

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ С ВЕЩЕСТВОМ

doi: 10.51639/2713-0568_2022_2_3_27

УДК 535.8

ГРНТИ 47.35.31

ВАК 01.04.21

Прогнозирование оптической прочности полимерных покрытий при их лазерной абляционной деструкции

¹ Воронина Э. И., ¹ Чартий П. В., ^{1,2*} Шеманин В. Г.

¹ Новороссийский политехнический институт (филиал) Кубанского государственного технологического университета, 353900, Россия, Новороссийск, ул. К. Маркса, 12,

² Филиал БГТУ им. В. Г. Шухова в г. Новороссийске 353919, Россия, Новороссийск, Мысхакское шоссе 75,

e-mail: * vshemanin@mail.ru

Исследование лазерной абляционной деструкции полимерных покрытий при мощном энерговыделении на мишени представляет интерес для разработки методов оценки и прогнозирования надежности или лучевой прочности этих покрытий. Предложена методика для оценки и прогнозирования надежности этих покрытий на основе статистической модели процесса деструкции и экспериментальных измерений значений пороговой плотности энергии этой деструкции. Полученные результаты позволяют прогнозировать надежность любого полимерного образца в зависимости от характера лазерного облучения без проведения большого объема экспериментальных измерений.

Ключевые слова: лазерная абляционная деструкция, полимерные покрытия, мишень, надежность или лучевая прочность, статистическая модель, пороговая плотность энергии.

Введение

Широкое использование полимерных материалов в качестве отражающих покрытий требует исследования механизма и параметров лазерной абляционной деструкции полимерного материала в диапазоне импульсной плотности энергии до 100 Дж/см^2 [1, 2]. В настоящее время зависимости скорости такого разрушения от параметров лазерного импульса и физических характеристик материала в широких диапазонах их изменения определяются на основании численных расчётов, использующих различные физико-математические модели взаимодействия лазерного импульса с веществом. Лазерная абляция (испарение) образцов наносекундными и микросекундными импульсами с плотностью энергии более 1 Дж/см^2 сопровождается образованием низкотемпературной плазмы (характерная температура порядка 10^4 К), в которой может поглощаться значительная часть энергии лазерного импульса [1, 3, 4], что влияет как на эффективность абляционного разрушения, так и параметры лазерного факела. Причём характеристики, определяющие оптическую толщину плазмы факела, – концентрация электронов, температура и размер плазменного облака – значительно изменяются в течение лазерного импульса, и это делает описание динамики поглощения лазерного излучения очень

сложной задачей. В работе [4] предложена модель лазерной абляции, позволяющая оценить поглощение излучения в нагревающейся плазме, на основе предположения о том, что увеличение поглощения вследствие нагрева плазмы определяется плотностью поглощенной энергии лазерного излучения F_a . Дальнейшее развитие теории распространения в твердом веществе ударной волны и абляционного разрушения материала при воздействии лазерного импульса сделано авторами [1] для диапазона изменения интенсивности, соответствующего гидродинамическому режиму абляции ($10^8 \dots 10^{14}$ Вт/см²). Причём в этой работе [1] под эффективностью абляционного разрушения вещества мишени подразумевается доля поглощённой лазерной энергии, которая в момент окончания лазерного импульса, содержится в веществе мишени и распространяется вглубь него ударной волной. Разрушение мишени под действием такой ударной волны, затухающей в веществе после окончания лазерного импульса обоснована в [3]. А в работе [1] получены аналитические зависимости глубины и времени абляционного разрушения материала от параметров лазерного импульса и физических констант материала. Однако экспериментальные измерения пороговых характеристик лазерной абляционной деструкции для различных твёрдых мишеней, полученные в ряде работ [5], часто противоречивы, а для исследуемых полимерных мишеней отсутствуют.

