

07

Исследование лазерного абляционного нагружения полимеров

© Э.И. Воронина, В.П. Ефремов, В.Е. Привалов, В.Г. Шеманин

Санкт-Петербургский государственный политехнический университет
E-mail: VEP-57@yandex.ru

Поступило в Редакцию 16 апреля 2008 г.

Получены значения коэффициентов абляционного нагружения полиэтиленовой мишени в диапазоне 8–11% и фторпластовой мишени 8–10% для плотностей энергии лазерного импульса $100–1000 \text{ J/cm}^2$ в удовлетворительном согласии с теоретическими оценками абляционного нагружения образцов порядка 6–8%.

PACS: 42.55.Tv, 42.60.Da

Широкое использование полимерных материалов в качестве отражающих покрытий требует исследования механизма и параметров лазерного абляционного разрушения полимерного материала в диапазоне плотности мощности $10^8–10^{14} \text{ W/cm}^2$. В настоящее время зависимости скорости такого разрушения от параметров лазерного импульса и физических характеристик материала в широких диапазонах их изменения определяются на основании численных расчетов, использующих различные физико-математические модели взаимодействия лазерного импульса с веществом. В работе [1] предложена модель лазерной абляции, позволяющая оценить поглощение излучения в нагревающейся плазме, на основе предположения о том, что увеличение поглощения вследствие нагревания плазмы определяется плотностью поглощенной энергии лазерного излучения E_a . Дальнейшее развитие теории распространения в твердом веществе ударной волны и абляционного разрушения материала при воздействии лазерного импульса сделано авторами [2] для диапазона изменения интенсивности, соответствующего гидродинамическому режиму абляции ($10^8–10^{14} \text{ W/cm}^2$). При этом под эффективностью абляционного разрушения вещества мишени подразумевается доля поглощенной лазерной энергии, которая в момент окончания лазерного импульса содержится в веществе мишени и

распространяющейся в глубь него ударной волны. Разрушение мишени под действием такой ударной волны, затухающей в веществе после окончания лазерного импульса, обосновано в [3]. А в работе [2] получены аналитические зависимости глубины и времени абляционного разрушения материала от параметров лазерного импульса и физических констант материала.

Поэтому целью настоящей работы является экспериментальное исследование зависимости доли энергии лазерного импульса, идущей на абляционное гидродинамическое разрушение мишени из полиэтилена высокого давления и политетрафторэтилена (фторпласт ФП-4), в зависимости от плотности энергии падающего излучения с учетом распределения энергии по различным каналам — отражение, рассеяние и поглощение — при лазерной абляции.

Детальное описание экспериментальной установки дано в [4,5]. В лабораторной лазерной абляционной станции, схема которой приведена на рис. 1, излучение YAG:Nd лазера 1 с импульсами длительностью 10 ns и энергиями до 0.3 J на длине волны 1064 nm поворачивалось призмой 3 и фокусировалось специальным объективом 6 на поверхность полимерной мишени 11. Изменение плотности энергии лазерного импульса в диапазоне от 10 до 1200 J/cm² достигалось как выбором фокусного расстояния объектива 6, так и ослаблением калиброванными нейтральными светофильтрами 2. Отраженное зеркально назад и рассеянное диффузно излучение на длине волны 1064 nm собиралось сферическим зеркалом 7 диаметром 6 см с отверстием в центре для ввода лазерного луча в световод 8 и через светофильтр 9 с максимумом пропускания на этой длине волны направлялось на фотодиод 10 типа ФД-256 [4,5]. В этих экспериментах использовался объектив с фокусным расстоянием 10 см, а сферическое зеркало располагалось на расстоянии 7 см от поверхности мишени. Одновременно регистрировалась интенсивность собственного свечения плазмы фотоумножителем 14 типа ФЭУ-79 через световод 12 и светофильтр 13 с максимумом пропускания на длине волны 532 nm. Часть лазерного излучения на длине волны 1064 nm через светофильтр 4 направлялась на фотодиод 5 типа ФД-24К для контроля энергии лазерного импульса и синхронизации работы установки [4].

