

УДК 544.032.65:536.244

АНАЛИЗ ДИНАМИКИ ЛАЗЕРНОЙ АБЛЯЦИИ ПОЛИМЕРОВ

© 2024 г. Е. М. Толстомятов^{1,*}, Л. Ф. Иванов¹, П. Н. Гракович¹,
Л. А. Калинин¹, С. Р. Аллаяров^{2,**}

¹ Институт механики металлополимерных систем имени В.А. Белого
Национальной академии наук Беларуси
Гомель, Беларусь

² Институт проблем химической физики, Черноголовка, Россия

*E-mail: etolstopy@mail.ru

**E-mail: sadush@icp.ac.ru

Поступила в редакцию 22.05.2024 г.

После доработки 08.07.2024 г.

Принята к публикации 09.07.2024 г.

Изучено изменение основных силовых параметров абляции полиметилметакрилата непрерывным излучением CO₂ лазера. Измерения комплексного параметра “вес мишени + реактивная сила отдачи абляционного потока” производились силоизмерительным устройством с регистрацией компьютером с временной дискретностью 126.5 мс. Экспериментальные данные для начального интервала 0–2 с аппроксимировались модельной функцией, обработка которой позволила выделить изменения веса мишени и силы отдачи абляционного потока в ходе облучения. Для момента выхода скорости абляции на стационарный режим определена энергетическая эффективность использования процесса в реактивном двигателе малой тяги $C_m = 115$ мкН/Вт, которая снижается с течением времени лазерного облучения из-за образования кратера с вогнутой поверхностью и повышения давления газов в камере абляции. Отмечено, что вид абляционной кривой и, соответственно, аппроксимирующая функция для начальной стадии абляции индивидуальны для каждого полимера и параметров лазерного луча.

Ключевые слова: ИК-лазер, абляция, полиметилметакрилат, реактивная сила отдачи газообразных продуктов

DOI: 10.31857/S0023119324060065 EDN: THSRPA

ВВЕДЕНИЕ

Исследования абляции полимеров непрерывным ИК-лазерным излучением в вакууме (точнее, в разреженной среде собственных газообразных продуктов разложения) показали, что характер процесса и состав абляционного потока в значительной степени определяются индивидуальными свойствами конкретного полимера-мишени, степенью его предварительного модифицирования и интенсивностью лазерного излучения [1–16]. Оказалось, что по характеру изменений под лазерным лучом с интенсивностью 0.5–1.0 МВт/м² и составу абляционного потока не все изученные полимеры укладываются в существующие в настоящее время классификационные группы. Связано это, по-видимому, с тем, что в условиях абляции материал облучаемой зоны находится в сверхкритическом состоянии интенсивной диссоциации в смеси с высококонцентрированными продуктами разложения, которые реагируют между собой и с исходным полимером. Это определяет ход термохимических, реологических и газодинамических процессов в облучаемой зоне. Интенсивный поток продуктов разложения в

подповерхностном слое при облучении некоторых полимеров с высокой прозрачностью в ИК-диапазоне может захватывать микрообласти расплава и выносить их в виде микрокапель в абляционной струе [6–10]. Если вязкость расплава в зоне интенсивного разложения очень высока, а поверхностное натяжение его невелико, то вместо микрокапель образуются тяжи расплава. Такая особенность обнаружена пока только у политетрафторэтилена (ПТФЭ), при абляции которого образованные из тяжей после отвердевания волокна составляют значительную часть абляционного потока [6–10]. Это дало основу для разработки метода получения из этого полимера волокнисто-пористых материалов с уникальными свойствами [9].

Как правило, при абляции всех полимеров образуются низкомолекулярные газы, неконденсируемые при комнатной температуре, которые откачиваются из абляционной камеры насосом. Полимеры, разлагающиеся по механизму цепного распада (ПТФЭ, полистирол (ПС), полиметилметакрилат (ПММА) и некоторые другие), образуют почти исключительно мономер, а распадающи-

еся по механизму случайной диссоциации молекулярных цепей выделяют еще и широкий спектр крупных молекулярных фрагментов. Из последней категории наиболее легкая фракция частично откачивается вместе с газообразной, частично конденсируется на поверхностях камеры. Тяжелая фракция конденсируется на поверхностях на пути потока, образуя слои олигомерного состава.