Экспериментальная лабораторная лазерная абляционная станция

Для экспериментального исследования зависимости надежности лазерной абляционной деструкции были выполнены соответствующие измерения пороговых значений плотности энергии при заданных значениях энергии падающего лазерного излучения и условиях фокусировки (размерный эффект) при деструкции мишеней из эпоксидного компаунда (ЭКС), полиметилметакрилата (ПММА) и стиросола. Наличие пробоя при лазерной абляции регистрировалось, как и ранее в [6] по измерению собственного свечения факела лазерной плазмы или появлению импульса давления на свободной поверхности мишени. Для решения этой задачи была разработана и изготовлена лабораторная лазерная абляционная станция, далее Станция, которая была собрана на базе экспериментальной установки из [7–11]. В этой Станции излучение двух YAG: Nd лазеров с импульсами длительностью 10 нс и 100 мкс и энергиями до 0,3 и 1,2 Дж на длине волны 1064 нм фокусировалось специальным объективом на поверхность полимерной мишени. Изменение плотности энергии лазерного импульса в диапазоне от 0,1 до 100 Дж/см² достигалось как выбором фокусного расстояния объектива, так и ослаблением калиброванными нейтральными светофильтрами НС. Часть лазерного излучения лазера на длине волны 1064 нм через ИК светофильтр направлялась на фотодиод типа ФД-24К для контроля энергии лазерного импульса и синхронизации работы установки [4]. Интенсивность собственного свечения плазмы регистрировалась фотоумножителем типа ФЭУ-79 через световод и интерференционный светофильтр с максимумом на длине волны 532 нм [7–9, 11]. Импульс давления на свободной поверхности образца измерялся пьезодатчиком на основе ЦТС-керамики. Сигналы со всех измерительных каналов регистрировались через специальный контроллер [7, 8, 10] вводились в ПК. Сигналы с фотодиода использовались для запуска и синхронизации работы Станции. На первом этапе, как это подробно описано в [8, 11], были выполнены калибровочные эксперименты для всех фотоприёмных модулей двух типов – на основе фотодиода и ФЭУ-79. Эти результаты дали возможность получать из амплитуды импульса с фотоприемника значение энергии лазерного импульса E и вычислить плотность энергии $F = E/S_F$, где S_F – площадь фокального пятна фокусирующего объектива. В дальнейших экспериментах плотность энергии в лазерном импульсе рассчитывалась как произведение пропускания

светофильтра НС на длине волны 1064 нм и максимального значения F для данной выборки измерений. Чтобы генерировать кривую вероятности лазерной абляционной деструкции необходимо сделать не менее 20 выстрелов при заданной энергии импульса и измерить число событий лазерной абляционной деструкции. Устанавливая новое значение плотности энергии и повторяя предыдущий процесс измерений, последовательно проходили весь диапазон значений вероятности лазерной абляции от 0 до 1,0. Если кривая вероятности лазерной абляционной деструкции от плотности энергии на графике не получается гладкой, то это означает, что недостаточно измеренных данных или значения плотности энергии статистически неразличимы из-за недостаточной точности измерений. Правильная интерпретация этой кривой вероятности лазерной абляционной деструкции важна для точного определения пороговых характеристик лазерной абляционной деструкции полимерных образцов. Эти экспериментально измеренные пороговые значения плотности энергии при вероятности 0,5 и служат для построения кривых динамики надежности.

Результаты экспериментов

На этой Станции были выполнены экспериментальные исследования зависимости вероятности лазерной абляции от плотности энергии лазерного импульса длительностью 10 нс для плоских образцов из ЭКС, ПММА и стиросила. На первом этапе были сделаны калибровочные эксперименты на мишени из ПММА и разработана процедура измерения пороговой плотности энергии на длине волны 1064 нм при наличии лазерного плазмообразования, сопровождающего лазерную абляционную деструкцию. Процедура включала точное позиционирование и перемещение полимерной мишени относительно оси лазерного луча, точную фокусировку лазерного излучения и изменение энергии импульса нейтральными светофильтрами. Наличие лазерной абляции регистрировалось по появлению свечения лазерной плазмы как и ранее в [5, 7, 8, 11, 12] и импульсу давления на свободной поверхности мишени. Полученная оптимальная геометрия облучения образца использовалась во всех дальнейших экспериментах. Зависимости вероятности пробоя P от плотности энергии лазерного импульса F были получены для всех четырёх образцов. Из-за стохастического характера лазерной абляционной деструкции каждая точка кривой определялась как отношение числа выстрелов с наличием пробоя и свечением плазмы к общему числу выстрелов. Для каждого значения плотности энергии были сделаны не менее 20 выстрелов, причем каждый раз в новую точку на поверхности мишени. Пороговые плотности энергии F_T были получены из этих зависимостей для условия равенства вероятности пробоя $P = 0,5$ в соответствии с ранними работами [5, 12] для длительности лазерных импульсов 10 нс. Эти пороговые значения для всех полимерных мишеней собраны в таблице 1. Далее, как и в работах [4, 7, 8], были выполнены экспериментальные исследования зависимости порогового уровня лазерной абляционной деструкции при облучении поверхности мишени лазерными импульсами длительностью 100 мкс для образцов из ЭКС, ПММА и стиросила. Полученные значения пороговых плотностей энергии лазерной абляционной деструкции также представлены в таблице 1. Надо отметить, что для такой длительности лазерного импульса получена чёткая 100 % граница наличия пробоя, что подтверждается данными [13].

