

УДК 001.891.572+537.874.72

МОДЕЛИРОВАНИЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ ВЫСОКОМОЩНОГО ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА МАТЕРИАЛ

Терехова М.С., Рудиков С.И., Шкадаревич А.П.

УП НТЦ «ЛЭМТ» БелОМО
Минск, Республика Беларусь

Аннотация. В работе приведены две модели, построенные в программных пакетах Matlab и Comsol, описывающие теплофизическую составляющую процесса воздействия лазерного излучения (далее – ЛИ) на материал. Разработанные модели учитывают различные действующие факторы (влияние системы лазера, среды распространения, характеристик материала) и являются первым приближением. Модели сходятся между собой, что подтверждает правильность сделанных допущений в описываемых условиях.

Ключевые слова: моделирование, лазерное излучение, обработка поверхности.

MODELING OF HIGH ENERGY LASER INFLUENCE ON MATERIAL

Terekhova M., Rudikov S., Shkadarevich A.

Unitary Enterprise STC "LEMT" of the BelOMO
Minsk Belarus

Abstract. Here we define two models (Matlab and Comsol based) which describe thermophysical part of laser radiation interaction on the material and which is the first approximation of the interaction. Different factors are considered in the models (impacts of laser system, propagation medium and material characteristics). Those models are convergent *inter se*, which confirms accuracy of assumptions in described conditions.

Key words: modelling, laser radiation, surface treatment

Адрес для переписки: Терехова М. С., ул. Макаенка, 23, корп. 1, 220113, Республика Беларусь
e-mail: terekhova.m.s@yandex.by

Высокомощное лазерное излучение широко применяется в промышленных специальных технологиях. Одно из перспективных разрабатываемых направлений – осуществление дистанционного реза, очистки и обезвреживания объекта. Примером таких устройств являются установки для дистанционной резки труб при авариях на газодобывающих предприятиях [1], очистка поверхности материала (бетона, металла) от внешних загрязнений (радиоактивное загрязнение, коррозия, краска и т.д.) [2], дистанционное обезвреживание объектов и взрывоопасных предметов [3]. Преимуществом использования лазера в перечисленных случаях является большая экономичность и технологичность воздействия по сравнению с традиционными средствами, точность и дальность действия, относительная безопасность и экологичность. В то же время разработка подобных устройств является сложной технической и технологической задачей. Целью данной работы является сравнение моделей для предварительной оценки требуемых параметров устройств дистанционного лазерного воздействия на материал.

Действие лазерного излучения (ЛИ) на материал приводит к появлению оптических, электрических и тепловых эффектов, которые имеют нелинейный характер при плотности мощности ЛИ 10^8 – 10^{10} Вт/см². При более низких плотностях мощности можно пренебречь зависимостью параметров материала от интенсивности излучения и температуры. Тогда работу устройств лазерного разрушения материала

можно описать с помощью теплофизических, механических и химических процессов, таких как плавление, абляция, растяжение, окисление, возгорание и др. [4].

Для того, чтобы установить необходимые и достаточные параметры разрабатываемого лазерного устройства требуется провести моделирование процесса воздействия ЛИ на материал. Для этого можно выделить следующие действующие факторы:

1. Влияние системы лазера (параметры ЛИ (длина волны, мощность, параметр качества пучка), размер выходной оптической апертуры, характеристики телескопа, вибрация платформы, на которой установлен лазер, ошибка наведения и ошибка слежения (при работе с движущимися объектами воздействия)).

2. Влияние среды распространения ЛИ (распределение аэрозолей в воздухе, турбулентность, плотность воздуха и перепад температур, ветер, влажность и т.д.).

3. Влияние теплофизических и оптических характеристик материала (вид материала, коэффициент поглощения, отражения, пропускания света).

Расчет энергии, необходимой для эффективного воздействия на материал, определяется в соответствии с первым началом термодинамики: энергия, переданная объекту, расходуется на нагрев, плавление и испарение материала или на нагрев и последующую абляцию материала. Доля поглощенной энергии определяется с одной стороны коэффициентом поглощения поверхности, а с другой коэффициентом ослабления в ат-

мосфере. Поскольку ЛИ при распространении в открытом пространстве испытывает поглощение и аэрозольное и молекулярное рассеяние долю энергии, доходящей до объекта, можно оценить по закону Бугера-Ламберта-Бера. В то же время часть поглощенной энергии расходуется на тепловое излучение. Следовательно, общее выражение для определения времени воздействия (τ), т.е. времени, необходимого для разрушения слоя вещества, может быть определено следующим образом:

$$Q = cm(T_{melt} - T_0) + L_{melt}m,$$

$$P_{rad} = \varepsilon\sigma S(T_{melt}^4 - T_0^4),$$

$$\tau = \frac{Q}{P \cdot \alpha \cdot e^{-\tilde{\varepsilon}L} - P_{rad}},$$

где c – удельная теплоемкость, m – масса области материала, на которую приходится воздействия пучка, T_{melt} – температура плавления материала, T_0 – начальная температура материала, L_{melt} – удельная теплота плавления, $\tilde{\varepsilon}$ – коэффициент экстинкции, α – коэффициент поглощения поверхности, ε – коэффициент излучения поверхности, σ – константа Стефана-Больцмана, S – площадь излучающей поверхности, P – мощность ЛИ.

