05;07;12

Оптическая прочность полимерных материалов при их лазерной абляционной деструкции

© Э.И. Воронина,[1] В.П. Ефремов,[2] В.Е. Привалов,[3] П.В. Чартий,[1] В.Г. Шеманин[1]

[1] Новороссийский политехнический институт Кубанского технологического университета,
353900 Новороссийск, Россия
e-mail: vshemanin@nbkstu.org.ru
[2] Институт теплофизики экстремальных состояний Объединенного интститута высоких температур РАН,
125412 Москва, Россия
e-mail: efremov@ihed.ras.ru
[3] Санкт-Петербургский государственный политехнический университет,
195251 Санкт-Петербург, Россия
e-mail: VEP-57@yandex.ru

(Поступило в Редакцию 16 апреля 2008 г.)

Экстремально исследована лазерная абляционная деструкция полиметилметакрилата, эпоксидного компаунда и стиросила. На лабораторной лазерной абляционной станции измерены значения пороговой плотности энергии этой деструкции для каждого образца. Заложены основы методики оценки и прогнозирования оптической прочности полимерных образцов на основе статистической модели процесса лазерной абляционной деструкции.

PACS: 42.62.-b

Результаты исследований лазерной абляционной деструкции (ЛАД) полимерных материалов под действием мощного лазерного излучения в [1] могут стать основой для разработки статистических методов оценки и прогнозирования оптической прочности или надежности таких образцов. Поэтому необходимо детальное изучение механизма и динамики лазерного абляционного плазмообразования на полимерной мишени в диапазоне плотности энергии лазерного импульса до 100 J/cm^2 для статистического описания самой ЛАД [2].

Целью настоящей работы являются экспериментальные исследования ЛАД полиметилметакрилата (ПММА), эпоксидного компаунда (ЭК) и стиросила и измерения на лабораторной лазерной абляционной станции значений пороговой плотности энергии этой деструкции для каждого образца. Эти результаты позволят разработать методику оценки и прогнозирования оптической прочности любых полимерных образцов на основе статистической модели процесса ЛАД.

Лабораторная лазерная абляционная станция была собрана на базе экспериментальной установки, детальное описание которой дано в [2–7]. Оптическая схема станции приведена на рис. 1. В этой станции излучение двух YAG: Nd-лазеров *1* и *2* с импульсами длительностью 10 ns и 100 μs и энергиями до 0.3 и 1.2 J на длине волны 1064 nm поворачивалось призмой *8* и фокусировалось специальным объективом *18* на поверхность полимерной мишени *21*. Для использования излучения лазера *2* дополнительно вводятся два поворотных зеркала *5* и *6*. Изменение плотности энергии лазерного импульса в диапазоне от 0.1 до 100 J/cm^2 достигалось как выбором фокусного расстояния объектива *18*, так и ослаблением калиброванными нейтральными светофильтрами *7*. Часть лазерного излучения лазера *1* на длине волны 1064 nm через ИК-светофильтр направлялась на фотодиод *3* типа ФД-24К и лазера *2* на той же длине волны направлялась на фотодиод *25* для контроля