Полученные результаты находятся в хорошем качественном соответствии с результатами [5, 7, 12] и результатами численного моделирования в [14].

Таким образом, выполненные эксперименты позволили получить значения пороговых плотностей энергии лазерной абляционной деструкции для длительности лазерных импульсов 10 нс и 100 мкс для трех исследованных образцов. Полученные результаты

могут стать основой для новых методов измерения пороговой плотности энергии лазерной абляционной деструкции для любых полимерных образцов или как в работе [15] для оптических кристаллов и оценку самих параметров, характеризующих механизм лазерной абляционной деструкции. Эти данные являются физическими константами для полимерных покрытий.

Таблица 1

Значения пороговых плотностей энергии лазерной абляционной деструкции для образцов из ЭКС, ПММА и стиросила.

Образец	Пороговая плотность энергии Q_T , Дж/см ² для 10 нс и $P=0,5$	Пороговая плотность энергии Q_T , Дж/см ² для 100 мкс
ПММА	14,5	22,9 (20,8*)
Стиросил	20,0	16,8
ЭКС	21,5	17,9

* – значение взято из [5]

Прогнозирование надежности полимерных покрытий при их лазерной абляционной деструкции

Статистический подход, развитый в [6, 12], для исследования лазерной абляционной деструкции полимерных покрытий позволяет построить кривую надежности лазерной абляционной деструкции в серии измерений вероятности пробоя для различных значений импульсной плотности энергии в одноимпульсном режиме облучения каждый раз новой точки поверхности [6]. Тогда вероятность лазерной абляционной деструкции определяется дефектами на поверхности или в объеме образца и поэтому вероятность лазерной абляционной деструкции может быть описана показательной функцией [6] в виде $P = 1 - \exp[-C(F)A]$, где $C(F)$ – концентрация дефектов, и A – площадь области, подвергнутой воздействию лазерного излучения с плотностью энергии F . Зная площадь воздействия луча лазера при лазерной абляционной деструкции, можно определить концентрацию дефектов и затем вычислять вероятности лазерной абляционной деструкции для фактического значения плотности энергии луча, используемого в лазерной системе.

Статистическая обработка результатов измерений согласно описанной в [12] процедуре позволили получить зависимость логарифма концентрации дефектов в мишени от логарифма плотности энергии лазерного импульса в предположении m – степенной функции этой зависимости согласно статистике Вейбулла [16, 17]. Линейный график такой зависимости дает значение m для концентрации дефектов в зависимости от плотности энергии в выражении (1). Распределение дефектов по поверхности в образце и является причиной лазерной абляционной деструкции материала образца, которое начинается с плазмообразования в точке фокусировки лазерного излучения. Для исследованных полимерных образцов этот показатель степени изменяется в диапазоне 6,5...7,2 в хорошем соответствии с данными [12].

Данные по пороговым характеристикам лазерной абляционной деструкции будут проанализированы с использованием статистики Вейбулла и используя этот подход и представления, развитые в [6] надежность полимерного покрытия при N лазерных импульсов в разных точках мишени будет равна

$$Q = \{\exp[-\ln 2(F / F_{0,5})^m]\}^{N/f} \quad (1)$$

Параметры $F_{0,5}$ и t определяются из экспериментов, а частота следования лазерных импульсов f задаётся условиями эксперимента. Полученная зависимость (1) позволяет прогнозировать надёжность полимерной мишени в течение времени t , в течение которого производится её облучение с частотой лазерных импульсов f .