Характер абляции полимеров зависит от интенсивности лазерного излучения. При невысокой интенсивности происходит карбонизация поверхности некоторых полимеров, изменяющая их оптические характеристики в зоне облучения, что приводит к изменению кинетики абляции и состава абляционного потока по мере углубления процесса. Такое поведение в максимальной степени характерно для гетероцепных полимеров (поликарбонат, фенилон, полисульфон), которые при карбонизации образуют на поверхности мишени ноздреватый слой с молекулярно-сшитой структурой. При этом поглощение лазерного излучения сосредотачивается в термостойком поверхностном слое, который разогревается до очень высокой температуры без существенного разложения, а процесс абляции идет за счет теплопередачи в объем мишени и деструкции полимера в нижележащем слое. Кинетика абляции при этом изменяется в соответствии с закономерностями теплопроводности; образующиеся летучие продукты истекают наружу, фильтруясь через пористый карбонизированный поверхностный слой. Этот слой растет за счет разложения нижележащих слоев полимерной мишени, а фильтрующиеся через него летучие продукты разложения дополнительно разлагаются при контакте с высокотемпературной поверхностью сквозных пор. Лишь при очень высокой интенсивности лазерного излучения образование карбонизированного слоя не происходит, по-видимому, вследствие превышения скорости удаления продуктов над скоростью химических реакций карбонизации и межмолекулярной сшивки.

Таким образом, определение динамики лазерной абляции (ЛА) может дать информацию о механизме лазерного разложения полимеров при высоких скоростях нагрева. Кроме этого, создаваемый при ЛА реактивный импульс истекающей струи предложено использовать в качестве одного из удобных средств для коррекции траектории малых космических аппаратов [17, 18], что также требует анализа особенностей динамики абляции различных полимеров. Оценки величины реактивной силы, базирующиеся на динамических параметрах

ЛА непрерывным лучом некоторых полимеров, сделаны в работах [19, 20]. Однако в этих расчетах не учтено, что использованная методика дает комбинированный параметр, включающий не только реактивную силу отдачи, получаемую мишенью, но и убыль ее массы, что приводит к некоторой погрешности оценок импульса. Поэтому одной из задач настоящей работы является выделение из общей зарегистрированной кривой ЛА ее составляющих – снижающегося веса мишени и реактивной силы отдачи абляционной струи и выявление факторов, влияющих на изменение последней по мере развития процесса.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Методика измерений абляционных параметров

Анализ и моделирование процесса абляции проводились на основе экспериментальных данных, полученных на вакуумной установке, описанной ранее в работах [19, 20]. Луч лазера мощностью 40 Вт вводился в камеру вертикально через вакуум-плотное окно из монокристалла NaCl и направлялся на горизонтально расположенную мишень из бруска полимера, помещенного на датчик силоизмерительного устройства. Диаметр пятна излучения на мишени составлял около 9 мм. В процессе абляции положение мишени относительно лазерного луча не менялось. Чувствительность силоизмерительного устройства составляла около 5 мкН. Результаты измерения передавались в компьютер в цифровом виде с временной дискретностью 126.5 мс. Таким образом, датчик регистрировал суммарное действие веса мишени, убывающего в процессе абляции, и реактивной силы отдачи абляционной струи. В многочисленных экспериментах на разных полимерах установлено, что скорость абляции ((СА) – убыль массы мишени в единицу времени) изменяется только в начальном периоде (0–2 с) лазерного воздействия лучом мощностью 40 Вт и диаметром 9 мм. После этого СА сохраняется практически стабильной, по меньшей мере в течение последующих 20 с.

На первом этапе в качестве мишени выбран некристаллический полимер ПММА. Этот выбор обусловлен высокой однородностью оптических и теплофизических свойств ПММА, разлагающегося при высоких температурах на мономер метилметакрилат (ММА) практически со 100-процентным выходом [21] и без карбонизации поверхности. Это делает ПММА наиболее подходящим объектом для

моделирования процесса и анализа динамики лазерной абляции.

Моделирование динамики лазерной абляции

Наиболее ясно основные закономерности механизма формирования абляционного потока могут быть выявлены при анализе процесса абляции невысокой интенсивности, а также на начальной стадии облучения до формирования полноразмерного кратера на мишени. Известно, что в общем случае распределение плотности потока молекул с плоской поверхности по углам θ к ее нормали описывается зависимостью

$$I(\theta) = |I_\theta| = |I_0| \cos^n \theta = I_0 \cos^n \theta, \quad (1)$$

где I_θ — вектор плотности потока молекул под углом θ к нормали к поверхности, I_0 — вектор плотности потока молекул по нормали к поверхности, $n \geq 1$ — показатель степени распределения.