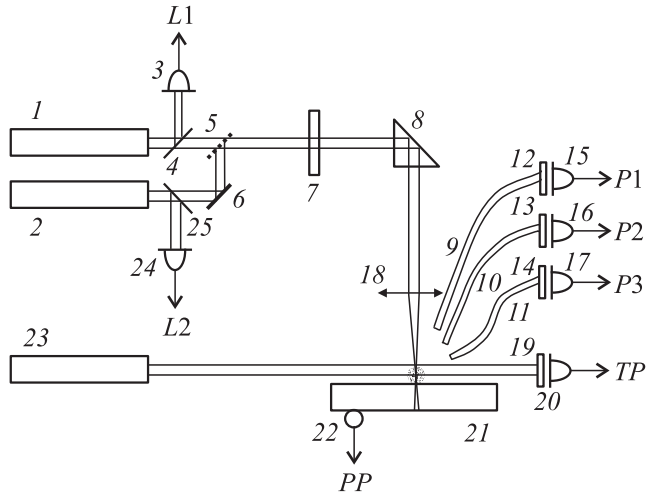

Рис. 1. Оптическая схема лабораторной лазерной абляционной станции: *1*, *2* — YAG–Nd-лазеры; *3*, *24* — фотодиоды; *4*, *25* — стеклянные пластины; *5*, *6* — глухие зеркала на 1064 nm, *7* — нейтральные светофильтры НС, *8* — поворотная призма; *9–11* — волоконные световоды; *12–14*, *19* — интерференционные светофильтры соответственно на 308, 532, 786 и 632.8 nm; *15–17*, *20* — ФЭУ-79; *18* — объектив; *21* — полимерная мишень; *22* — пьезодатчик, *23* — He–Ne-лазер. *P*1, *P*2, *P*3 — сигналы с ФЭУ (интенсивность свечения плазмы пробоя); *TP* сигнал с ФЭУ (прозрачность плазменного образования на длине волны 632.8 nm), *PP* — импульс давления; *L*1 и *L*2 – сигналы с фотодиодов (контроль энергии лазерного импульса и синхронизации работы всей станции).

энергии лазерного импульса и синхронизации работы станции [3]. Интенсивность собственного свечения плазмы регистрировалась фотоумножителями *15–17* типа ФЭУ-79 через световоды *9–11* и светофильтры *12–14* с максимумами на длинах волн 532, 308 и 720 nm [2–4,7]. Импульс давления на свободной поверхности образца измерялся пьезодатчиком *22* на основе пьезокерамики. Сам разлет плазменного факела над поверхностью мишени регистрировался по ослаблению излучения непрерывного He–Ne-лазера на длине волны 632.8 nm через светофильтр *19* фотоумножителем *20* типа ФЭУ-79. Сигналы со всех измерительных каналов $P1$, $P2$, $P3$ и TP регистрировались или запоминающим осциллографом С8-17 или через специальный контроллер [2–6] вводились в ПК типа IBM Pentium 4. Сигналы $L1$ или $L2$ использовались для запуска станции. Для обработки результатов измерений использовалось стандартное программное обеспечение.

Статистический подход для исследования ЛАД полимерных образцов позволяет построить кривую оптической прочности этих образцов при ЛАД в серии измерений вероятности пробоя для различных значений импульсной плотности энергии в одноимпульсном режиме облучения каждый раз новой точки поверхности [1]. Тогда вероятность ЛАД определяется дефектами на поверхности или в объеме образца и поэтому она может быть описана показательной функцией концентрации дефектов и площади области, подвергнутой воздействию лазерного излучения [2,3] с плотностью энергии F. Зная площадь воздействия луча лазера при ЛАД, можно определить концентрацию дефектов и затем вычислять вероятности ЛАД для фактического значения плотности энергии луча, используемого в лазерной станции.

Чтобы генерировать кривую вероятности ЛАД, необходимо сделать серию выстрелов при заданной энергии импульса и измерить число событий ЛАД. Устанавливая новое значение плотности энергии и повторяя процесс, возможно пройти весь диапазон значений вероятности ЛАД от 0 до 1. Если кривая вероятности ЛАД от плотности энергии на графике не получается гладкой, то это означает, что измеренных данных недостаточно или значения плотности энергии статистически неразличимы при заданной точности измерений.

На лабораторной станции были выполнены экспериментальные исследования зависимости вероятности пробоя от порогового уровня плотности энергии ЛАД при облучении поверхности мишени лазерными импульсами длительностью 10 ns для полимерных образцов из ПММА, эпоксидного компаунда и стиросила.

На рис. 2 в качестве примера приведен график зависимости вероятности ЛАД от плотности энергии лазерного импульса для образца из ПММА. Результаты измерений порогового уровня плотности энергии $F_{0.5}$ ЛАД при облучении поверхности мишени лазерными импульсами длительностью 10 ns для полимерных образцов из ПММА, эпоксидного компаунда и стиросила по зависимости вероятности пробоя, как на графике

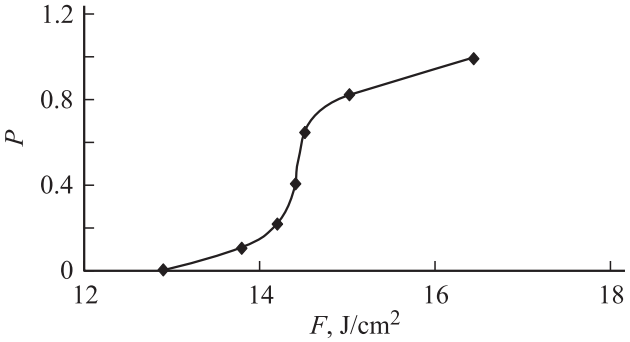

Рис. 2. График зависимости вероятности ЛАД P от плотности энергии F лазерного импульса на длине волны 1064 nm с длительностью 10 ns для образца из ПММА.

