

НЕВОСПРОИЗВОДИМОСТЬ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ ПРИ ЦИКЛИЧЕСКОМ ОБЛУЧЕНИИ ТВЕРДЫХ ТЕЛ ИНФРАКРАСНЫМ ЛАЗЕРНЫМ ИМПУЛЬСОМ

С. Д. Зотов, А. А. Кузнецов, А. А. Лебедев, Э. Н. Лоткова

Исследована акустическая эмиссия (АЭ), вызванная волной напряжения в образцах из твердых материалов с разными теплофизическими свойствами – меди, алюминия и стекла – при воздействии на их поверхность импульса излучения CO_2 лазера. Установлено, что при повторяющихся опытах, следовавших один за другим, общая картина АЭ (время появления сигналов АЭ, их амплитуды, и др.) не воспроизводится, что свидетельствует о происшедших необратимых локальных изменениях в структуре материала. Показано влияние величины критической плотности энергии материала на картину АЭ во время действия лазера.

Ключевые слова: лазерный импульс, медь, алюминий, стекло, акустическая эмиссия.

Введение. Исследование акустической эмиссии (АЭ), возникающей в твердых телах в результате различных воздействий, включая лазерное облучение, широко применяется для обнаружения и изучения протекающих в них процессов (см., напр., [1–3]). При этом важное значение имеет знание того, насколько изменяются данные АЭ при повторяющихся одинаковых воздействиях. В данной работе приведены результаты экспериментов по наблюдению в многократно повторяющихся опытах АЭ от стержней из алюминия, меди и стекла марки “Крон” при облучении одного из торцов импульсом ИК лазерного излучения как в период облучения лазером, так и после действия лазерного импульса и их обсуждение. Показана роль соотношения плотности энергии импульса (Q) и критической плотности энергии материала образца ($Q_{кр}$), определяющей границу его испарения, в возникновении АЭ в начальный период.

Методика эксперимента. Исследуемые образцы имели форму стержней с прямоугольным сечением с размерами: медный – $190 \times 5 \times 5$ мм³, алюминиевый –

117×3×2.4 мм³ и 2 стеклянных сечением – 5.7×4.7 мм², длиной (L) 120 мм и 48 мм. На один из торцов подавался импульс с $\tau \sim 0.3$ сек сфокусированного излучения от CO₂ лазера ($\lambda = 10.6$ мкм, мощность ~ 5 Вт), сформированного электромеханическим прерывателем. Диаметр фокального пятна 0.6 мм. На противоположном торце был укреплен акустический датчик, сигнал от которого через широкополосный усилитель и анализатор импульсов акустической эмиссии СДС 1008 попадал для регистрации на персональный компьютер. На мониторе компьютера воспроизводилась общая картина АЭ – время возникновения и общее количество N акустических событий (АС), частота (в кГц), амплитуда (в дБ и мВ), форма сигнала, а также общая энергия E , переносимая упругой волной. Уровень дискриминации сигнала ~ 0.02 мВ. Сигналы АЭ были зафиксированы в интервале частот 10–4800 кГц. Подробная схема эксперимента приведена в [4, 5].

С каждым образцом был проведен цикл опытов с наблюдением АЭ – последовательно, с интервалом 10–15 минут, 7 опытов с алюминиевым, 4 с медным и 3 со 120-и мм стеклянным, с продолжительностью каждого опыта около часа. Для каждого образца перед циклом опытов проводилась запись “нулевки”, т.е. показания акустического датчика со всей включенной аппаратурой, но с перекрытием лазерного пучка перед торцом образца.