На первом этапе, как и ранее в [5,6], были выполнены калибровочные эксперименты на фторпластовой мишени, для которой по данным [7] коэффициент диффузного отражения равен 0.5. Это значение

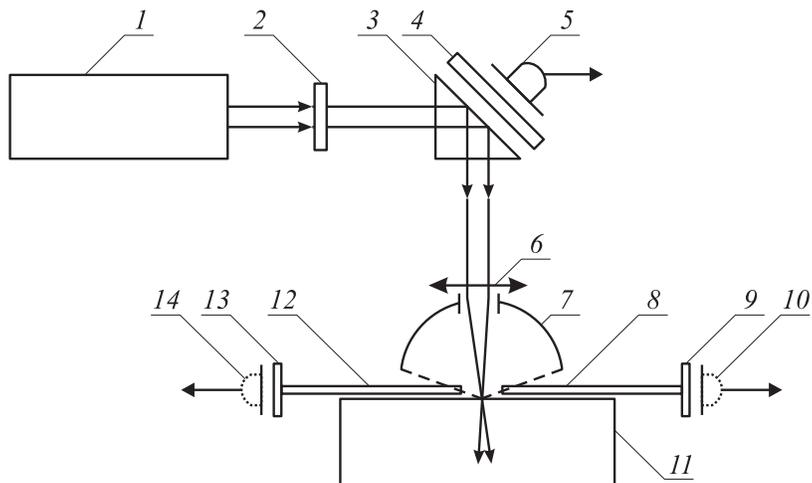


Рис. 1. Схема лабораторной установки: 1 — лазер, 2 — нейтральный светофильтр, 3 — призма, 4, 9 — светофильтры на 1064 нм, 5, 10 — фотодиоды, 6 — объектив, 7 — сферическое зеркало, 8, 12 — световоды, 11 — образец, 13 — светофильтр на 532 нм, 14 — ФЭУ-79.

позволило рассчитать поправочный коэффициент для лабораторной станции для двух случаев наличия и отсутствия пробоя на поверхности мишени с учетом телесного угла сбора отраженного и рассеянного от поверхности излучения на длине волны 1064 нм. В результате усреднения по всем измерениям для всех случаев этот коэффициент оказался равным 4.1 ± 0.4 для длины волны 1064 нм и заданной геометрии освещения мишени. В дальнейших экспериментах истинное значение коэффициента отражения, включая и диффузное рассеяние, рассчитывалось с учетом этого коэффициента.

На втором этапе были измерены коэффициенты отражения на длине волны 1064 нм от обеих мишеней при наличии пробоя. Для каждого значения плотности энергии были сделаны не менее 20 выстрелов, причем каждый раз в новую точку на поверхности мишени. Значения амплитуды импульсов с фотодиода 5 позволяли учитывать изменение энергии лазерного импульса в импульсе. По измеренным значениям ам-