рис. 2, дали следующие значения: ПММА — 14.58 J/cm^2, эпоксидного компаунда — 16.18 J/cm^2 и стиросила — 20.08 J/cm^2.

Все описанное выше справедливо для ситуации, когда вероятность ЛАД определяется дефектами на поверхности или в объеме образца, для которой вероятность такой деструкции может быть описана показательной функцией типа

$$P = 1 - \exp\big[C(F)A\big], \tag{1}$$

где $C(F)$ — концентрация дефектов, A — площадь области, подвергнутой воздействию лазерного излучения с плотностью энергии F. Зная площадь воздействия луча лазера при ЛАД, можно определить концентрацию дефектов и затем вычислить вероятность ЛАД для фактического значения плотности энергии луча, используемого в конкретном эксперименте.

Данные по ЛАД могут быть проанализированы, как и ранее в [1–3], с использованием статистики Вейбула [1] в предположении, что $C(F) \sim F^m$, причем график зависимости $\ln\{1/A[\ln(1-P)^{-1}]$ от $\ln(F)$ будет линеен с тангенсом наклона, равным m — показателю экспоненты в статистике Вейбула [1]. Такой анализ подтверждает, что наклоны прямых многократно повторяются из-за дефектного механизма ЛАД и статистика Вейбула адекватно описывает процесс ЛАД [1] и позволяет оценивать вероятность разрушения полимерного образца при заданной плотности энергии лазерного импульса. Для этого распределение Вейбула возьмем в виде

$$P = 1 - \exp\big[-kF^mA\big], \tag{2}$$

где k — коэффициент пропорциональности. Учитывая, что в рамках одной серии экспериментов $A = \text{const}$, по экспериментальной зависимости $P(F)$ для фиксированного значения P получим $\ln(1-P) = -kF^mA$ или окончательно

$$kA = -\ln\big((1-P)/F^m\big). \tag{3}$$

Так как погрешность измерения пороговых параметров ЛАД для $P = 0.5$ минимальна, то подставив это

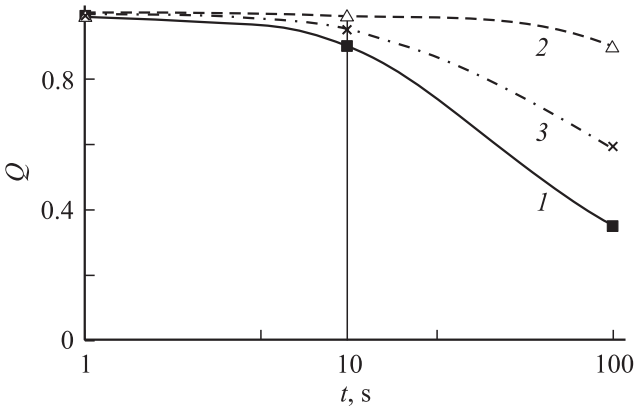

Рис. 3. График зависимости надежности Q от времени облучения t для полимерных образцов из ПММА (*1*), стиросила (*2*) и эпоксидного компаунда (*3*) при плотности энергии $F = 8\,\mathrm{J/cm^2}$.

