

УДЕЛЬНАЯ ЭНЕРГИЯ ЛАЗЕРНОГО РАЗРУШЕНИЯ РЯДА СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ

© 2007 г. В. М. Журба*, В. Н. Иванов**, И. М. Кобилев*, В. М. Митькин*, доктор техн. наук

* ООО “Научно-производственное предприятие волоконно-оптического и лазерного оборудования”, Санкт-Петербург

** НИТИОМ “ВНЦ “ГОИ им. С.И. Вавилова””, Санкт-Петербург

Экспериментально определены значения удельной энергии разрушения ряда строительных материалов с использованием лазерного излучения на длинах волн 1,06 и 10,6 мкм. На примере SiO_2 -содержащих материалов отмечена зависимость энергетических параметров лазерного разрушения от их плотности. Показано, что для обоих излучений графики изменения удельной энергии разрушения с изменением плотности материала описываются параболической зависимостью и различаются только уровнем значений.

Коды OCIS: 350.3390.

Поступила в редакцию 23.09.2006.

Введение

Лазерная техника давно привлекает внимание специалистов строительного профиля. Область их интересов распространяется от использования низкоинтенсивных лазеров для информационно-измерительных систем [1] до применения мощных лазеров, например, для проходческих комбайнов, когда наряду с механическим разрушением лазерным излучением осуществляется предварительное термическое ослабление породного забоя [2].

На лазерные технологии обработки материалов, в основе которых лежит тепловой механизм воздействия, в последнее время обратили внимание и специалисты, работающие в области реставрации. Традиционные операции сверления, резания, очистки, дробления, прошивки и т. д., проводимые с использованием стандартного оборудования, связаны с механическими и вибрационно-ударными воздействиями на материал. Такие воздействия являются нежелательными при реставрационных работах из-за возможности утраты отдельных фрагментов при восстановлении и укреплении изначально ослабленных основ конструкции. Кроме того, вибрационно-ударные воздействия могут нарушать исходное положение окружающих деталей, могут вызывать процессы неконтролируемого разрушения, смещения как материала, так и элементов, деталей или их частей. Лазерная же обработка материалов обеспечивает более щадящие режимы их разрушения.

Постановка задачи

Тепловой процесс является универсальным механизмом разрушения, пригодным для всех без исключения материалов. А возможность при лазерном

облучении обеспечивать высокую локальность и дозировку нагрева, чистоту в зоне обработки, сохранность геометрической формы и качества поверхности, заданную глубину и ширину снимаемого материала в сочетании с возможностью обработки контуров сложной конфигурации перемещением лазерного пучка, с бесконтактностью воздействия, с отсутствием шумов и вибраций придает лазерным методам обработки материалов неоспоримые преимущества.

Одним из важных факторов, влияющих на энергоемкость процесса лазерного разрушения материалов, является удельная энергия разрушения, которая различна для разных материалов [3, 4]. Удельная энергия разрушения является характеристикой материала и не зависит от его толщины, мощности излучения, режимов обработки. Знание этого параметра позволяет разработчикам правильно выбирать тип лазера и режимы работы для достижения наивысшей эффективности обработки конкретного материала, например, при сверлении глубоких отверстий в нем [5].

Данная статья и посвящена определению удельной энергии лазерного разрушения ряда строительных материалов, включая и наиболее употребительные: бетон и дерево.

Экспериментальные результаты и их обсуждение

Эксперименты проводились с использованием лазерного излучения с длинами волн 1,06 и 10,6 мкм при разных плотностях излучения и длительностях воздействия на материал. Для контроля площади воздействия на материал на пути излучения непосредственно перед образцом устанавливались ди-

афрагмы с калиброванными диаметрами отверстий. Плотность излучения менялась как изменением диаметра отверстия в диафрагме на пути квазипараллельного пучка, так и перемещением диафрагмы с образцом вдоль оси расходящегося излучения, формируемого вспомогательной фокусирующей линзой, вводимой на пути лазерного пучка. Для всех используемых материалов определялась удельная энергия разрушения, для чего в образцах создавались кратеры и измерялись их геометрические параметры. В деревосодержащих материалах, гипсокартоне, гипсе, минеральной вате кратеры формировались в виде цилиндрических углублений. Для оценки значений удельной энергии разрушения этих материалов использовались углубления диаметром 2–4 мм и глубиной до 11 мм, а для пенопласта – диаметром 4 мм и длиной до 110 мм. Кратеры в бетоне, кирпиче, кафеле, граните при диаметре пятна воздействия 2–4 мм формировались в виде конусообразных лунок с рельефными поверхностями, причем характер этого рельефа соответствует размеру образующих материал структурных частиц (для кафеля мельче, для бетона крупнее). При фокусировке излучения в них получались углубления диаметром 1 мм и глубиной до 15 мм.

