

РАДИАЦИОННО-АКУСТИЧЕСКИЙ КОНТРОЛЬ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ, ОБЛУЧЕННЫХ СИЛЬНОТОЧНЫМИ РЕЛЯТИВИСТСКИМИ ЭЛЕКТРОННЫМИ ПУЧКАМИ

В. Т. Уваров^а, А. Г. Пономарев^а, Ю. Ф. Лонин^а, В. В. Уваров^а,

А. Н. Никитин^б, В. Н. Робук^{б, в}, Т. И. Иванкина^б, В. Ф. Клепиков^в,

В. В. Литвиненко^в, С. Е. Донец^в, Н. И. Базалеев^в

^а ННЦ «Харьковский физико-технический институт» НАН Украины, Харьков, Украина

^б Объединенный институт ядерных исследований, Дубна

^в Институт электрофизики и радиационных технологий НАН Украины, Харьков, Украина

В работе изучены особенности проявления радиационно-акустических эффектов в металлах и сплавах при их облучении сильноточными релятивистскими электронными пучками, которые приводят к расплаву поверхности с частичным выносом материала с поверхности. Экспериментально обнаружено возрастание акустической эмиссии в образцах при их облучении сильноточным электронным пучком. Показано, что главным механизмом генерации радиационно-акустических импульсов в облученных тугоплавких металлах является механизм снятия остаточных напряжений. Амплитуды акустических импульсов после второго и последующих электронных импульсов не изменяются, что свидетельствует о корреляции между амплитудой акустического сигнала и структурой поверхности облученного материала.

The characteristic manifestations of radiation-acoustic effects in metals and alloys under irradiation by a high-current relativistic electron beam, which lead to the molten surface with partial removal of material from the surface, are studied in the paper. Increase in the acoustic emission in the samples when they are irradiated with a high-current electron beam is experimentally observed. It is shown that the primary mechanism for generation of radiation-acoustic pulses in the irradiated refractory metals is the stress relieving mechanism. The amplitudes of the acoustic pulses after the second and subsequent electron pulses do not change, which indicates a correlation between the amplitude of the acoustic signal and the surface structure of the irradiated material.

PACS: 81.40 Wx

ВВЕДЕНИЕ

Перспективы реализации проектов создания ядерно-энергетических установок нового поколения связаны с обоснованием возможности эксплуатации материалов в условиях интенсивных радиационных, коррозионных, механических и тепловых воздействий.

Известно, что при воздействии ионизирующих частиц (электроны, протоны, γ -кванты, нейтроны, многозарядные ионы) на материалы ядерно-технологических установок в них происходят структурные и фазовые превращения, которые способны существенно изменять эксплуатационные параметры материалов.

Одним из эффективных инструментов, позволяющих воспроизводить комплекс экстремальных воздействий на конструкционные материалы, являются сильноточные релятивистские электронные пучки (СРЭП) [1–3]. Поскольку речь идет об эволюции физико-механических и эксплуатационных свойств конструкционных материалов в результате внешних воздействий, актуален вопрос изучения изменения свойств в процессе импульсных воздействий. Представляется также целесообразным изучить релаксацию остаточных напряжений, возникающих в материалах при облучении, и вклад радиационно-стимулированных структурных превращений в модификацию эксплуатационных характеристик и радиационную стойкость.

Один из перспективных методов регистрации и контроля таких превращений — радиационно-акустический метод [4–6]. Суть этого метода заключается в генерации нестационарных термоупругих напряжений при воздействии импульсных потоков заряженных частиц на конденсированные среды. Следствием этого является возбуждение упругих волн, которые несут информацию о динамике протекающих процессов и модификации структуры и фазового состояния облученной среды.

Вместе с тем очень важно изучить особенности проявления радиационно-акустических эффектов в металлах и сплавах при облучении дозами таких значений, которые приводят к расплаву поверхности с частичным выносом материала с поверхности, что по сути соответствует режимам, характерным для ядерных установок новых поколений.

1. МЕХАНИЗМЫ ГЕНЕРАЦИИ РАДИАЦИОННО-АКУСТИЧЕСКИХ ИМПУЛЬСОВ

Облучение мишеней сильноточными пучками электронов со значениями плотности потока энергии, достаточными для локального перепада, сопровождается процессами частичного выноса расплавленного вещества и возникновением температурного градиента в объеме мишени. В результате локальной динамической перестройки структуры облучаемого материала создаются условия для генерации радиационно-акустических импульсов. С точки зрения физики взаимодействия излучения с веществом акустический отклик содержит информацию о переходных процессах, протекающих в области облучения, за времена порядка длительности импульса.