При испарении невысокой интенсивности обычно принимается $n = 1$ [22]. На рис. 1 показана качественная картина распределения векторов плотности потока продуктов абляции с поверхности мишени под воздействием лазерного излучения для режима $n = 1$. Каждая из окружностей, касающихся поверхностей, на этом рисунке представляет собой уравнение косинусоиды в полярной системе координат; концы векторов лежат на окружности. Меньшие значения модуля плотности потока продуктов абляции на периферии зоны облучения (рис. 1а) являются следствием двух причин: 1) меньшей интенсивности лазерного излучения в этих местах и 2) более интенсивным отводом тепла в объем мишени.

В результате этого при развитии абляции формируется кратер вогнутой формы с осевой симметрией относительно нормали к поверхности в его центре (рис. 1б). К отмеченным двум факторам в режиме абляции из кратера (рис. 1б) добавляется третий — снижение интенсивности излучения в результате наклонного падения луча на облучаемую поверхность в зоне, удаленной от центра, с сопутствующим ростом площади испарения.

Скорость уноса вещества с единицы площади плоской поверхности (удельная скорость абляции) I_e может быть получена интегрированием выражения (1) по полному телесному углу верхнего полупространства:

$$I_e = 2\pi I_0 \int_0^{\pi/2} \cos \theta \sin \theta d\theta = \pi I_0, \quad (2)$$

где I_0 — интенсивность уноса вещества с единицы площади по нормали к поверхности.

Скорость абляции, т.е. масса вещества, уносимого из мишени в единицу времени, получаем интегрированием выражения (2) по площади зоны испарения, на начальной стадии возрастающей по мере разогрева от центра к периферии в форме круга радиуса $R(t)$:

$$\Phi(t) = 2\pi^2 \int_0^{R(t)} I_0(r) r dr, \quad (3)$$

где r — расстояние от центра зоны испарения до рассматриваемой точки. При этом учтено, что распределение скорости уноса вещества аксиально-симметрично, т.е. зависит только от радиуса, отсчитываемого от центра зоны облучения.

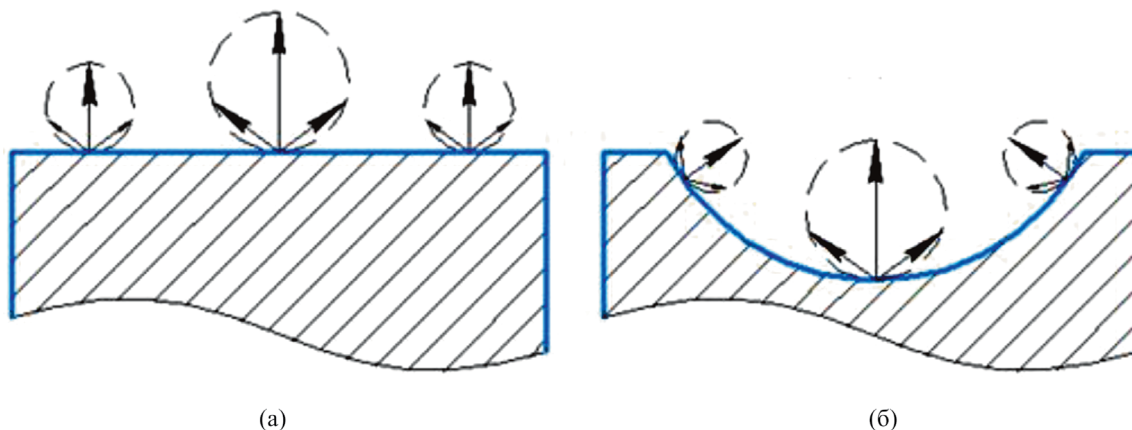


Рис. 1. Качественная картина распределения интенсивности вылета продуктов абляции с плоской поверхности (а) и из кратера вогнутой формы (б) при облучении лучом со спадающей от центра интенсивностью.

Реактивная сила отдачи F_e , создаваемая вылетающими по всем углам продуктами абляции из достаточно малой поверхности, которая может считаться плоской, в расчете на единицу площади также имеет аксиальную симметрию относительно локальной нормали. Поэтому результирующий вектор локальной силы отдачи в расчете на единицу площади поверхности будет также ориентированным по нормали, но направлен в противоположную сторону. Его величина, имеющая размерность давления, может быть выражена интегралом:

$$|F_e| = 2\pi v I_0 \int_0^{\pi/2} \sin\theta \cos^2\theta d\theta = \frac{2\pi}{3} v, \quad (4)$$

где v — средняя линейная скорость частиц, составляющих поток абляции.