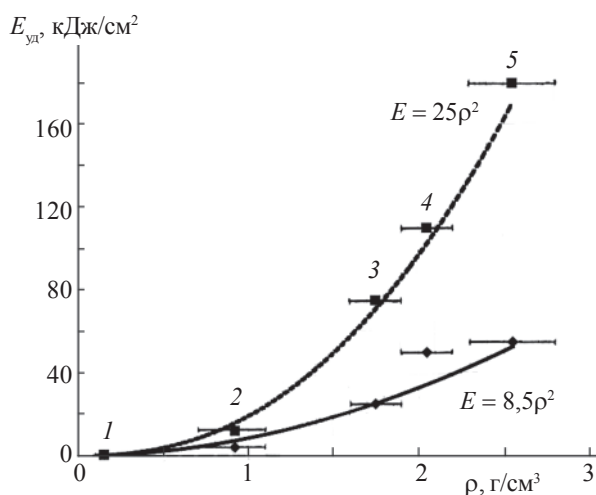
Полученные экспериментальные значения удельной энергии разрушения используемых строительных материалов приведены в таблице.

Из анализа данных следует вывод о влиянии плотности ρ материалов с общей основой на энергетические параметры их лазерного разрушения. Это демонстрирует рисунок, на котором сопоставлены значения удельной энергии разрушения SiO_2 -содержащих материалов со значениями их плотности. Горизонтальными черточками на графиках показан интервал, в пределах которого колеблются приведенные в разных изданиях данные о плотности указанных материалов. Как видно, для обоих излучений графики изменения удельной энергии разрушения с изменением плотности материала подобны и различаются только уровнем значений. Ход кривых описывается параболической зависимостью $E_{\text{уд}} = 25\rho^2$ (пунктирная линия) и $E_{\text{уд}} = 8,5\rho^2$ (сплошная линия). Такой характер изменения удельной энергии разрушения с изменением плотности материала может быть объяснен с привлечением результатов работы [6].

Эксперименты проводились с реальной микро неоднородной структурой с неравномерным распределением химических связей по объему. Для таких материалов в работе [6] развивается представление о том, что предельная прочность их равна максимальному внутреннему давлению с обратным знаком, т. е. предельному напряжению, необходимому для разрыва сил сцепления между частица-

Удельные энергии разрушения строительных материалов

Материал	Плотность, г/см ³	Длина волны излучения, мкм	Уд. энергия разрушения, кДж/см ³
Бетон	1,9–2,2	1,06	110 ± 15
		10,6	51 ± 5
Гранит	2,3–2,8	1,06	180 ± 30
		10,6	55 ± 5
Кирпич	1,6–1,9	1,06	75 ± 5
		10,6	24 ± 2
Кафель	1,8	глазур. пов.	125 ± 30
		10,6	19 ± 2
		шерох. пов.	37 ± 2
Гипс	0,74–1,1	1,06	12 ± 2
		10,6	3,8 ± 0,2
Гипсокартон	—	1,06	12
		10,6	3,5
Картон	0,69	1,06	9 ± 1
		10,6	5 ± 0,5
Сосна	0,55	1,06	8 ± 2
		10,6	1 ± 0,4
Бук	0,9	1,06	10 ± 2
		10,6	4,8 ± 1,2
ДВП	0,6	1,06	5,3 ± 0,7
		10,6	5,2 ± 0,8
ДСП	0,8	1,06	—
		10,6	3,1 ± 1,4
Минеральная вата	0,1–0,2	1,06	0,26 ± 0,01
		10,6	0,23 ± 0,02
Пенопласт	0,02	белый	0,13 ± 0,02
		10,6	0,015 ± 0,003
		желтый	0,84 ± 0,1
		10,6	0,053 ± 0,005



Экспериментальные (значки) и расчетные (линии) зависимости удельной энергии лазерного разрушения SiO_2 -содержащих материалов от их плотности при использовании излучений с длиной волны 1,06 мкм (квадрат, пунктирная линия) и 10,6 мкм (ромб, сплошная линия). 1 – минеральная вата, 2 – гипс, 3 – кирпич, 4 – бетон, 5 – гранит.

ми. Если это так, то нам достаточно проанализировать поведение максимального внутреннего давления с изменением плотности материала.

