

УДК 535.36

В.И. Букатый,
В.О. Перфильев, А.А. Пономарёв

Взаимодействие мощного лазерного излучения с полимерами

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, начиная от зубопротезирования и заканчивая авиационной и космической промышленностью. 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 нами 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 ω . 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]

$$J_{OAC} = \left| \frac{\gamma P q_0 A S}{2\sqrt{2TV}} \cdot \frac{(l_T^r)^2}{\lambda_r} \cdot e^{i(\omega t - \frac{\pi}{4})} \right|, \quad (1)$$

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

l_T^0 – длина тепловой диффузии в образце;

$l_T = \sqrt{2a/\omega}$, a – температуропроводность образца; λ_r, λ_0 – теплопроводности газа и образца соответственно; γ – 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 превращения, сопровождающиеся экзо- или эндотермическим эффектом, приводят к отклонению от линейного закона оптико-акустической кри-

вой, 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.

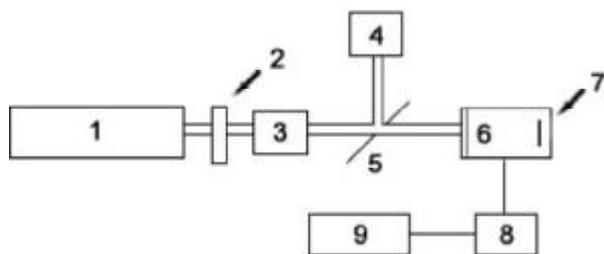


Рис. 1. Схема экспериментальной оптико-акустической установки: 1 – CO_2 -лазер; 2 – аттенюатор; 3 – блок регулировки плотности мощности; 4 – измеритель мощности ИМО-2; 5 – поворотное зеркало; 6 – оптико-акустическая ячейка; 7 – образец; 8 – усилитель; 9 – осциллограф

Излучение непрерывного CO_2 -лазера 1, промоделированное 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 (показатель преломления $n = 1,739$), которые устанавливались на пути лазерного луча.

В ходе данной работе нами исследовался оптико-акустический сигнал, характерный вид которого представлен на рисунке 2. Данный сигнал можно условно разделить на два этапа: 1) возрастание сигнала вследствие нагрева образца в результате воздействия лазерного импульса; 2) экспоненциальное убывание сигнала вследствие остывания образца в отсутствие импульса.

На рисунке 3 представлена динамика деструкционного процесса, проведенного для винипласта. В настоящей работе исследования

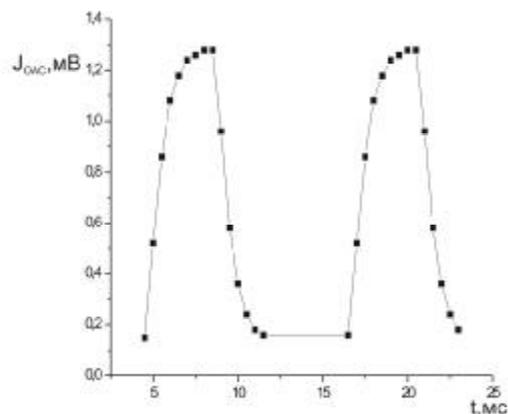


Рис. 2. Вид характерного ОА-сигнала

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.

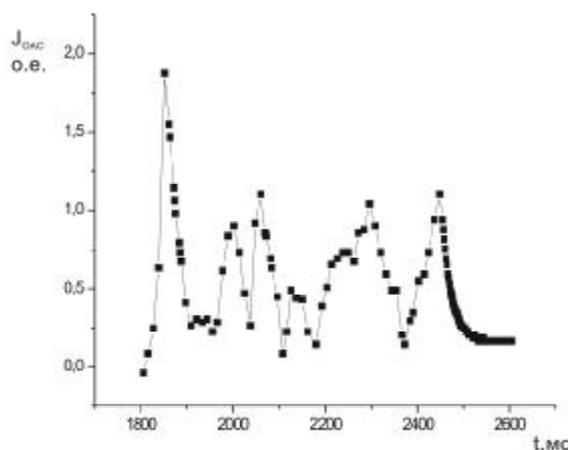


Рис. 3. Динамика деструкционного процесса в винипласте

Полученные оптико-акустические диаграммы приведены на рисунках 4, 5.

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, необходимого и достаточного 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 посред-

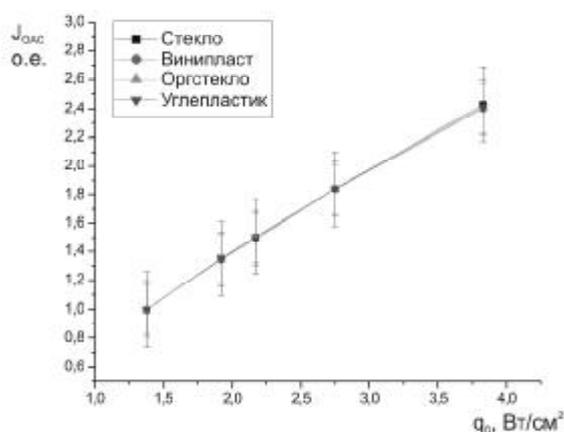


Рис. 4. Оптико-акустическая диаграмма (начальный участок)

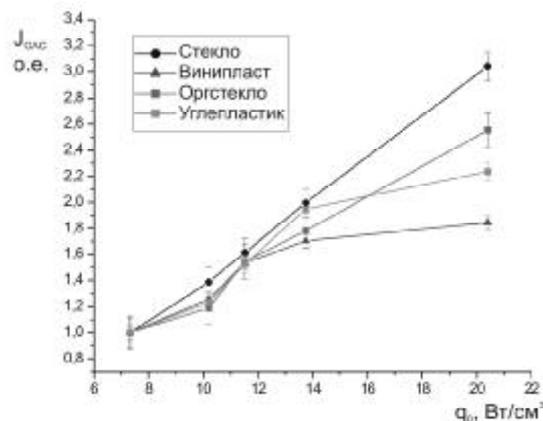


Рис. 5. Оптико-акустическая диаграмма (конечный участок)

ством теплопередачи в газовом слое. С увеличением плотности мощности q_0 (вторая стадия процесса (рис. 4) $7,3 \text{ J } q_0 \leq 20,4 \text{ Вт/см}^2$) 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 нами было обнаружено, что при плотности мощности лазерного излучения в интервале от 0 до $7,3 \text{ Вт/см}^2$ оптико-акустический сигнал для всех исследуемых нами материалов имеет линейную зависимость, что свидетельствует 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.

Литература

1. Энциклопедия полимеров / Под ред. В.А. Каргина. М., 1972. Т. 1.
2. Мощные лазеры и их применение. М., 1980.
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.