Реактивная сила отдачи на мишень F , создаваемая полным абляционным потоком, определяется интегрированием (4) по всей площади испарения. Модуль этой силы для частного случая плоской поверхности и зависящей на начальной стадии от радиуса интенсивности испарения

$$|F(t)| = \frac{4\pi^2}{3} v \int_0^{R(t)} I_0(r) r dr, \quad (5)$$

Таким образом, если одновременно, но отдельно измерять интенсивность абляционного потока и реактивную силу отдачи при испарении с плоской поверхности (такую методику намечено реализовать в последующих экспериментах), то можно определить среднюю скорость вылета молекулярных частиц:

$$v = \frac{3}{2} \frac{|F(t)|}{\Phi(t)}, \quad (6)$$

которая является важной характеристикой процесса лазерного разложения полимера.

В настоящей работе измерение характеристик процесса абляции производилось комплексным методом, при котором силоизмерительным датчиком регистрируется суммарное действие веса мишени и реактивной силы отдачи, а разделение этих параметров производится только для начальной стадии процесса с использованием аппроксимации экспериментальных данных сложной функцией $\Psi(t)$

$$\Psi(t) = k\Phi(t) - g \int_0^t \Phi(\tau) d\tau, \quad (7)$$

где g — ускорение свободного падения.

Функция $\Phi(t)$ нормирована таким образом, чтобы

$$\int_0^{t_c} \Phi(\tau) d\tau = \Delta M_c, \quad (8)$$

где t_c — время всего процесса абляции, ΔM_c — потеря массы мишени за это время.

Коэффициент k “реактивной компоненты” функции $\Psi(t)$ подобран таким образом, чтобы обеспечить: а) близкое значение с экспериментальным максимумом и б) совпадение с экспериментальной зависимостью на начальной стадии процесса. При выполнении этих условий возможно определение скорости вылета молекулярных частиц с поверхности по формуле (6), а также определение убыли веса мишени в любой момент времени. Считая, что на начальной стадии А–В поверхность мишени еще не слишком отличается от плоскости, то есть удовлетворяет условиям модели, можно определить ход динамической зависимости силы отдачи от времени и величину ее максимума.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ОБСУЖДЕНИЕ

На рис. 2 приведена экспериментальная динамическая кривая абляции ПММА в течение 16 с. До подачи излучения датчик регистрирует только вес мишени. Момент подачи лазерного излучения отмечен вертикальной стрелкой (точка А). Спустя $t_A \approx 300$ мс силоизмерительный датчик и ионизационный датчик давления газа в камере регистрируют старт абляции, которая начинается из центра зоны облучения, после чего распространяется на всю зону. Силовое устройство регистрирует максимальное значение спустя $t_B \approx 2.0$ с после подачи луча на мишень, которое представляет собой реактивную силу отдачи абляционной струи за вычетом веса удаленного из мишени к этому моменту материала. В момент $t_C \approx 16.4$ с (точка С) лазер отключается, после чего силоизмерительное устройство регистрирует только остаточный вес мишени. Спад динамической кривой в момент выключения лазера по величине равен реактивной силе отдачи абляционной струи непосредственно перед выключением лазера.

Первое, что следует отметить в экспериментальной кривой, — это снижение реактивной силы отдачи, действующей на мишень в конце облучения — спад кривой после прекращения облучения в точке $t_C \approx 16.4$ с, значительно