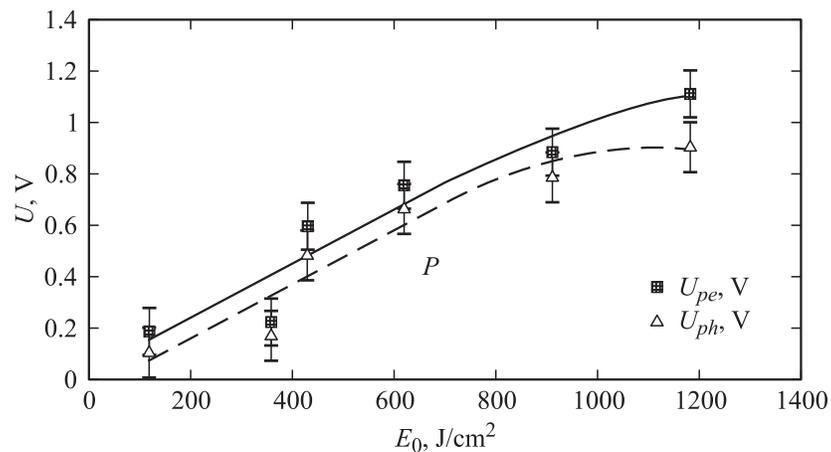


Рис. 2. График зависимости амплитуды импульса свечения плазмы U от плотности энергии лазерного импульса E_0 для заданных экспериментальных условий и полимеров (U_{pe} — для полиэтилена и U_{ph} — для фторпласта). Штриховая и сплошная кривые — это аппроксимация данных полиномом третьей степени.

плитуд импульсов с фотодиода δU рассчитаны значения коэффициентов поглощения $A = 1 - R$, где R — коэффициент отражения. Полученные результаты находятся в хорошем качественном согласии с результатами теоретических оценок, выполненных авторами [1,2]. Несмотря на увеличение сигнала U , отраженного от поверхности мишени, при увеличении падающей плотности энергии в диапазоне $100-1000 \text{ Дж/см}^2$ величина коэффициента поглощения A уменьшается примерно на 30%. По данным работы [3] это может быть связано с увеличением поглощения в образовавшемся на переднем фронте лазерного импульса плазменном факеле. Подобные результаты получили и авторы [1] в диапазоне плотностей энергии $2-20 \text{ Дж/см}^2$ для углерода. Однако в полимерных мишенях ситуация может оказаться сложнее, чем в металлах или чистом углероде. Дополнительным подтверждением этого факта может служить и увеличение амплитуды импульса интегрального свечения плазмы лазерного факела на рис. 2.

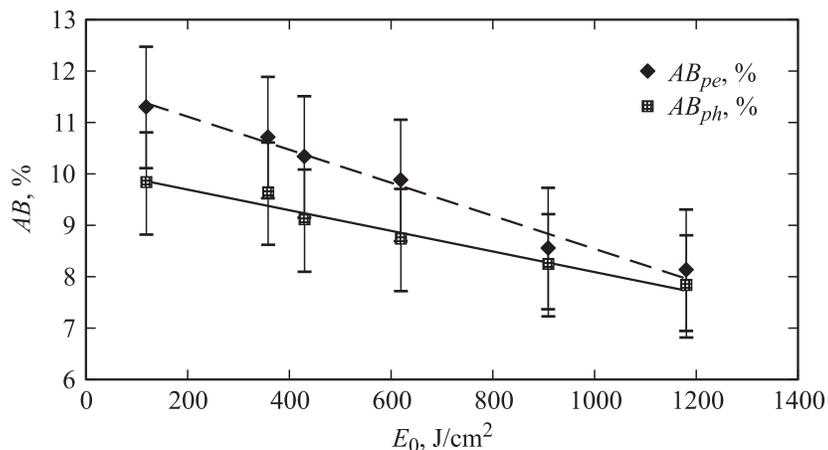


Рис. 3. График зависимости коэффициента абляционного нагружения AB от плотности энергии лазерного импульса E_0 для заданных экспериментальных условий и полимеров (AB_{pe} — для полиэтилена и AB_{ph} — для фторпласта). Штриховая и сплошная линии — это линейная аппроксимация данных.

Полученные значения коэффициента поглощения для соответствующих значений плотности энергии в лазерном импульсе позволили рассчитать коэффициенты абляционного нагружения мишени согласно развитой авторами [2] модели гидродинамического режима воздействия лазерного импульса на металлическую мишень. В предположении отсутствия теплопроводностного механизма лазерной абляции всю поглощенную лазерную энергию можно представить как сумму энергии испаренного потока вещества или плазменного факела, разлетающегося навстречу лазерному лучу, и энергию плотной части вещества, сжимаемого ударной волной, которая распространяется в глубь мишени под давлением факела.