Суммарная амплитуда акустических импульсов, возникающих в объеме мишени, складывается из двух компонент:

$$\sigma_1 = \sigma_t + \sigma_j,$$

где σ_t — составляющая, обусловленная термоупругим механизмом; σ_j — амплитуда напряжений, обусловленная реактивной отдачей вследствие абляционного выброса вещества.

При умеренной плотности выделившейся в облучаемой среде энергии излучения генерация упругих волн обусловлена термоупругим механизмом, при котором амплитуда

термоупругих напряжений $\sigma_t(r, t)$ определяется выражением [6]:

$$\sigma_t(r, t) = \Gamma \varepsilon(r, t), \quad (1)$$

где $\varepsilon(r, t)$ — плотность поглощенной энергии излучения в среде; Γ — параметр Грюнайзена вещества

$$\Gamma = \frac{\alpha}{k\rho c}, \quad (2)$$

α , k , ρ , c — коэффициент теплового расширения, сжимаемость, плотность и теплоемкость вещества соответственно.

Соотношение (1) справедливо в приближении мгновенного ввода энергии при условии

$$\frac{[\bar{\Gamma}(T + \Delta T) - \bar{\Gamma}(T)]}{\bar{\Gamma}(T)} \ll 1, \quad (3)$$

означающем, что радиационный перегрев вещества

$$\Delta T(x) = \frac{\varepsilon(x)}{\rho c}. \quad (4)$$

Оценить величину механического воздействия, обусловленного абляционным выбросом, можно через давление образующейся плазмы в зоне поглощения энергии электронного пучка [7]:

$$\sigma_j = (\gamma_{эф} - 1)\omega, \quad (5)$$

где $\gamma_{эф} = 1,2$ — отношение удельных теплоемкостей твердого тела и плазмы; ω — объемная плотность энергии излучения, вводимого в мишень, Дж/см³.

2. МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА

В работе измерялись амплитуды акустических напряжений, генерируемые сильноточными релятивистскими электронными пучками в стержневых и дисковых металлических образцах (Al, латунь, Cu, Ti, Mo, Ni). Исследуемые мишени в режиме одиночных импульсов облучались на ускорителе МИГ-1 [1] с использованием как сплошных, так и трубчатых пучков с параметрами: энергия электронов до 0,5 МэВ, ток пучка 1–5 кА, длительность импульса тока $(2-3) \cdot 10^{-6}$ с.

По измеренным амплитудам акустических напряжений, их продолжительности и времени прихода к приемному детектору определялись изменения коэффициентов трансформации поглощенной энергии излучения в величину акустического напряжения и скорости звука в мишенях от импульса к импульсу (фактических составляющих параметра Грюнайзена). Это, в свою очередь, давало возможность определить вариацию модулей упругости, характеризующих изменения механических свойств, модификацию структуры и фазового состояния облученных образцов.

Схема эксперимента представлена на рис. 1.

Для исследования распределения напряжения упругих волн, возбуждаемых в металлических мишенях при облучении СРЭП с плотностью энергии ≤ 1 кДж/см², был использован блок акустической регистрации, состоящий из полуволнового и толстого аперического пьезопреобразователя (ТАП) [8], системы их калибровки и сканирующей системы перемещения акустического детектора по тыльной стороне мишени, позволяющей