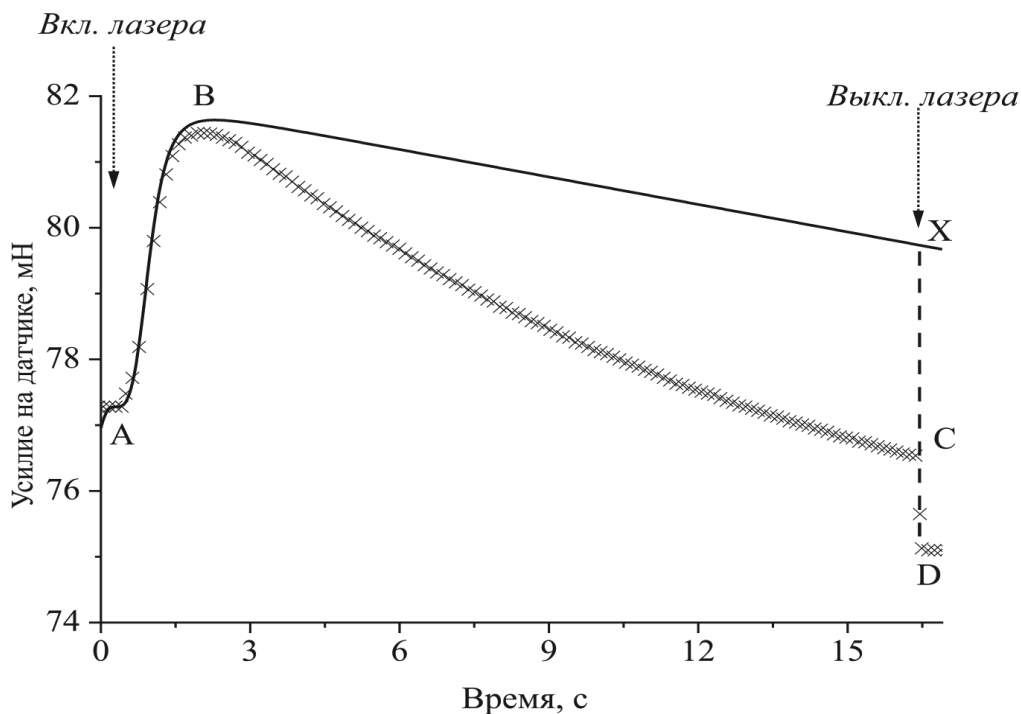


Рис. 2. Зависимость показаний силоизмерительного устройства от времени абляции ПММА (×) и аппроксимирующая зависимость для начальной стадии А–В (сплошная линия).

меньше всплеска показаний в максимуме при $t_{\text{в}} \approx 2.0$ с. Снижение реактивной силы отдачи в конце процесса, по сравнению с пиковой, экспериментально зарегистрировано при абляции всех полимеров, а величина снижения зависит как от типа полимера, так и от времени лазерного облучения.

Вторая особенность экспериментальной кривой ЛА — нелинейный характер динамики показаний силоизмерителя, крутизна спада которых непосредственно после максимального значения выше, чем на конечной стадии облучения, хотя скорость абляции на этой стадии практически постоянна. Следовательно, ответственным за нелинейность кривой в этом временном интервале является снижение реактивной силы отдачи.

Средняя скорость вылета абляционных частиц (молекул мономера ММА), определенная по аппроксимирующей модельной функции по соотношению (6) для момента $t \approx 2$ с, составляет $v \approx 476$ м/с, что соответствует температуре 908 К (635°C). Этот результат вполне согласуется с данными по термодеструкции ПММА [21].

Эффективность использования абляции в качестве метода создания реактивной тяги принято характеризовать коэффициентом энергетической

эффективности C (momentum coupling coefficient в англоязычной литературе. В русскоязычной литературе этот термин еще не устоялся; в разных работах его обозначают по-разному). При абляции непрерывным лазерным излучением этот коэффициент может быть рассчитан по формуле:

$$C_m = |F|/P, \quad (9)$$

где P — мощность лазерного излучения. Для режима абляции ПММА, описываемого вышеприведенной моделью, этот коэффициент $C_m \approx 0.115$ мН/Вт в момент выхода на стационарный режим абляции. По экспериментальным данным (рис. 2), без учета снижения веса мишени, в максимуме начального всплеска абляционной кривой в точке В — $C_m = 0.105$ мН/Вт; в конце облучения в точке С — $C_m = 0.036$ мН/Вт.

Экспериментально определяемый размах всплеска показаний, используемый для оценки реактивной силы отдачи и энергетической эффективности действия абляционного устройства в качестве двигателя малой тяги, занижен по сравнению с модельным значением не более, чем на 10%, а при учете образования кратера с некоторой небольшой кривизной — и того меньше. Поэтому результаты расчета энергетических параметров абляции поли-

меров [19, 20] могут рассматриваться как допустимые оценки.

Значительное снижение энергетической эффективности в конце процесса абляции (в точке С) обусловлено комплексом факторов, в качестве которых предположены:

1. Образование и углубление кратера с поверхностью абляции вогнутой формы.
2. Рост давления абляционных газов в камере вследствие ограниченной производительности системы откачки.
3. Рост цилиндрической части кратера, что меняет газовые потоки и точки приложения реактивной силы отдачи.

