

АНАЛИЗ ДИНАМИКИ ЛАЗЕРНОЙ АБЛЯЦИИ ПОЛИМЕРОВ

Е.М. Толстомятов, Л.Ф. Иванов, П.Н. Гракович, Л.А. Калинин
*Институт механики металлополимерных систем им. В.А. Белого НАН Беларуси,
ул. Кирова 32а, Гомель 246050, Беларусь, etolstopy@mail.ru*

Выполнен анализ динамики абляции полиметилметакрилата непрерывным излучением CO₂ лазера мощностью 40 Вт. С использованием силоизмерительного устройства регистрировался комплексный параметр абляции, включающий изменение веса мишени и противоположно направленную реактивную силу отдачи абляционного потока. Начальная стадия абляции, протекающая с практически плоской поверхности мишени, описана предложенной моделью. Показано, что скорость вылета молекулярных частиц, характеризующая температуру поверхности, в полтора раза превышает линейную скорость абляционного потока, рассчитанную по амплитуде начального выброса и скорости абляции. Сделаны предположения о причинах снижения реактивной силы отдачи по мере увеличения длительности лазерного облучения. Основными факторами влияния на снижение силы отдачи являются: 1) рост кривизны поверхности при образовании и углублении кратера; 2) образование и углубление цилиндрической части кратера; 3) рост внешнего давления газовой среды из-за превышения интенсивности абляционного газообразования над производительностью откачной системы.

Ключевые слова: лазерная абляция; модель абляции; скорость абляции; реактивная сила отдачи; полиметилметакрилат.

DINAMICS ANALYSIS OF LASER ABLATION OF POLYMERS

E.M. Tolstopyatov, L.F. Ivanov, P.N. Grakovich, L.A. Kalinin
*V.A. Belyi Metal-Polymer Research Institute of National Academy of Sciences of Belarus,
32a Kirov Str., 246050 Gomel, Belarus, etolstopy@mail.ru*

The dynamics of polymethyl methacrylate ablation by a 40-W continuous CO₂ laser beam was analyzed. Using a force-measuring device, a complex ablation parameter was recorded, which includes a change in the target weight and an oppositely directed reactive recoil force of the ablation flow. The initial stage of ablation proceeding from a practically flat target surface is described by the model based on cosine law distribution of the flux density (Lambert-Knudsen distribution). It is shown that the escape velocity of molecular particles, which characterizes the surface temperature and the polymer decomposition mechanism, is one and a half times higher than the linear velocity of the ablation flow, calculated as the maximum reactive recoil force divided by the ablation rate. The ablation function was experimentally determined at laser irradiation of polymethyl methacrylate for 16 seconds. Quantitatively established the decrease in the reactive recoil force with the irradiation time. An assumption is made about the factors of influence on the magnitude of the reactive recoil force. They are: 1) an increase in surface curvature during the formation and deepening of the crater; 2) formation and deepening of the cylindrical part of the crater; 3) an increase in the external pressure of the gaseous medium due to the excess of ablation gas formation intensity over the performance of the evacuation system.

Keywords: laser ablation; ablation model; ablation rate; reactive recoil force; polymethyl methacrylate.

Введение

Лазерная абляция (ЛА) полимеров находит применение в технологиях обработки материалов, нанесения тонкослойных покрытий, литографии и других отраслях. В последнее время появились предложения по использованию ЛА в качестве средств малой тяги для коррекции траекторий и ориентации космических летательных аппаратов, а также частиц “космического мусора” [1-2]. Последнее применение требует

тщательного анализа динамики, в частности, малоисследованного процесса ЛА полимеров непрерывным лазерным излучением, что является целью представленной работы.

Объекты и методы исследования

В первой части работы сформулирована модель, описывающая начальную стадию низкоинтенсивной лазерной абляции полимера в вакууме или разреженной среде.

Экспериментальная часть работы выполнена на вакуумной установке ВУП-4, оснащенной СО₂ лазером ЛГН-703 с мощностью непрерывного излучения 40 Вт. Регистрация интегрального параметра «вес мишени+реактивная сила отдачи абляционной струи» выполнялась с использованием силоизмерительного устройства (СУ) с чувствительностью 10 мкН; результаты передавались в компьютер с временной дискретностью 125.5 мс.

В качестве мишени использовался полиметилметакрилат (ПММА), разлагающийся при высоких температурах на мономер метилметакрилат практически со 100-процентным выходом [3].