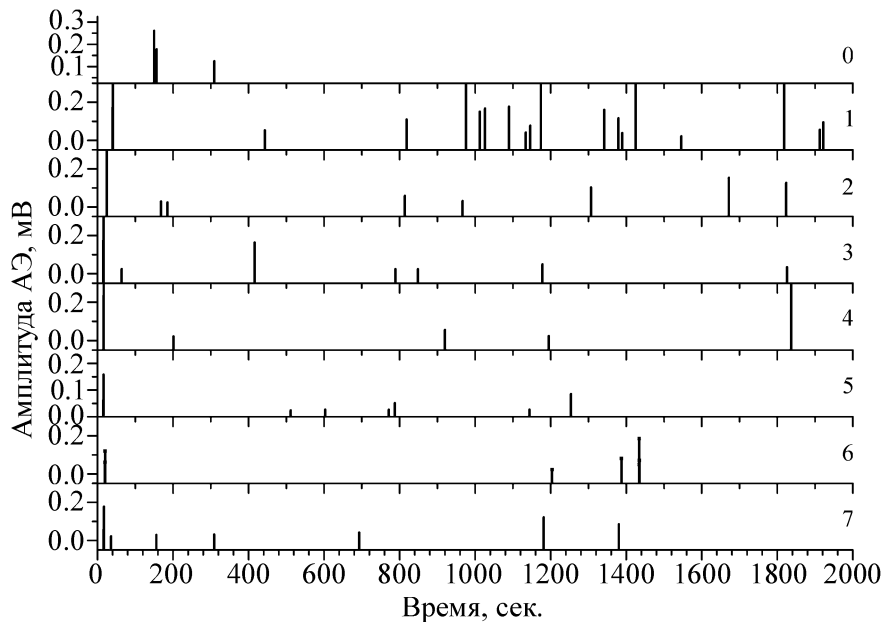


Рис. 1: Общая картина акустической эмиссии для алюминиевого образца, “0” – при перекрытом пучке лазера.

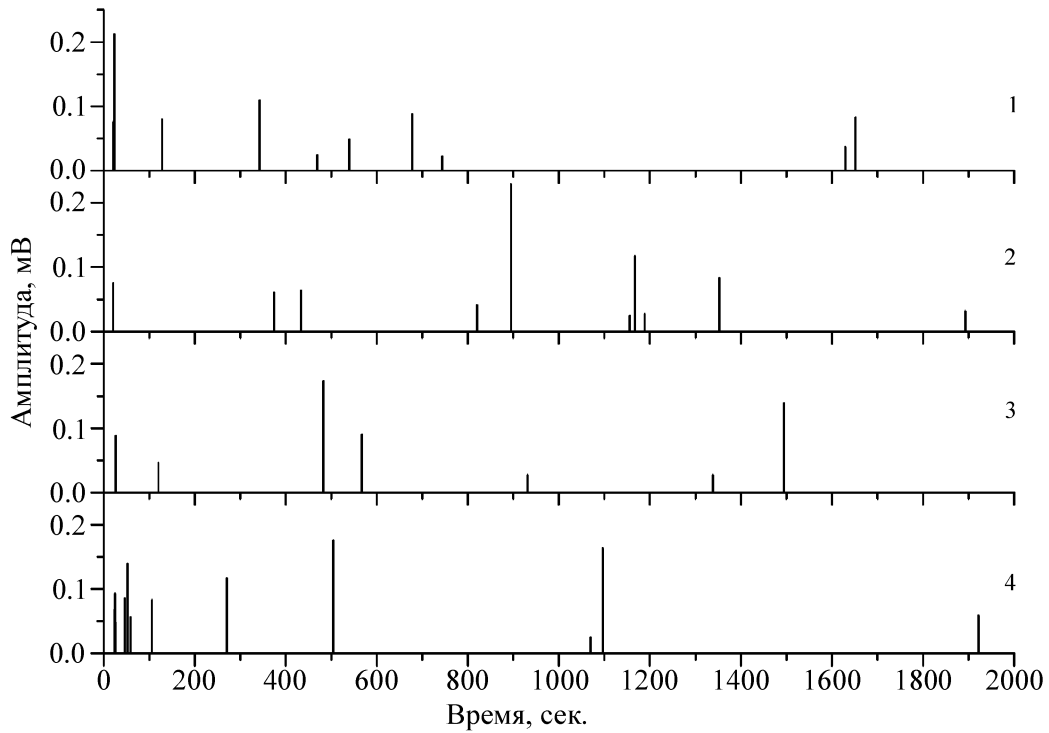


Рис. 2: Общая картина акустической эмиссии для медного образца.