Теоретический анализ и экспериментальная проверка подтвердили влияние п. 1. Повторное облучение прежнего места мишени после первого процесса, а также облучение мишени с искусственно созданной кривизной поверхности дали значительно меньшие значения реактивной силы отдачи. Искусственное увеличение длины цилиндрической части канала отвода продуктов абляции также дало эффект снижения реактивной силы отдачи.

Эксперименты с изменением производительности откачной системы также показали высокую значимость внешнего давления газа, хотя оно в конце процесса достигает величины не выше $\sim 10^2$ Па. Из теории реактивного двигателя следует, что сила тяги снижается с уменьшением разности давлений газа в источнике и во внешней среде. Из полученных результатов по абляции ПММА следует, что давление газообразных продуктов его разложения ненамного превышает приведенную выше величину 10^2 Па, что и предопределяет заметное снижение реактивной силы при росте внешнего давления.

Отдельно стоит вопрос о возможности снижения интенсивности лазерного излучения, воздействующего на мишень, вследствие поглощения в окружающей мишень газовой среде продуктов разложения. При малых временах облучения, как в настоящем эксперименте, такое снижение пренебрежимо мало, поскольку излучение CO_2 лазера (943 см^{-1}) попадает на впадину между линиями спектра поглощения ММА (930 и 970 см^{-1}) [23]. В отношении других полимеров ситуация может быть иной при длительном облучении, когда в мишени образуется цилиндрический канал, в котором давление истекающих продуктов высоко, и за счет поглощения может возникать частичное экранирование поверхности мишени.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ результатов экспериментального исследования и моделирования процесса абляции ПММА излучением CO_2 лазера показал, что реактивная сила отдачи на мишень снижается по мере увеличения времени облучения, главным образом, вследствие возрастания давления газов в камере абляции, а также из-за образования кратера с поверхностью вогнутой формы. Максимальные значения реактивной силы отдачи достигаются при облучении поверхности, близкой к плоскости. Значение коэффициента энергетической эффективности реактивной силы при использовании полиметилметакрилата в качестве мишени C_m составляет около 0.115 мН/Вт в момент достижения стационарного режима абляции.

Определено, что средняя энергия молекул ММА, образующих абляционный поток, соответствует температуре 908 К . Используемая методика оценки температуры может применяться для анализа механизма лазерной абляции полимеров, абляционный поток которых формируется из однородных частиц.

ИСТОЧНИКИ ФИНАНСИРОВАНИЯ

Работа выполнена при поддержке ГПНИ “Многофункциональные и композиционные материалы”, подпрограмма 8.4 задание 4.2.2 НИР-3. С российской стороны работа поддержана госзаказом FFSG-2024-0007 №124013000722-8.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Красовский А.М., Толстопятов Е.М. // Поверхность. Физика, химия, механика. 1985. № 1. С. 143.
2. Коршак В.В., Саид-Галиев Э.Е., Никитин Л.Н., Грибова И.А. // Докл. АН СССР. 1983. Т. 269. С. 1119.
3. Толстопятов Е.М., Гракович П.Н., Иванов Л.Ф. // Изв. АН БССР. Сер. хим. наук. 1989. № 4. С. 23.
4. Коршак В.В., Грибова И.А., Саид-Галиев Э.Е. // Механика композит. матер. 1987. № 6. С. 985.
5. Саид-Галиев Э.Е., Никитин Л.Н. // Механика композит. матер. 1992. № 2. С. 152.
6. Красовский А.М., Толстопятов Е.М. // Получение тонких пленок распылением полимеров в вакууме. Мн.: Наука и техника, 1989. 181 с.
7. Tolstopyatov E.M., Ivanov L.F., Grakovich P.N., Krasovsky A.M. // Proc. SPIE. 1998. V. 3343. P. 1010.
8. Tolstopyatov E.M. // J. Phys. D: Appl. Phys. 2005. V. 38. P. 1993.
9. Гракович П.Н., Иванов Л.Ф., Калинин Л.А. // Журнал общей химии. 2009. Т. 79. С. 626.