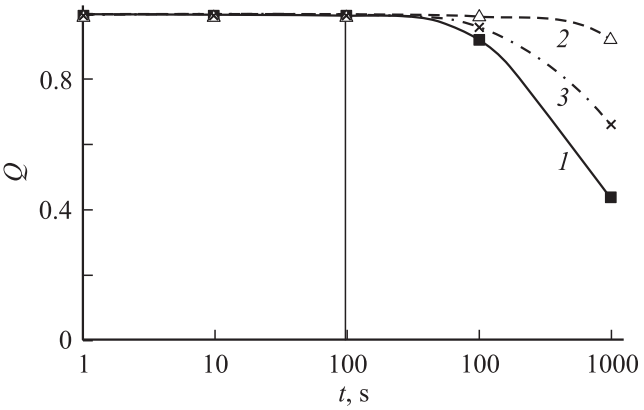

Рис. 4. То же, что для рис. 3, при $F = 4\,\mathrm{J/cm^2}$.

значение вероятности в (3), получим

$$kA = \ln 2/(F_{0.5}^m). \tag{4}$$

Рассматривая, как и ранее в [1,2], случай, когда мишень может перемещаться в плоскости, перпендикулярной лазерному лучу, можем найти вероятность ЛАД за определенный промежуток времени T. Тогда оптическая прочность при однократном облучении мишени составит $Q = 1 - P$ и с учетом (1) и (4)

$$Q = \exp\left[-\ln 2(F/F_{0.5})^m\right]. \tag{5}$$

Оптическая прочность мишени при N лазерных импульсах в разных точках мишени будет равна

$$Q_N = Q^N = \left\{\exp\left[-\ln 2(F/F_{0.5})^m\right]\right\}^N. \tag{6}$$

Если частота следования лазерных импульсов равна f, то за время T полное число импульсов будет равно $N = fT$ и, подставив это выражение в формулу (6), получим оптическую прочность образца за время T:

$$Q_T = \left\{\exp\left[-\ln 2(F/F_{0.5})^m\right]\right\}^{Tf}. \tag{7}$$

Параметры $F_{0.5}$ и m определяются иэ экспериментов, а частота следования лазерных импульсов f задается условиями эксперимента.

Таким образом, полученная зависимость (7) позволяет прогнозировать оптическую прочность полимерной мишени в течение времени T, за которое производится ее импульсное облучение с частотой следования импульсов f.

На основании полученных экспериментальных данных были выполнены расчеты по уравнению (7) и получены зависимости оптической прочности или надежности Q различных образцов от продолжительности облучения T и от плотности энергии облучения F при частоте следования лазерных импульсов f, равной 1 Hz. Полученные зависимости позволяют оценивать надежность образца Q при плотности энергии лазерного облучения F меньше порогового уровня. Эти результаты представлены в виде графиков зависимости $Q = f(T)$ для этих полимерных образцов в зависимости от плотности энергии облучения: 8 и $4\,\mathrm{J/cm^2}$ на рис. 3 и 4 соответственно.

По этим графикам можно прогнозировать надежность полимерного образца в зависимости от характера лазерного облучения без проведения большого объема экспериментальных измерений [1]. Кроме того, эти результаты могут стать основой для новых методов измерения пороговой плотности энергии ЛАД для любых полимерных образцов, которые являются физическими константами для полимерных материалов [1,4].

Список литературы

[1] *Воронина Э.И., Чартий П.В., Шеманин В.Г.* // Физика экстремальных состояний вещества / Под ред. В.Е. Фортова и др. Черноголовка: ИПХФ РАН, 2005. С. 37.
[2] *Voronina E.I., Efremov V.P., Privalov V.E., Shemanin V.G.* // Proc. SPIE. 2003. Vol. 5381. P. 178.
[3] *Воронина Э.И., Чартий П.В., Шеманин В.Г.* // Прикладная оптика. Сб. тр. 6-й Межд. конф. СПб, 2004. Т. 2. С. 223.
[4] *Efremov V.P., Privalov V.E., Skripov P.V., Charty P.V., Shemanin V.G.* // Proc. SPIE. 2004. Vol. 5447. P. 234.
[5] *Laktushkin G.V., Shemanin V.G.* // Proc. SPIE. 1998. Vol. 3687. P. 53.
[6] *Лактюшкин Г.В., Привалов В.Е., Шеманин В.Г.* // Приборы и системы управления. 1999. № 3. С. 31.
[7] *Воронина Э.И., Чартий П.В., Шеманин В.Г.* // Физика экстремальных состояний вещества / Под ред. В.Е. Фортова и др. Черноголовка: ИПХФ РАН, 2003. С. 24.