

*В.И. Букатый, А.А. Пономарёв*

## **Взаимодействие мощного лазерного излучения с полимерами**

Полимеры – высокомолекулярные соединения, характеризующиеся молекулярной массой от нескольких тысяч до многих миллионов. Молекулы полимеров, называемые также макромолекулами, состоят из большого числа повторяющихся звеньев. Вследствие большой молекулярной массы макромолекул полимеры приобретают некоторые специфические свойства [1]. Полимеры играют большую роль в современной технике, а в некоторых областях являются незаменимыми, например, в космической промышленности. Данные материалы обладают рядом преимуществ перед традиционными, что и обуславливает их широкое использование. 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].

Используемый нами метод определения пороговых характеристик лазерного излучения при взаимодействии с полимерами 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  $2\pi l_T^r$ , где  $l_T^r$  – длина тепловой диффузии 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]. Это уравнение 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 превращения, 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.

Излучение непрерывного  $CO_2$ -лазера 1, промодулированное аттенуатором 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 предна-

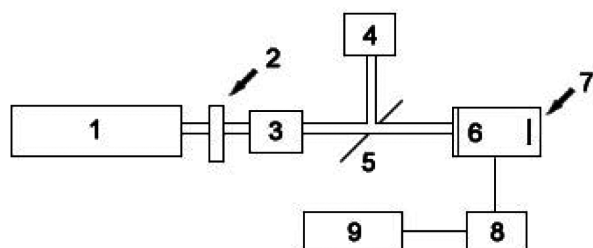


Рис. 1. Схема экспериментальной опико-акустической установки: 1 – CO<sub>2</sub>-лазер; 2 – аттенуатор; 3 – блок регулировки плотности мощности; 4 – измеритель мощности ИМО-2; 5 – поворотное зеркало; 6 – опико-акустическая ячейка; 7 – образец; 8 – усилитель; 9 – осциллограф

значена для задания требуемой плотности мощности лазерного излучения. Блок 3 тонкой регулировки плотности мощности представляет собой набор плоскопараллельных CsJ-пластин.

В настоящей работе 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 опико-акустические диаграммы можно интерпретировать следующим образом: первой стадии  $0 \leq q_0 \leq 7,3 \text{ Вт/см}^2$  соответствует линейный участок опико-акустической 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 посредством теплопередачи в газовом слое. С увеличением плотности мощности  $q_0$  (вторая стадия процесса  $7,3 \leq q_0 \leq 20,4 \text{ Вт/см}^2$ ) возрастает суммарное количество тепла, выделяющегося в облучаемой зоне материала. Опико-акустическая 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 нами было обнаружено, что при плотности мощности лазерного излучения в интервале от 0 до  $7,3 \text{ Вт/см}^2$  опико-акустический сигнал для всех исследуемых материалов имеет линейную зависимость, что свидетель-

ствует об отсутствии протекания в данных материалах процессов разрушения. При превышении энергетического порога ( $q_0 \leq 7,3 \text{ Вт/см}^2$ ) 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.

В ходе данной работы нами также были проведены эксперименты по лазерной резке изучаемых полимеров, представленных выше. Для этого нами была разработана и изготовлена установка, представленная на рисунке 2.

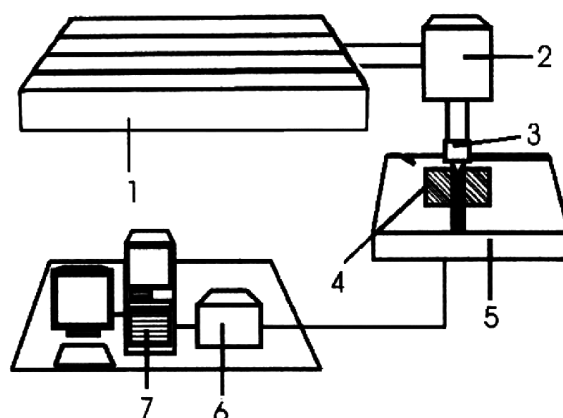


Рис. 2. Схема экспериментальной установки: 1 – CO<sub>2</sub>-лазер; 2 – опико-механический блок; 3 – собирающая линза; 4 – исследуемый образец; 5 – двухкоординатный самописец; 6 – устройство сопряжения с компьютером; 7 – IBM PC

Все представленные графики были получены при постоянной плотности мощности лазерного излучения  $P = 30 \text{ Вт/см}^2$ .