10. Tolstopyatov E.M., Grakovich P.N., Rakhmanov S.K., Vasilkov A.Yu., Nikitin L.N. // Inorganic Materials: Appl. Res. 2012. V. 3. P. 425.
11. Tolstopyatov E.M., Grakovich P.N., Ivanov L.F., Allayarov S.R., Olkhov Yu. A., Dixon D.A. // J. Rus. Laser Res. 2015. V. 36. P. 485.
12. Allayarov S.R., Kalinin L.A., Tolstopyatov E.M., Grakovich P.N., Ivanov L.F., Dixon D.A. // J. Rus. Laser Res. 2017. V. 38. P. 364.
13. Allayarov S.R., Tolstopyatov E.M., Dixon D.A., Kalinin L.A., Grakovich P.N., Ivanov L.F., Golodkov O.N. // J. Rus. Laser Res. 2017. V. 38. P. 369.
14. Frolov I.A., Allayarov S.R., Kalinin L.A., Dixon D.A., Tolstopyatov E.M., Grakovich P.N., Ivanov L.F. // J. Rus. Laser Res. 2018. V. 39. P. 98.
15. Фролов И.А., Аллаяров С.Р., Калинин Л.А., Богданова Ю.Г., Толстомятов Е.М., Гракович П.Н., Иванов Л.Ф., Дремова Н.Н., Голодков О.Н. // Химия высоких энергий. 2019. Т. 53. С. 464.
16. Allayarov S.R., Confer M.P., Dixon D.A., Rudneva T.N., Kalinin L.A., Tolstopyatov E.M., Golodkov O.N. // Polymer Degradation and Stability. 2020. V. 181. 109331.
17. Phipps C., Luke J. // Abstr. Book of E-MRS Spring Meeting, Strasbourg, 10–13 June 2003 / The European Research Society. Strasbourg, 2003. H-VIII.2.
18. Phipps C., Birkan M., Bohn W. et al. // J. Propulsion and Power. 2010. V. 26. P. 609.
19. Фролов И.А., Аллаяров С.Р., Толстомятов Е.М., Уткин А.В., Гракович П.Н., Иванов Л.Ф., Макаренко В.М. // Химия высоких энергий. 2022. Т. 56. С. 64.
20. Фролов И.А., Аллаяров С.Р., Калинин Л.А., Толстомятов Е.М., Гракович П.Н., Иванов Л.Ф. // Химия высоких энергий. 2022. Т. 56. С. 445.
21. Мадорский С. // Термическое разложение органических полимеров / Пер. с англ. под ред. С.Р. Рафикова. М.: Мир, 1967. 328 с.
22. Технология тонких пленок (справочник) / Под ред. Л. Майссела, Р. Глэнга: пер. с англ. под ред. М.И. Елинсона, Г.Г. Смолко, Т.И. М.: Сов. Радио, 1977. 664 с.
23. <https://webbook.nist.gov/cgi/cbook.cgi?ID=C80626&Units=SI&Type=IR-SPEC&Index=0#IR-SPEC>

LASER ABLATION OF POLYMERS: DYNAMICS ANALYSIS

E. M. Tolstopyatov^{a,*}, L. F. Ivanov^a, P. N. Grakovich^a, L. A. Kalinin^a, S. R. Allayarov^{b,}**

^a V.A. Belyi Metal-Polymer Research Institute, National Academy of Sciences of Belarus,
Gomel, Belarus

^b Institute of Problems of Chemical Physics, Russian Academy of Sciences,
Chernogolovka, Russia

*E-mail: etolstopy@mail.ru

**E-mail: sadush@icp.ac.ru

The variation of the principal force parameters associated with polymethylmethacrylate ablation by means of continuous CO₂ laser radiation was subjected to investigation. The complex parameter, defined as the sum of the target weight and the reactive recoil force of the ablation flux, was measured using a force-measuring device with computer registration and a time resolution of 126.5 ms. The experimental data for the initial interval of 0–2 s were approximated by a model function, which enabled the identification of changes in the target weight and recoil force of the ablation flux during irradiation. The energy efficiency of the process in a low thrust jet engine ($C_m = 115 \mu\text{N/W}$) has been determined for the moment when the ablation rate reaches the stationary regime. This decreases with the laser irradiation time due to the formation of a crater with a concave surface and an increase in the gas pressure in the ablation chamber. It should be noted that the type of the ablation curve and, consequently, the approximating function for the initial stage of ablation are specific to each polymer and laser beam parameter.

