излучения на полимеры.

Также проведены эксперименты по лазерной резке изучаемых полимеров, представленных выше. Для этого разработали и изготовили установку, изображенную на рисунке 4.

Для достижения наилучших параметров лазерной резки было подобрано оптимальное расстояние от линзы до образца (рис. 5).

Из графиков на рисунках 6, 7 видно, что наилучшие параметры реза достигаются при расстоянии между линзой и материалом  $L=7,6 \text{ см}$ .

Неизменность ширины реза вдоль волокон можно объяснить тем, что структура углепластика вдоль армирующих волокон изотропна и обладает одинаковым коэффициентом поглощения, вследствие чего воздействие мощного лазерного излучения в данном направлении протека-

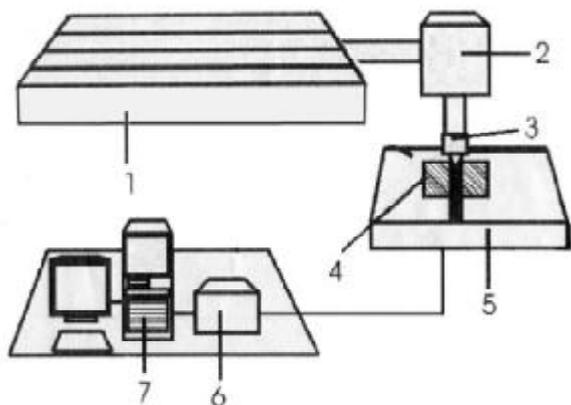


Рис. 4. Схема экспериментальной установки:  
1 – CO<sub>2</sub>-лазер; 2 – оптико-механический блок;  
3 – собирающая линза; 4 – исследуемый образец;  
5 – двухкоординатный самописец; 6 – устройство сопряжения с компьютером; 7 – IBM PC

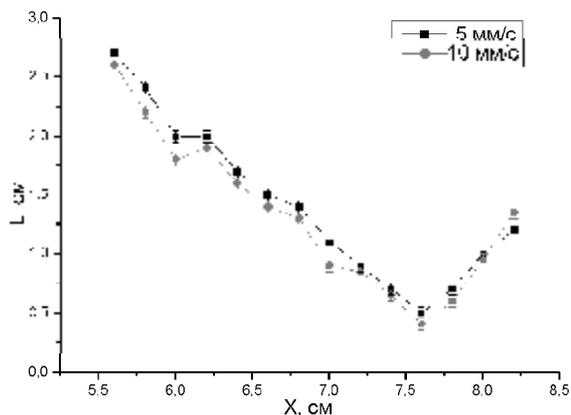


Рис. 5. Определение оптимального расстояния от линзы до образца

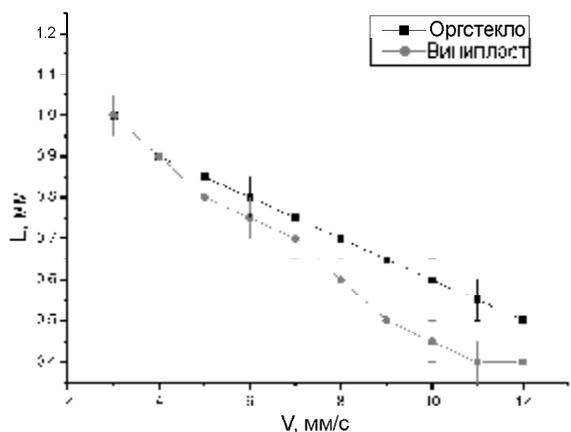


Рис. 6. Зависимость ширины реза от скорости перемещения сопла для оргстекла и винипласта

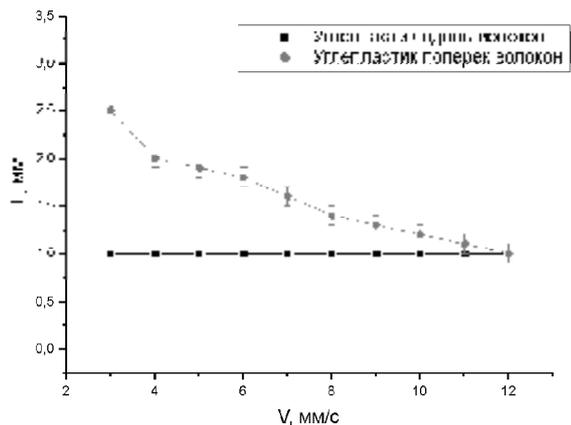


Рис. 7. Зависимость ширины реза от скорости перемещения сопла для углепластика

ет одинаково, вне зависимости от скорости перемещения сопла установки относительно материала.

## Литература

1. Энциклопедия полимеров / под ред. В.А. Каргина. Т. 1 : А-К. – М., 1972.
2. Абильситов Г.А. Мощные газоразрядные CO<sub>2</sub>-лазеры и их применение в технологии / Г.А. Абильситов, Е.П. Велихов и др. – М., 1984.
3. Жаров В.П. Лазерная оптико-акустическая спектроскопия / В.П. Жаров, В.С. Летохов. – М., 1984.
4. Виноградов Б.А. Лазерная деструкция полимеров. – Владивосток, 1995.
5. Справочник по лазерной технике : пер с нем. – М., 1991.
6. Агеев Б.Г. Нелинейная оптико-акустическая спектроскопия молекулярных газов / Б.Г. Агеев, Ю.Н. Пономарев, Б.А. Тихомиров. – Новосибирск, 1987.