Условие баланса требует, чтобы внешнее давление p совместно с внутренним давлением p_i , обусловленным силами сцепления между частицами, уравновешивало тепловое давление p_r , действующее на поверхность тела изнутри,

$$p + p_i = p_r. \quad (1)$$

При повышении температуры в твердом теле увеличивается интенсивность теплового движения частиц и производимое им тепловое давление p_r , которое компенсируется внутренним давлением p_i .

Для термодинамического определения слагаемых уравнения (1) используем следующую запись уравнения состояния твердого тела [6]:

$$p + dU/dV = \text{const}(E/V), \quad (2)$$

где U – потенциальная энергия, она является функцией объема V .

Правую часть в уравнении (2) можно рассматривать как поступающую извне плотность тепловой энергии, а $p \ll p_i$.

Поскольку потенциальная энергия складывается из энергий связей, объединивших частицы в твердое тело, внутреннее давление $p_i = dU/dV$ представляет собой упругую реакцию тела на его всестороннее растяжение при нагреве и для изотропного твердого тела может быть выражено через квазиупругую силу $f(a)$ и расстояние между соседними частицами a [6]

$$p_i = f(a)/a^2. \quad (3)$$

В материалах одного класса (с общей основой) изменение расстояния между частицами, вызванное изменением либо их концентрации, либо концентрации модификаторов, связано с изменением плотности, так как для упругого состояния объемные изменения связаны с линейными соотношением $\Delta V/V \sim 3\Delta a/a$. То есть мы можем переписать выражение (3) в виде, отображающем параболическую зависимость внутреннего давления также и от плотности материала,

$$p_i \sim f(a)\rho^2. \quad (4)$$

В соответствии с уравнением (2) и удельная энергия лазерного разрушения, отвечающая максимально допустимой величине внутреннего давления, т. е. прочности материала, также должна меняться с изменением плотности материала по параболическому закону, что мы и наблюдаем экспериментально.

Как видно из рисунка рыхлые материалы типа минеральной ваты имеют самое низкое значение удельной энергии разрушения. Плотные материалы, возникшие при высоких температурах и давле-

ниях (гранит), имеют самое высокое значение этой энергии.

На энергетические параметры разрушения скажутся и локальные изменения плотности материала, обусловленные технологией получения деталей. Например, при лазерной обработке кафеля наблюдается различие энергетических параметров разрушения для глазурированной (лицевая сторона) и шероховатой (обратная сторона) поверхностей. С углублением кратера со стороны глазури удельная энергия разрушения для излучения 1,06 мкм уменьшается от значения 152 кДж/см³ (глубина 0,5 мм) до 55 кДж/см³ (глубина 2,5 мм), в чем проявляется влияние менее прочной основы материала с удельной энергией разрушения 37 кДж/см³ (данные измерения для обратной стороны плитки).

Кроме влияния плотности материала во всех экспериментах в той или иной степени прослеживается также влияние поглотительной способности материалов для данной длины волны излучения. В отличие от излучения с длиной волны 10,6 мкм, поглощаемого в очень тонком поверхностном слое практически всеми материалами, излучение с длиной волны 1,06 мкм из-за меньшего его поглощения ими проникает на большую глубину. Тепловыделение в материале для данного излучения приобретает уже объемный характер с меньшей удельной величиной и для нагрева материала до того же значения температуры в этом случае требуется затратить больше энергии. Действительно, в соответствии с экспериментами значение удельной энергии разрушения материалов для излучения с длиной волны 1,06 мкм в несколько раз превышает значение, получаемое при использовании излучения с длиной волны 10,6 мкм.

Эффект объемного тепловыделения наиболее ярко проявился при обработке пенопласта. Излучение с длиной волны 1,06 мкм, проникая внутрь пенопласта, одновременно подвергается диффузионному рассеянию во все стороны, что обеспечивает поглощение его в большем объеме материала в сравнении с объемом, занимаемым непосредственно лазерным пучком. Из-за низкого порога разложения пенопласта интенсивность рассеянного излучения оказывается достаточной для его разрушения и поэтому в нем образуются отверстия с поперечным диаметром, намного превышающим диаметр пятна воздействия. В пенопласте желтого цвета с большим поглощением данного излучения расширение отверстия менее заметно (меньшая доля излучения рассеивается). Для излучения же с длиной волны 10,6 мкм с поверхностным тепловыделением в обоих типах пенопласта формируются четко очерченные цилиндрические отверстия с диаметром, практически равным диаметру пятна излучения в зоне воздействия.

В сосне и буке при воздействии излучения с длиной волны 1,06 мкм формируются отверстия с сечением в виде эллипса, большая ось которого ориентирована параллельно годовым слоям с более плотной структурой. По-видимому, по этой причине при воздействии на торец порог обугливания и удельная энергия разрушения примерно в 2 раза меньше. Для излучения с длиной волны 1,06 мкм влияния разных структур дерева не проявляются. Формируются отверстия с ровными цилиндрическими почерневшими боковыми поверхностями.