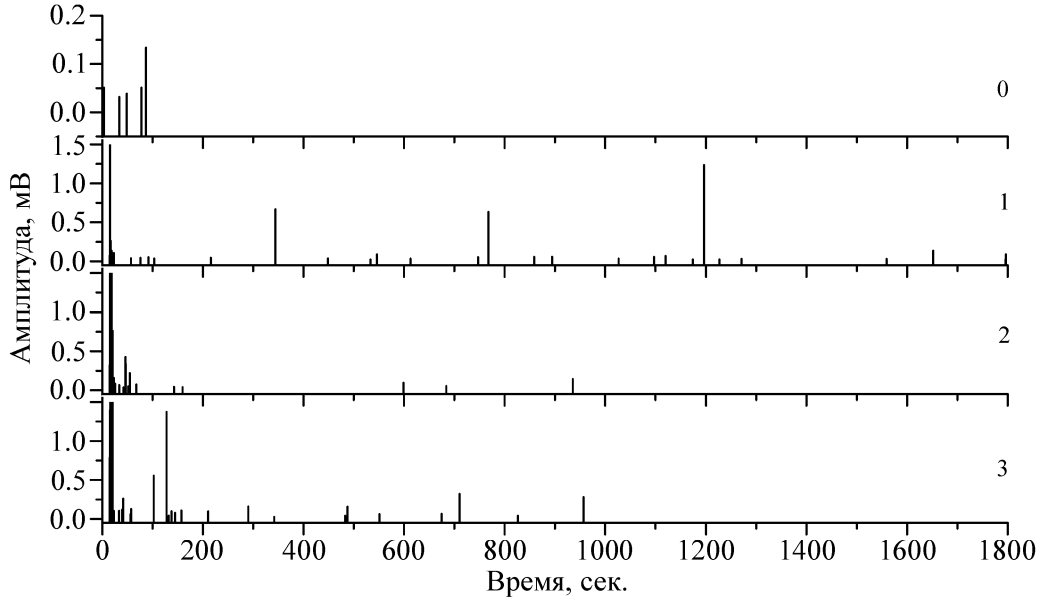


Рис. 3: Общая картина акустической эмиссии для стеклянного образца, “0” – при перекрытом пучке лазера.

Результаты экспериментов и их обсуждение. Общие картины АЭ образцов приведены на рис. 1–3 – для алюминиевого, медного и стеклянного с $L = 120$ мм образцов, соответственно. В таблице 1 приведены для них N и E . Условно образцы обозначены материалом, из которого они сделаны – “Al”, “Cu”, “Glass”.

Т а б л и ц а 1

Количество сигналов АЭ (N) и переносимая энергия (E)

Материал	Параметры АЭ	Номер опыта						
		1	2	3	4	5	6	7
Al	N	22	9	9	9	8	7	8
	$E, 10^{-6}$ отн. ед.	160	1.8	4	6	4	5	5
Cu	N	16	11	9	8	–	–	–
	$E, 10^{-6}$ отн. ед.	1	3	1	3	–	–	–
Glass	N	73	71	101	–	–	–	–
	$E, 10^{-5}$ отн. ед.	5.8	43	10	–	–	–	–

На рисунках 1–3 приведены данные АЭ, регистрируемые в течение около получаса с момента подачи лазерного импульса на торец образца. Наблюдения АС велись и более длительное время, иногда и более одного часа, но заметных сигналов с амплитудой, превышающей акустические шумы, при этом замечено не было, в связи с этим на рисунках приведены данные для более короткого интервала времени. Как видно, общая картина АЭ в повторяющихся опытах не воспроизводится, т.е. в случае каждого образца в цикле экспериментов не повторяются ни последовательность возникновения АС, ни их амплитуды, ни энергия E , хотя значения N и E в некоторых случаях и могут совпадать. Это можно объяснить небольшими изменениями порога дискриминации в этих экспериментах, в результате чего и могут возникать дополнительно сигналы АЭ. Группу сравнительно больших сигналов в начале общей картины, наблюдаемую во всех опытах со всеми образцами, можно связать с наводками при выключении блока питания лазера и особенностями работы всей аппаратуры.