В работах [6–8, 11, 13] были выполнены экспериментальные исследования зависимости порогового уровня плотности энергии лазерной абляционной деструкции при облучении поверхности мишени лазерными импульсами длительностью 10 нс и 100 мкс для полимерных образцов из ПММА, ЭКС и стиросила. На основании полученных экспериментальных данных и зависимости (1) для надёжности образца были выполнены расчёты и получены зависимости надёжности различных образцов Q от продолжительности облучения t и от плотности энергии облучения F при частоте следования лазерных импульсов f , равной 1 Гц. Полученные зависимости позволяют оценивать надёжность образца Q при плотности энергии лазерного облучения F меньше порогового уровня. Эти результаты представлены в виде графика зависимости $Q = f(t)$ для этих полимерных образцов в зависимости от плотности энергии облучения F на рис. 1 в качестве примера.

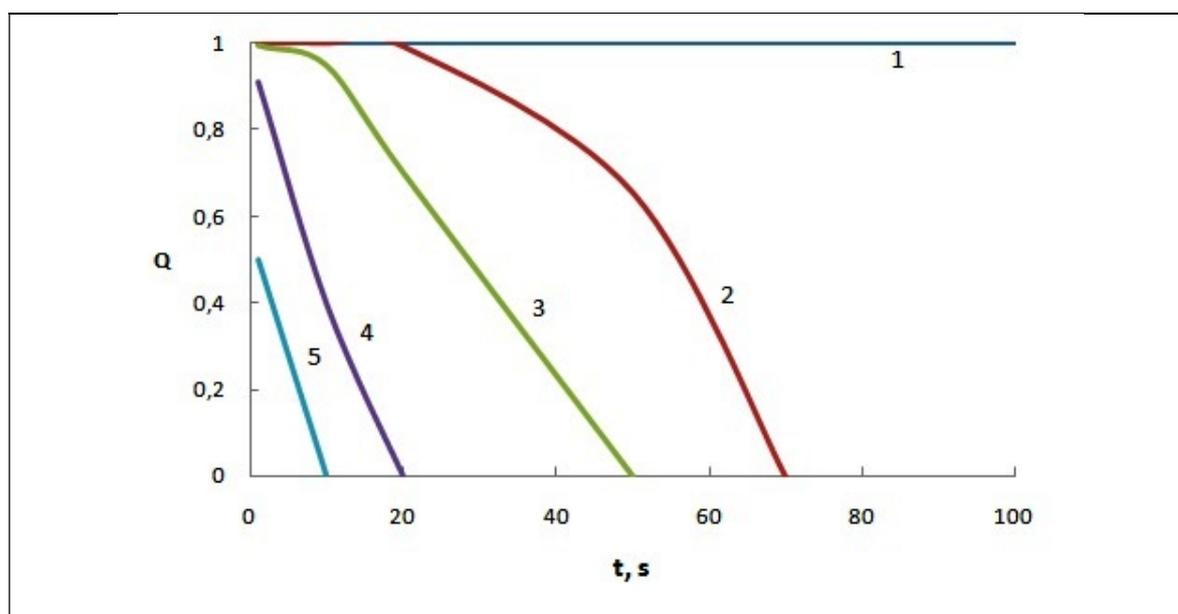


Рис. 1. Графики временной зависимости надёжности Q для значений отношения F/F_T равного 0.1 (1), 0.25 (2), 0.5 (3), 0.75 (4) и 1.0 (5)

По графикам можно прогнозировать надёжность полимерного образца в зависимости от характера лазерного облучения без проведения большого объёма экспериментальных измерений [1].

Полученные результаты позволяют прогнозировать надёжность любого полимерного образца в зависимости от характера лазерного облучения и определять время жизни образца, как время спада кривой в e раз. Кроме того, эти результаты могут стать основой для новых методов измерения пороговой плотности энергии лазерной абляционной деструкции для любых полимерных образцов, которые являются физическими константами для полимерных материалов [1, 4].

Заключение

На основании физической модели лазерной абляционной деструкции, описываемой законом распределения Вейбулла [16, 17], получена функциональная зависимость надежности полимерной мишени при её многократном лазерном облучении от плотности энергии и продолжительности, позволяющая прогнозировать надёжность образцов по известному пороговому значению плотности энергии лазерной абляционной деструкции полимерных покрытий, на основе которой разработана методика для оценки и прогнозирования надёжности этих покрытий. Полученные результаты позволяют прогнозировать надёжность любого полимерного образца в зависимости от характера лазерного облучения без проведения большого объёма экспериментальных измерений. Кроме того, эти результаты могут стать основой для новых методов измерения пороговой плотности энергии лазерной абляционной деструкции для любых полимерных образцов, которые являются для них физическими константами.