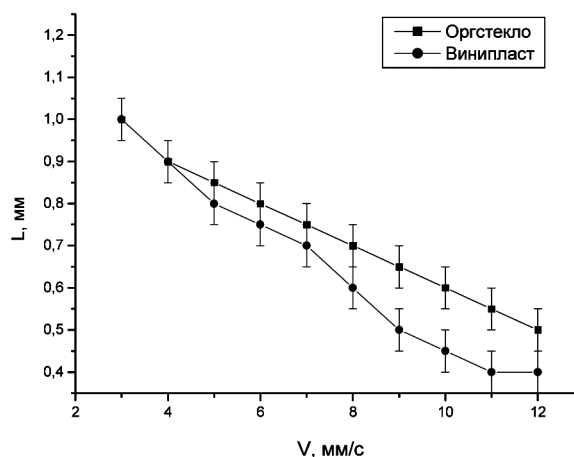


Рис. 3. Зависимость ширины реза от скорости перемещения сопла для оргстекла и винипласта

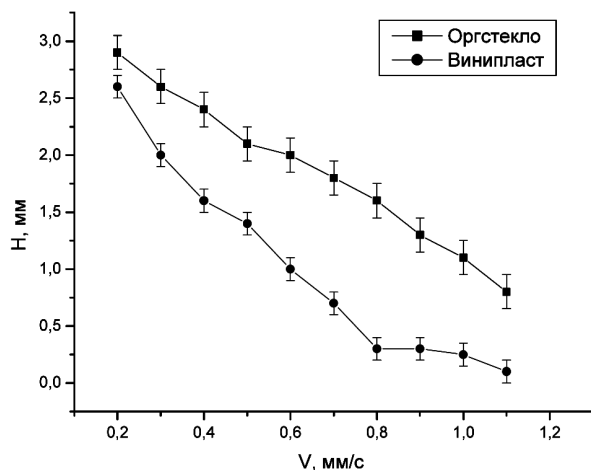


Рис. 4. Зависимость глубины реза от скорости перемещения сопла для оргстекла и винипласта

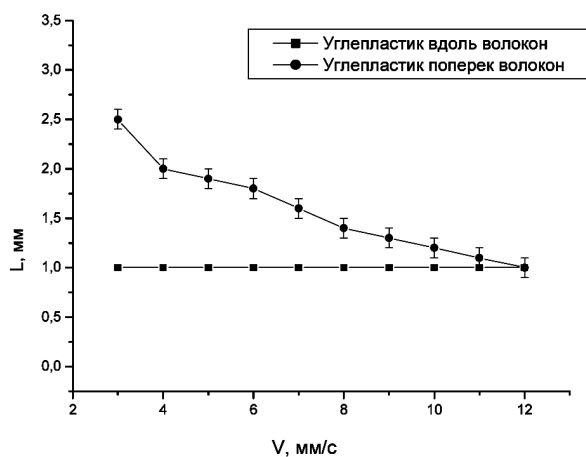


Рис. 5. Зависимость ширины реза от скорости перемещения сопла для углепластика

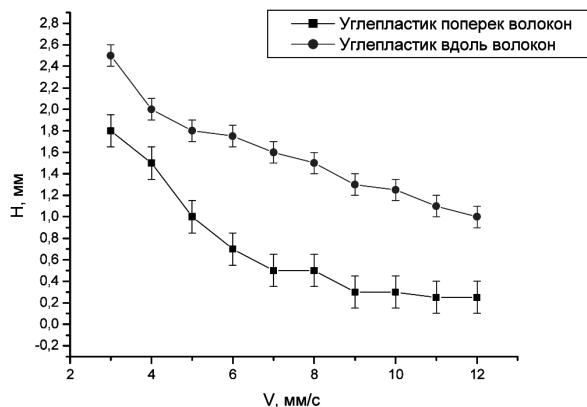


Рис. 6. Зависимость глубины реза от скорости перемещения сопла для углепластика

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

### Библиографический список

1. Энциклопедия полимеров. – Т. 1: А–К / Под ред. В.А. Каргина. – М., 1972.
2. Абильсиитов, Г.А. Мощные газоразрядные CO<sub>2</sub>-лазеры и их применение в технологии / Г.А. Абильсиитов, 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 / Б.А. Виноградов. – 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.