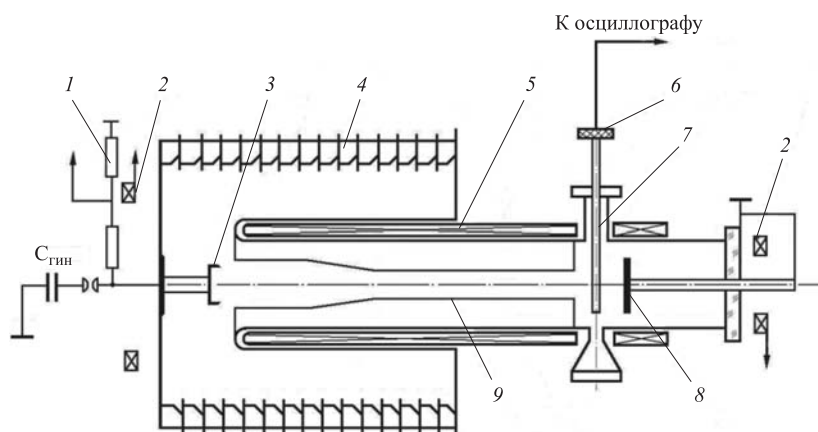


Рис. 1. Схема экспериментальной установки: 1 — омический делитель напряжения; 2 — пояс Роговского; 3 — катод; 4 — ускорительная колонка; 5 — соленоид; 6 — пьезодатчик; 7 — стержень; 8 — коллектор; 9 — анодная вставка

снимать пространственные и временные распределения поля акустических напряжений. Толщина h у преобразователя ТАП значительно больше длины волны λ регистрируемого акустического импульса ($h \gg \lambda$). В полуволновом датчике давления пьезоэлемент из пьезокерамики ЦТС-19 в форме диска (диаметром до 1 см и толщиной до 1 мм) демпфирован двумя латунными стержнями марки ЛС-59. Полуволновой датчик позволяет регистрировать без искажения акустические сигналы с длиной волны $\lambda \geq 2h$, вдвое и более превышающей толщину h пьезоэлемента. Длина латунных стержней обеспечивает акустическую задержку, превышающую по длительности электромагнитную помеху и длительность регистрируемого акустического сигнала.

Для защиты от акустических помех датчик с помощью тефлоновых и резиновых прокладок крепится в металлическом экране. Передний стержень, служащий акустической линией задержки, соединяется с корпусом и заземляется. Демпфирующий стержень, служащий акустической ловушкой, соединен с центральным выводом коаксиального разъема. Демпфированный по толщине датчик свободен от колебаний, обусловленных возбуждением собственных частот пьезоэлемента, и позволяет регистрировать в режиме холостого хода без заметных искажений акустические сигналы с длительностью $\tau_{\text{и}}$:

$$\tau_{\text{и}} > \frac{1}{2} \frac{h}{s}, \quad (6)$$

где s , h — скорость звука и толщина пьезоэлемента соответственно.

На рис. 2 приведены формы акустических напряжений, возбуждаемых СРЭП в медном стержне диаметром 3 мм и длиной 200 мм и регистрируемых полуволновым детектором с различной формой латунного демпфера, служащего акустической ловушкой. При одномерном возбуждении упругих волн акустический сигнал должен быть однополярным в виде одной волны сжатия с длительностью импульса $\tau = \tau_j + \tau_s$, где τ_j — длительность импульса электронного пучка, τ_s — время прохождения акустического сигнала через демпфер. Появление волны растяжения характеризует качество демпфера.

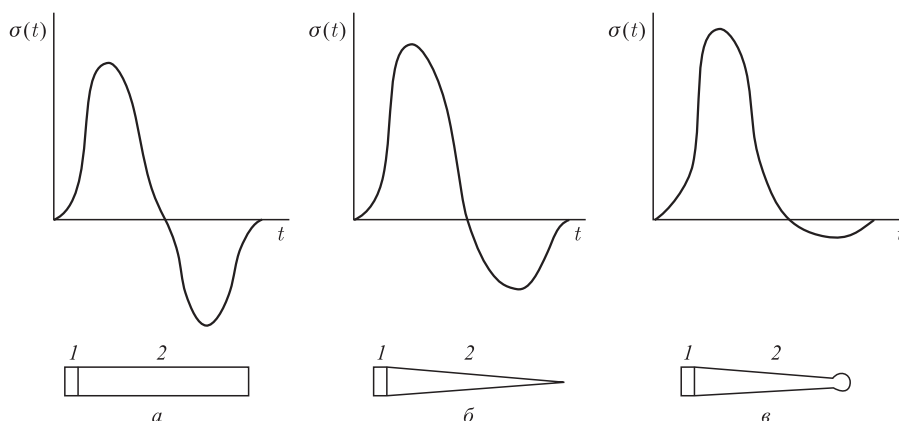


Рис. 2. Форма акустических импульсов для различных акустических ловушек: а) цилиндрическая; б) конусная; в) конусно-шаровая; 1 — пьезодатчик; 2 — ловушка

Из эксперимента следует, что форма акустической ловушки, показанной на рис. 2, в, является оптимальной, поскольку вносит наименьшее искажение в форму акустического сигнала.