Keywords: IR laser, ablation, polymethylmethacrylate, gaseous product reactive recoil

REFERENCES

1. Krasovskiy A.M., Tolstopyatov E.M. // Surface. Physics, Chemistry, Mechanics. 1985. № 1. P. 143.
2. Korshak V.V., Said-Galiev E.E., Nikitin L.N., Gribova I.A. // Dokl. of the USSR Academy of Sciences. 1983. V. 269. P. 1119.
3. Tolstopyatov E.M., Grakovich P.N., Ivanov L.F. // Izv. AN BSSR. Ser. chem. nauk. 1989. № 4. P. 23.
4. Korshak V.V., Gribova I.A., Said-Galiev E.E. // Mechanics of Composite Mater. 1987. № 6. P. 985.
5. Said-Galiev E.E., Nikitin L.N. // Mechanics of Composite Mater. 1992. № 2. P. 152.

6. *Krasovskiy A.M., Tolstopyatov E.M.* Obtaining thin films by polymer atomisation in vacuum. Moscow: Science and Technology, 1989. 181 p.
7. *Tolstopyatov E.M., Ivanov L.F., Grakovich P.N., Krasovsky A.M.* // Proc. SPIE. 1998. V. 3343. P. 1010.
8. *Tolstopyatov E.M.* // J. Phys. D: Appl. Phys. 2005. V. 38. P. 1993.
9. *Grakovich P.N., Ivanov L.F., Kalinin L.A.* // Journal of General Chemistry. 2009. vol.79. P. 626.
10. *Tolstopyatov E.M., Grakovich P.N., Rakhmanov S.K., Vasilkov A.Yu., Nikitin L.N.* // Inorganic Materials: Appl. Res. 2012. V. 3. P. 425.
11. *Tolstopyatov E.M., Grakovich P.N., Ivanov L.F., Allayarov S.R., Olkhov Yu. A., Dixon D.A.* // J. Rus. Laser Res. 2015. V. 36. P. 485.
12. *Allayarov S.R., Kalinin L.A., Tolstopyatov E.M., Grakovich P.N., Ivanov L.F., Dixon D.A.* // J. Rus. Laser Res. 2017, V. 38. P. 364.
13. *Allayarov S. R., Tolstopyatov E.M., Dixon D.A., Kalinin L.A., Grakovich P.N., Ivanov L.F., Golodkov O.N.* // J. Rus. Laser Res. 2017. V. 38. P. 369.
14. *Frolov I.A., Allayarov S.R., Kalinin L.A., Dixon D.A., Tolstopyatov E.M., Grakovich P.N., Ivanov L. F.* // J. Rus. Laser Res. 2018. V. 39. P. 98.
15. *Frolov I.A., Allayarov S.R., Kalinin L.A., Bogdanova Y.G., Tolstopyatov E.M., Grakovich P.N., Ivanov L.F., Dremova N.N., Golodkov O.N.* // High Energy Chemistry. 2019. V. 53. P. 464.
16. *Allayarov S.R., Confer M.P., Dixon D.A., Rudneva T.N., Kalinin L.A., Tolstopyatov E.M., Golodkov O.N.* // Polymer Degradation and Stability. 2020. V. 181. 109331.
17. *Phipps C., Luke J.* // Abstr. Book of E-MRS Spring Meeting, Strasbourg, 10–13 June 2003 / The European Research Society. Strasbourg, 2003. H-VIII.2.
18. *Phipps C., Birkan M., Bohn W. et al.* // J. Propulsion and Power. 2010. V. 26. P. 609.
19. *Frolov I.A., Allayarov S.R., Tolstopyatov E.M., Utkin A.V., Grakovich P.N., Ivanov L.F., Makarenko V.M.* // High Energy Chemistry. 2022. V. 56. P. 64.
20. *Frolov I.A., Allayarov S.R., Kalinin L.A., Tolstopyatov E.M., Grakovich P.N., Ivanov L.F.* // High Energy Chemistry. 2022. V. 56. P. 445.
21. *Madorsky S.* Thermal decomposition of organic polymers / Transl. from English, ed. by S.R. Rafikov // M.: Mir, 1967. 328 p.
22. *Technology of Thin Films (Reference Book)* / Ed. by L. Myssel, R. Glang: Transl. from English, ed. by M.I. Elinson, G.G. Smolko, V. I. M.: Sov. Radio, 1977. P. 664.
23. <https://webbook.nist.gov/cgi/cbook.cgi?ID=C80626&Units=SI&Type=IR-SPEC&Index=0#IR-SPEC>