Конфликт интересов

Авторы статьи заявляют, что у них нет конфликта интересов по материалам данной статьи с третьими лицами, на момент подачи статьи в редакцию журнала, и им ничего не известно о возможных конфликтах интересов в настоящем со стороны третьих лиц.

Список литературы

- 1 Анисимов С. И., Лукьянчук Б. С. Избранные задачи теории лазерной абляции, // УФН. 2002.- Т. 172, С. 301.
- 2 Григорьянц А. Г., Соколов А. А. Лазерная обработка неметаллических материалов. М.: Высшая школа, - 1988. С. 18–55.
- 3 Гуськов К. С., Гуськов С. Ю. // Квантовая электроника. 2001, Т. 31, С. 305.
- 4 Анисимов С. И., Имас Ю. А., Романов Г. С., Ходыко Ю. А. Действие излучения большой мощности на металлы. М.: Наука. – 1970.
- 5 Колдунов М. Ф., Маненков А. А., Покотило И. Л. // Квантовая электроника, 2000. – Т. 30. – С. 592–596.
- 6 Воронина Э. И., Чартий П. В., Шеманин В. Г. // Физика экстремальных состояний вещества – 2005. Под ред. Фортова В.Е. и др. Черноголовка. ИПХФ РАН. 2005. С. 37.
- 7 Voronina E. I., Efremov V. P., Privalov V. E., Shemanin V. G // Proc. SPIE. 2003. V. 5381. P. 178.
- 8 Efremov V. P., Privalov V. E., Skripov P. V., Charty P. V., Shemanin V. G.// Proc. SPIE. 2004. V. 5447. P. 234.
- 9 Laktushkin G. V, Shemanin V. G. // Proc. SPIE. 1998. V. 3687. P. 53.
- 10 Лактюшкин Г. В., Привалов В. Е., Шеманин В. Г. // Приборы и системы управления. 1999. № 3. С. 31.
- 11 Воронина Э. И., Чартий П. В., Шеманин В. Г. // Физика экстремальных состояний вещества – 2003. Под ред. Фортова В.Е. и др. Черноголовка. ИПХФ РАН. 2003. С. 24.
- 12 Runkel M. Damage testing/ SPIE,s OEmagazin. – 2002.- No 5. – P. 48.
- 13 Воронина Э. И., Чартий П. В., Шеманин В. Г. // Физика экстремальных состояний вещества – 2005. Под ред. Фортова В. Е. и др. Черноголовка. ИПХФ РАН. 2005. С. 36.
- 14 Чартий П. В., Череп Е. И., Шеманин В. Г. // Физика экстремальных состояний вещества, Черноголовка, ИПХФ РАН. 2004. С. 128.
- 15 Казанцев С. Г. // Оптика атмосферы и океана. 2003. – Т. 16. – С. 390.

Лазеры. Измерения. Информация. 2022. Том № 02. № 03 (07)
<https://lasers-measurement-information.ru>

16 Free M. D., Genin F. Y. Proc. SPIE. – 1988.- V. 3492. – P. 188.

17 Надежность и эффективность в технике. В .10 т. Том. 2. Математические методы в теории надежности и эффективности. // Под ред. Б. В. Гнеденко. – М.: Машиностроение, 1987, 280 с.

Prediction of Optical Strength of Polymer Coatings during Their Laser Ablative Destruction

¹ Voronina E. I., ¹ Charty P. V., ^{1,2} Shemanin V. G.

¹ *Novorossiysk Polytechnic Institute (branch) of the Kuban State Technological University, 353900, Russia, Novorossiysk, 12 K. Marx st.*

² *Branch of the Belgorod State Technological University. V. G. Shukhov in Novorossiysk, 353919, Russia, Novorossiysk, Myskhakskoe shosse 75,*

The study of laser ablation destruction of polymer coatings under intense energy release on the target is of interest for the development of methods for assessing and predicting the reliability or radiation strength of these coatings. A technique is proposed for assessing and predicting the reliability of these coatings based on a statistical model of the destruction process and experimental measurements of the values of the threshold energy density of this destruction. The results obtained make it possible to predict the reliability of any polymer sample depending on the nature of laser irradiation without carrying out a large amount of experimental measurements.

Keywords: laser ablation destruction, polymer coatings, target, reliability or radiation strength, statistical model, threshold energy density.