Размер пучка определяется вкладами первого и второго перечисленных выше факторов. Параметры оптической системы и дифракционные ограничения апертуры позволяют определить расчетное значение диаметра пучка (радиус Эйри). Влияние турбулентности, возникающей в атмосфере, учитывается с помощью структурного показателя преломления C_n (в данном приближении он считается постоянным). Тогда конечный радиус пучка определяется следующими выражениями:

$$\langle r_{total}^2 \rangle = r_{diff}^2 + r_{turb}^2 + r_{jitter}^2.$$

На основании изложенного были проведены вычисления в программном пакете Matlab. Расчетное время воздействия ЛИ мощностью 3 кВт (дистанция 2 км) на объект (белый конструкционный пенопласт толщиной 2 мм) составляет 0,14 с для атмосферы с параметром турбулентности $C_n=10^{-7.5}$ (высокая турбулентность) [5].

Моделирование процесса воздействия ЛИ на материал может быть также выполнено с помощью программного пакета Comsol Multiphysics с привлечением модулей Heat transfer in solids и Deformed geometry. Лазерное излучение моделируется с помощью введения потока энергии, распределенной по Гауссу, через одну из границ. Тепловой поток зависит от поглощающей способности материала. Свойства материала при этом изменяются скачком при достижении температуры плавления. Влияние атмосферы учитывается при определении радиуса пучка и мощно-

сти излучения, достигающей поверхности. Скорость движения профиля верхней границы материала при плавлении прямо пропорциональна потоку энергии и обратно пропорциональна удельной теплоте плавления. Движение верхней границы не учитывает процесс выброса вещества из образующегося кратера. Таким образом, модель, построенная в Comsol, позволяет воспроизвести изменение профиля поверхности материала за установленное время. В данном случае расчетное время воздействия ЛИ мощностью 3 кВт на белый конструкционный пенопласт составляет 0,38 с при тех же параметрах атмосферы.

Значения времени воздействия ЛИ на материал, полученные двумя программными пакетами, различаются. Это объясняется тем, что расчет в среде Matlab является первым приближением и учитывает только факт поглощения энергии, не рассматривая теплообмен внутри материала и излучение всей поверхностью. Однако модели можно считать сходящимися (одинаковый порядок величин), что подтверждает правильность выбранных допущений в рамках первого приближения и позволяет использовать их независимо для определения параметров разрабатываемой системы. Значения, полученные с помощью каждой модели, не являются конечными, требуют экспериментальной проверки и оценки соответствующих поправочных коэффициентов в каждом конкретном случае.

Вывод. На основе моделей, разработанных в программных пакетах Matlab и Comsol с использованием условия теплового равновесия, получены сходящиеся результаты, которые положены в основу разработки экспериментального образца мощного лазерного источника на основе 3кВт волоконного лазера. Корректность результатов моделирования будет проверена на экспериментальных данных.

Литература

1. Гвоздев, С. В. Прохождение лазерного излучения сквозь пламя углеводородов и дистанционная лазерная резка материалов / С. В. Гвоздев. – Москва : Государственный научный центр Российской Федерации Троицкий институт инновационных и термоядерных исследований, 2020. – 102 с.
2. Anthofer, A. Laser decontamination of epoxy painted concrete surfaces in nuclear plants / A. Anthofer, W. Lippmann, A. Hurtado // Opt. Laser Technol. – 2014. – Vol. 57. – P. 119–128.
3. Horkovich, J. Directed Energy Weapons: Promise & Reality / J. Horkovich // 37th AIAA Plasmadynamics and Lasers Conference: 37th AIAA Plasmadynamics and Lasers Conference / American Institute of Aeronautics and Astronautics. – San Francisco, California, 2006.
4. Взаимодействие лазерного излучения с веществом: силовая оптика / В.П. Вейко [и др.] – Москва : Физматлит, 2008.
5. Nielsen, P. E. Effects of directed energy weapons / P. E. Nielsen. – Institute for National Strategic Studies, 1994. – 368 p.