Результаты и их обсуждение

При низкоинтенсивной абляции в разреженном газе, когда длина свободного пробега молекулярных частиц - продуктов деструкции полимера превышает размеры зоны лазерного облучения, плотность потока частиц I_{0e} с плоской поверхности имеет косинусоидальное распределение по углам к нормали (аналогично закономерности Ламберта) [4]. Это позволяет определить удельную скорость абляции (УСА) на единицу площади поверхности, приняв за основу плотность потока частиц по нормали к поверхности ($\theta=0$) $|I_{0e}(r)| = I_{0e}(r)$

$$I_e(r) = 2\pi I_{0e} \int_0^{\pi/2} \sin \theta \cos \theta d\theta = \pi I_{0e}(r)$$

Полная скорость абляции Φ со всей плоской зоны лазерного облучения с радиусом R и аксиальной симметрией распределения интенсивности по сечению луча:

$$\Phi = 2\pi^2 \int_0^R I_{0e}(r) r dr$$

При однородном распределении интенсивности по радиусу луча:

$$\Phi = \pi^2 R^2 I_0,$$

а при гауссовском распределении с параметром b :

$$\Phi = (\pi^2/b) I_0 [1 - \exp(-bR^2)],$$

где I_0 – удельная скорость абляции в центре зоны облучения.

Удельная (на единицу площади) реактивная сила отдачи F_e , создаваемая вылетающими продуктами абляции из достаточно малой поверхности, которая может считаться плоской, определяется формулой:

$$F_e = 2\pi v n_e \int_0^{\pi/2} (n_e, I_{\theta e}) \sin \theta d\theta = -\frac{2\pi}{3} v I_{0e} n_e$$

где v – средняя скорость вылета частиц абляции с поверхности. Скобками обозначено скалярное произведение векторов плотности потока продуктов абляции $I_{\theta e}$ под углом θ к нормали и орта локальной нормали n_e .

Реактивная сила отдачи на мишень F , создаваемая полным абляционным потоком, определяется интегралом по всей площади облучения, в общем случае с учетом зависимости параметров локальных векторов сил отдачи F_e на единицу площади от положения в облучаемой зоне относительно ее центра. Её модуль:

$$|F| = 2\pi \int_0^R (n, F_e) r dr = 2\pi \int_0^R F_e(r) \cos[\vartheta(r)] r dr$$

где $\vartheta(r)$ – полярный угол между главным вектором нормали к поверхности в центре зоны облучения и вектором локальной нормали в точке r . Для частного случая абляции с плоской поверхности ($\vartheta=0$) при однородном распределении интенсивности излучения по радиусу $|F| = \frac{2}{3}(\pi R)^2 v I_0$, а при гауссовском распределении

$$|F| = (2\pi^2/3b) v I_0 (1 - \exp(-bR^2)).$$

В большинстве экспериментов в зависимости от времени абляции регистрируется комплексный параметр, включающий реактивную силу отдачи абляционной струи и интегральную убыль массы мишени. Раздельно эти составляющие выявляются только для одной точки – для конца процесса. Скорость абляции изменяется только в начальный период выхода на ре-

жим (первые 1-1.5 с облучения) и сохраняется практически постоянной до конца процесса. Однако реактивная сила отдачи абляционной струи, как показали эксперименты, по ряду причин по мере облучения изменяется существенно. Поэтому оценка линейной скорости абляционного потока, вносящей вклад в формирование реактивной силы, по этим данным возможна только для конца облучения:

$$V_k \approx F_k / (dM/dt) \approx F_k / \Phi$$

Эта скорость отличается по величине от скорости вылета молекулярных частиц с поверхности, которая равна:

$$V = \frac{3F_{max}}{2\Phi}$$

Знание величины этой скорости важно, поскольку она является одним из параметров, характеризующих температуру поверхности и, следовательно, механизм лазерной деструкции полимера.

Приведенная выше корреляция между скоростью вылета частиц и линейной скоростью абляционного потока справедлива лишь для абляции с плоской поверхности. При абляции с поверхности кратера эффективная линейная скорость потока будет тем ниже, чем больше кривизна его поверхности. Если известна закономерность изменения формы кратера в процессе абляции, то возможна оценка всех параметров процесса, включая реактивную силу отдачи и температуру поверхности кратера.

На рис. 1 приведена зависимость показаний силоизмерительного устройства от времени абляции ПММА.