Во время импульса, в случае стеклянных образцов, во всех опытах были замечены периодические небольшие акустические сигналы. Это можно объяснить тем, что только у стекла $Q_{кр}$, определяемая выражением (1) [6], меньше плотности энергии в лазерном импульсе, Q .

$$Q_{кр} = \rho \cdot c_p \cdot T_{исп} \cdot \sqrt{a \cdot t_{имп}} = T_{исп} \cdot \sqrt{\rho \cdot c_p \cdot \lambda_T \cdot t_{имп}}, \quad (1)$$

где ρ – плотность вещества, c_p – удельная теплоемкость, $T_{исп}$ – температура кипения, $a = \lambda_T / (c_p \cdot \rho)$ – коэффициент температуропроводности, λ_T – коэффициент теплопроводности.

Т а б л и ц а 2

Общие и теплофизические параметры исследуемых материалов
(данные взяты из [8])

Параметры исследуемых материалов	Медь	Алюминий	Стекло
Плотность ρ , кг/м ³	9000	2700	2300
Удельная теплоемкость c_p , Дж/(кг·град С)	380	520	670
Теплопроводность λ_T , Вт/(м·град С)	400	240	0.75
Температура кипения $T_{исп}$, град С	2540	2520	2000
Критическая плотность энергии $Q_{кр}$, Дж/мм ²	51	25	1.2

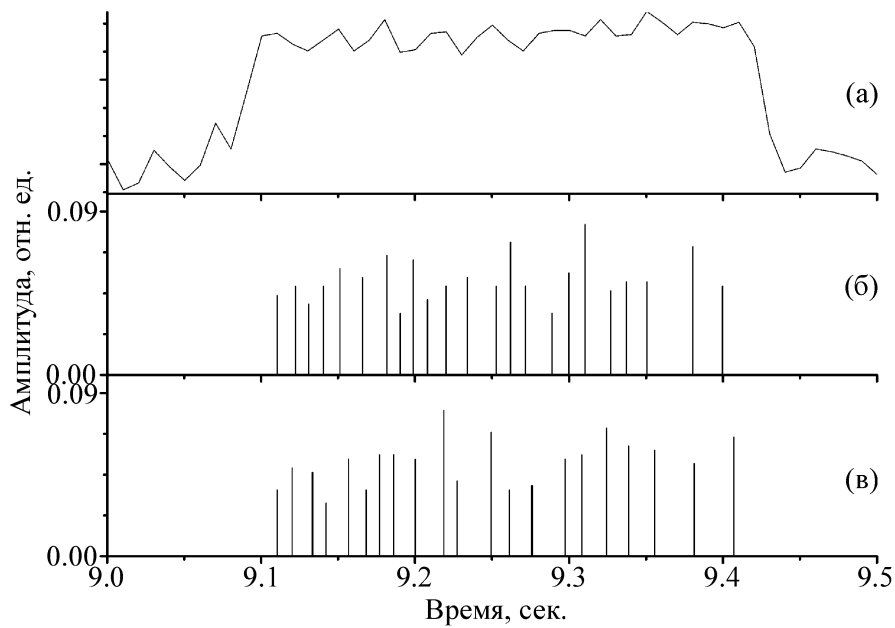


Рис. 4: (а) Вид лазерного импульса (в относительных единицах), (б) и (в) – сигналы АЭ стеклянного образца длиной $L = 48$ мм в начальный период.