При обработке гипсокартона результаты практически совпадали с данными для картона и гипса, так как он представляет собой сэндвич из гипсовой сердцевины, обложенной с двух сторон тонкими слоями картона. Воздействовали излучением на боковую поверхность (картон) и на торцевую (гипс). Если удельная энергия разрушения гипса для излучения с длиной волны 1,06 мкм меньше, чем у картона, то для излучения с длиной волны 1,06 мкм во столько же раз примерно больше. Это обусловлено большей степенью рассеяния излучения с длиной волны 1,06 мкм в мелкодисперсной среде гипса относительно более плотного картона. Для обоих излучений в гипсе получаются кратеры в виде цилиндров с четкими ровными боковыми поверхностями. Прочность гипса и определяет энергетические параметры разрушения гипсокартона, так как тонкий слой картона не оказывает влияния.

При используемых в экспериментах режимах лазерного воздействия на разные материалы были зафиксированы три типа процессов их разрушения: термоокислительный механизм, испарительный механизм, комбинация процесса испарения материала с его термораскалыванием.

В горючих материалах разрушение происходит в результате реакции окисления (горения) материала в области лазерного воздействия, сопровождаемой активным выделением газовой фазы продуктов разрушения. Дно и стенки кратера обугливаются. Поддув воздуха препятствует воспламенению материала.

Основным механизмом разрушения SiO_2 -содержащих материалов является испарение. В случае минеральной ваты с пористой структурой строения, затрудняющей теплообмен ее с окружающей средой, тонкие волокна в зоне воздействия испаряются практически мгновенно, образуя кратер. При интенсивном обдуве поверхности в области лазерного воздействия минеральная вата разрушению не поддается.

В плотных материалах типа кирпич, бетон, гранит, кафельная плитка разрушение происходит идентично. В зоне воздействия образуется остеклован-

ная масса материала, которая при дальнейшем облучении пузырится с последующим образованием кратера, глубина которого соизмерима с длиной перетяжки сфокусированного лазерного пучка.

В случае же гипса с мелкодисперсной структурой, полученной в результате естественного высыхания, к эффекту испарения фронтальной зоны материала добавляется механизм термораскалывания последующих слоев из спекшихся частиц материала, которые при остывании рассыпаются и легко отделяются от основной массы материала. Этот механизм является преобладающим в разрушении гипса. Для повышения эффективности обработки гипса рекомендуется выдувать эти частицы из кратера струей воздуха.

Именно перечисленные выше механизмы обеспечили получение отверстий, объемы которых и были использованы при расчетах удельных затрат лазерной энергии на разрушение материалов. Механизмы характеризуются наивысшими в данных группах материалов значениями энергетических затрат (наивысшими температурами разрушения) и поэтому приведенные в таблице значения применимы только для режимов сверления и резки строительных материалов.

Заключение

Экспериментально определены значения удельной энергии лазерного разрушения для широкого ассортимента строительных материалов. Проведены сравнительные испытания при воздействии излучениями с длинами волн 1,06 и 10,6 мкм. Для всех используемых материалов значение удельной энергии разрушения при воздействии лазерным излучением с длиной волны 10,6 мкм в несколько раз превышает значение, получаемое при использовании излучения с длиной волны 1,06 мкм. Установлено, что эта энергия также зависит от плотности материала. В частности, для SiO_2 -содержащих материалов установлен параболический характер увеличения удельной энергии лазерного разрушения с ростом их плотности, что позволяет прогнозировать энергетические параметры разрушения строительных материалов по их плотности.

ЛИТЕРАТУРА

1. Промышленное применение лазеров / Под ред. Г. Кебнера. М.: Машиностроение, 1988. 280 с.
2. Панин М.И. и др. Разрушение горных пород мощным лазерным излучением // Изв. Вузов. Горный журнал. 1974. № 2.
3. Дьюли У. Лазерная технология и анализ материалов. М.: Мир, 1986.

4. Григорьянц А.Г. Основы лазерной обработки материалов. М.: Машиностроение, 1989. 302 с.
 15. Журба В.М., Митькин В.М., Шишковский В.В. Свойства газовых термолинз, наводимых в зоне лазерного сверления с принудительным обдувом // Оптический журнал. 2004. Т. 71. № 5. С. 14–16.
 6. Сандитов Д.С., Бартнев Г.М. Физические свойства неупорядоченных структур. Новосибирск: Наука, 1982. 259 с.
-