Процесс абляции начинается с плоской поверхности мишени, поэтому на участке от $t=0$ до точки максимума А возможна аппроксимация зависимости сложной функцией, учитывающей принципы изложенной выше модели. За крутой подъем кривой на начальном участке 0–А отвечает рост реактивной силы отдачи, происходящий вследствие расширения зоны абляции от центра пятна облучения к периферии.

Далее на участке А–Б зона и скорость абляции практически стабильны, а спад показаний прибора вызван снижением веса

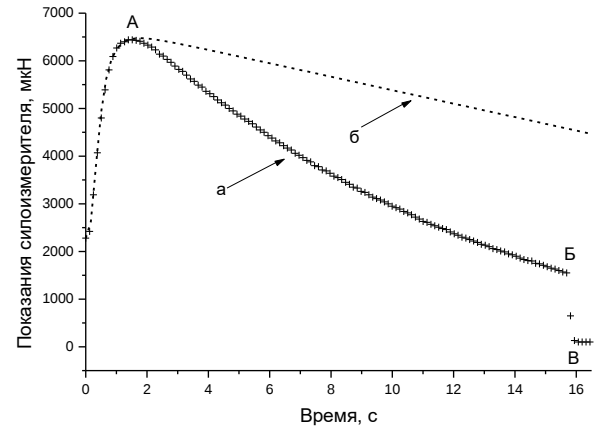


Рис. 1. Зависимость комплексного параметра абляции ПММА непрерывным излучением CO₂ лазера: а – экспериментальная кривая; б – аппроксимация на начальном участке

мишени и падением реактивной силы отдачи абляционного потока. Аппроксимирующая кривая, базирующаяся на постоянстве реактивной силы в этом интервале, описывает только снижение массы мишени с практически постоянной скоростью 14.1 мг/с, а гипотетическая реактивная сила отдачи абляционного потока предполагалась постоянной. Сравнение с экспериментальным графиком показывает, что реальная реактивная сила отдачи уменьшается с ростом времени облучения и в точке В (после выключения лазера) оказывается значительно меньшей, чем в точке А. Величина этой разницы зависит от условий процесса, его длительности и исходного полимера мишени.

Предложены объяснения эффекту снижения реактивной силы отдачи абляционной струи:

образование кратера с кривизной поверхности, растущей по мере его углубления;

рост давления внешней газовой среды, образованной из продуктов абляции, если производительность откачной системы недостаточна;

рост цилиндрической части кратера, что меняет газовые потоки и точки приложения реактивной силы отдачи;

на стадии развитой абляции к поверхностному испарению продуктов деструкции добавляется компонент выброса из

подповерхностного слоя, что изменяет распределение направлений истекающих газов.

Все эти факторы проверены экспериментально и нашли качественное подтверждение.

Заключение

Сформулирована и проанализирована модель низкоинтенсивной абляции полимеров непрерывным лазерным излучением, при котором длина свободного пробега молекулярных частиц-продуктов деградации полимера превышает размеры зоны облучения. Показано, что скорость вылета частиц с плоской поверхности в полтора раза превышает линейную скорость абляционного потока, определённую как отношение измеренной реактивной силы отдачи к скорости абляции. Модель использована для анализа и оценки параметров начального этапа лазерной абляции полиметилметакрилата, для которого предложена аппроксимация в виде аналитической функции.

Для объяснения снижения реактивной силы отдачи с течением времени облуче-

ния предложено три основных фактора, которые качественно подтверждены дополнительными экспериментами.

На основании проведенного анализа возможен выбор режимов лазерного облучения, обеспечивающих заданные параметры реактивной силы отдачи на облучаемый объект.

Работа выполнена в рамках ГПНИ «Материаловедение, новые материалы и технологии 4.2.2, НИР-3.

Библиографические ссылки

1. Urech L., Lippert T. Designed Polymers for Ablation. *Laser Ablation and its Application* 2007; 129: 281-297.
2. Фролов И.А., Аллаяров С.Р., Калинин Л. А., Толстопятов Е.М., Гракович П.Н., Иванов Л.Ф. Исследование импульса отдачи газообразных продуктов ИК-лазерной абляции полистирола и композита полистирола с углеродными нанотрубками, полученных радиационной полимеризацией стирола. *Химия высоких энергий* 2022; 56(6): 445-450.
3. Мадорский С. Термическое разложение органических полимеров. Пер. с англ. под ред. С.Р. Рафикова. М.: Мир; 1967. 328 с.
4. Технология тонких пленок (справочник) // Под ред. Л. Майссела, Р. Глэнга: Т.1. М.: Сов. Радио; 1977. 664 с.