При $Q > Q_{кр}$ во время лазерного импульса происходит интенсивное испарение материала образца. При этом, как показано в [6, 7], удаление пара с поверхности и возникновение реактивного импульса приводит к образованию в поверхностном слое волны

давления и термомеханического напряжения, в результате чего и наблюдаются акустические сигналы во время действия импульса. В нашем случае во всех опытах параметры импульса одинаковы и $Q \approx 5.3$ Дж/мм². Вследствие различия параметров материалов, значение $Q_{кр}$ для них различны (см. табл. 2), только для стекла $Q_{кр}$ (1.2 Дж/мм²) меньше Q . В связи с этим в случае образцов Al и Cu в начальный период АС отсутствуют. В качестве иллюстрации на рис. 4 показаны вид лазерного импульса и начальный участок регистрации АЭ в двух опытах со стеклянным стержнем $L = 48$ мм. С ним были проведены подробные исследования АЭ в пяти повторяющихся опытах, при которых общая картина АЭ, на протяжении 2000 сек, также не воспроизводилась [5].

Заключение. Проведенные эксперименты продемонстрировали, что при воздействии на твердые тела лазерного излучения возникает акустическая эмиссия, т.е. в образцах возбуждаются упругие волны – волны напряжения [9]. При регистрации сигналов АЭ специальной аппаратурой обнаружено, что при повторяющихся опытах с коротким интервалом времени между ними, при одинаковых условиях эксперимента, при наблюдении на протяжении около получаса и более после окончания действия лазерного импульса общая картина АЭ для каждого образца не воспроизводится, т.е. не повторяются ни последовательность появления сигналов, ни их амплитуда, ни переносимая ими энергия. В период действия лазерного излучения наблюдаются небольшие сигналы только в случае стеклянных образцов в связи с испарением материала с облучаемой поверхности. Невоспроизводимость общей картины АЭ образцов из твердых материалов при циклическом воздействии импульса лазера на их поверхность свидетельствует о происшедших в результате необратимых локальных изменениях в структуре материала, появлении в его толще локальных источников АЭ типа дислокаций, микротрещин и др. Для определения характера этих изменений необходимо проведение дополнительных исследований.

Авторы выражают благодарность д.ф.-м.н. Е. М. Кудрявцеву, инициирующему проведение исследований по влиянию лазерного облучения на материалы акустическими методами, а также к.т.н. М. М. Ляховицкому за предоставление акустико-эмиссионного оборудования.

Работа выполнена при поддержке РФФИ, проект № 14-08-00981-а.

Л И Т Е Р А Т У Р А

- [1] М. М. Ляховицкий, М. А. Покрасин, В. В. Роцупкин и др., ТВТ **40**, 396 (2008).

- [2] Ben Khalifa W., Jessine K., и др., *Acoustic Emission* **30**, 137 (2012).
- [3] А. В. Буланов, И. Г. Нагорный, Е. В. Соседко, *ЖТФ* **83**, 8, 117 (2013).
- [4] С. Д. Зотов, А. А. Лебедев, Э. Н. Лоткова, М. М. Ляховицкий, *Инженерная Физика*, № 7, 3 (2015).
- [5] С. Д. Зотов, А. А. Кузнецов, А. А. Лебедев, *Инженерная Физика*, № 10, 26 (2015).
- [6] Г. А. Григорьянц, А. А. Соколов, *Лазерная обработка неметаллических материалов*, книга 4 (М., Высш. шк., 1988).
- [7] Ю. Ю. Протасов, Т. С. Щепанюк, *Вест. МГТУ им. Н. Э. Баумана*, сер. "Ест. Науки" № 4, 46 (2008).
- [8] А. П. Бабичев и др., *Физические величины: Справочник* (М., Энергоатомиздат, 1991).
- [9] В. А. Грешников, Ю. Б. Дробот, *Акустическая эмиссия* (М., Изд. Стандартов, 1976).

Поступила в редакцию 11 мая 2016 г.