Используя предложенный подход и физические постоянные полимеров из [8], были рассчитаны значения доли поглощенной лазерной энергии, которая содержится в ударной волне, — коэффициента абляционного нагружения AB , приведенные на графике (рис. 3). Для расчетов были сделаны следующие предположения: максимальная критическая плотность плазмы рассчитывалась для степени ионизации углерода из

полимерной мишени, равной 4, а ее постоянная адиабаты считалась равной $5/3$ для идеального газа. Постоянная адиабаты для металлов обычно принимается равной 3, согласно [9]. Для полимеров нами были выполнены расчеты для значений от 1.7 до 3 и получено, что наилучшее совпадение с экспериментом получается для значения 2.8. Теоретические оценки в соответствии с моделью работы [2] дают значения коэффициента абляционного нагружения пластиков порядка 6–8% и практическую независимость от плотности энергии лазерного импульса.

Точность расчетов составляет порядка 1% и позволяет заключить, что коэффициент абляционного нагружения AB , полученный на основании результатов измерений коэффициента поглощения лазерного излучения A и расчетов по модели [2] с отмеченными выше допущениями, уменьшается с ростом плотности энергии E_0 на 35% в диапазоне плотностей энергии 100–1000 J/cm². Это может быть объяснено увеличением степени ионизации плазмы лазерного факела, повышением ее температуры, интенсивности свечения плазмы и соответственно увеличением доли лазерной энергии, поглощенной в плазменном факеле. Это подтверждается и графиком на рис. 2.

Таким образом, выполненные расчеты и экспериментальные исследования позволили получить значения коэффициента абляционного нагружения полиэтиленовой мишени в диапазоне 8–11% и фторпластовой — 8–10% для плотностей энергии лазерного импульса 100 — 1000 J/cm² в удовлетворительном согласии с теоретическими оценками коэффициента абляционного нагружения образцов порядка 6–8%, выполненными в работе [2].

Эти результаты показывают, что в гидродинамическом режиме абляционного разрушения полимерного образца до 11% поглощенной энергии лазерного импульса передается мишени в виде распространяющейся в ней ударной волны, когда толщина мишени превышает расстояние, на которое распространяется эта ударная волна за время действия лазерного импульса. Отметим, что, согласно [2], максимальная передача энергии лазерного импульса в кинетическую энергию мишени достигается при испарении примерно половины всей массы мишени, а это может приводить к ускорению мишени как целого под действием лазерного импульса в случае тонкого слоя вещества в отличие от рассмотренного выше толстого полимерного слоя.

Список литературы

- [1] Булгаков А.В., Булгакова Н.М. // Квантовая электроника. 1999. Т. 27. № 2. С. 154–158.
- [2] Гуськов К.С., Гуськов С.Ю. // Квантовая электроника. 2001. Т. 31. № 4. С. 305–310.
- [3] Анисимов С.И., Имас Ю.А., Романов Г.С., Ходыко Ю.А. Действие излучения большой мощности на металлы. М.: Наука, 1970. С. 29–32.
- [4] Laktushkin G.V., Shemanin V.G. // Proc. SPIE. 1998. V. 3687. P. 53–55.
- [5] Efremov V.P., Privalov V.E., Skripov P.V. et al. // Proc. SPIE. 2005. V. 5447. P. 234–241.
- [6] Воронина Э.И., Чартий П.В., Шеманин В.Г. // Физика экстремальных состояний вещества — 2003. Черноголовка: ИПХФ РАН, 2003. С. 24–25.
- [7] Antipina T.V., Kokkoz A.F., Stratiev I.G., Turkina G.I., Shemanin V.G. // Proc. International Aerosol Symposium. Moscow: Technology, 1994. P. 122–1233.
- [8] Физические величины: Справочник / Под ред. И.С. Григорьева, Е.З. Мейлихова. М.: Энергоатомиздат, 1991. С. 62, 148, 219, 307.
- [9] Зельдович Я.Б., Райзер Ю.П. Физика ударных волн и высокотемпературных гидродинамических явлений. М.: ГИФМЛ, 1963.