Конструкция ТАП такая же, как и полуволнового датчика давления, только вместо пьезокерамического диска установлен пьезокерамический цилиндр диаметром 8 мм и толщиной 11 мм из пьезокерамики ЦТС-19. Он обладает достаточной широкополосностью ($\Delta f \leq 5$ МГц) для регистрации коротких ударных возбуждений с длительностью фронта импульса $\sim 10^{-8}$ с.

Система акустической регистрации позволяет воспроизводить без искажений форму импульсов упругих напряжений в широком диапазоне длительностей $10^{-8} - 10^{-4}$ с, обладает хорошей помехозащищенностью, имеет достаточно высокую чувствительность, позволяющую без дополнительных усилителей регистрировать на экране осциллографа электрический сигнал прямо с пьезопреобразователей и различные моды акустических колебаний, возбуждаемых в твердотельных мишенях — плоские, цилиндрические, поперечные.

В режиме одиночных импульсов облучались стержневые мишени диаметром 2–5 мм и дисковые — толщиной 2–5 мм. Энергия СРЭП $\sim 0,5$ МэВ полностью поглощалась в образцах, так как длина свободного пробега электронов была не более 500 мкм. Мишени размещались в плоскости, перпендикулярной оси пучка. Широкополосные ($\Delta f \leq 5$ МГц) акустические пьезокерамические датчики контактным способом присоединялись к мишеням. Сигналы от датчиков подавались на осциллограф, который запускался импульсом ускорителя.

3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Поглощение энергии в объеме облучаемой мишени приводило к термическому расширению, плавлению и испарению вещества мишеней и вызывало акустический импульс. Начальная температура необлученных образцов и параметры СРЭП поддерживались по-

стоянными. При облучении дисковых мишеней расположение датчика менялось на поверхности тыльной стороны образцов.

Первый электронный импульс СРЭП модифицировал структуру образцов (как будет указано ниже) в результате быстрого температурного нагрева (скорость нагрева до 10^{10} К/с) с последующим охлаждением материала мишени (скорость охлаждения до 10^7 К/с). При этом наблюдалось упрочнение поверхности образцов, изменение структуры зерен, перераспределение элементного состава и другие обратимые и необратимые процессы. Второй и последующие импульсы СРЭП взаимодействовали с уже модифицированной структурой образцов.

Исследовались образцы из алюминия, латуни, меди, титана, молибдена и ниобия. Экспериментальные результаты по воздействию трубчатого релятивистского электронного пучка (РЭП) на стержневые мишени приведены в таблице.

Характеристики облученных материалов

Материал	Δm_1 , мг	$\Delta \bar{m}$, мг	$\bar{\sigma}$, МПа	$\bar{\sigma}/\sigma_1$	Γ	R_e , мм	ε , кДж/г	h_b , мм	$\eta \cdot 10^{-2}$
Al	64,1	66,3	3,3	1,4	2,17	0,47	3,31	0,25	16
Латунь	51,3	55,2	2,0	1,6	2,05	0,16	3,14	0,08	8,7
Cu	42,3	45,6	1,9	1,5	2,00	0,15	3,14	0,06	6,5
Ti	34,2	35,5	2,1	2,0	1,02	0,29	3,16	0,07	4,8
Mo	23,1	24,2	0,9	2,3	1,22	0,14	3,02	0,034	2,6
Nb	22,5	23,4	1,8	2,6	1,45	0,16	3,02	0,034	2,6

Здесь Δm_1 — масса вещества, выброшенного после первого электронного удара; $\Delta \bar{m}$ — средняя масса, удаленная за каждый последующий импульс; σ_1 — амплитуда акустического напряжения, вызванная первым электронным импульсом; $\bar{\sigma}$ — средняя амплитуда при каждом последующем импульсе; R_e — экстраполированная область пробега пучка электронов в материале мишени; ε — вычисленная плотность энергетических потерь в облученных образцах; h_b — средняя глубина проникновения электронов в материале мишени; Γ — параметр Грюнайзена, непосредственно связывающий плотность поглощенной энергии ε с термоупругим напряжением и являющийся постоянной величиной; η — коэффициент трансформации поглощенной энергии в энергию упругих волн.

Экспериментально обнаружено, что амплитуда акустического импульса σ_1 , генерируемого первым импульсом СРЭП, воздействующим на первоначально не модифицированный образец, меньше амплитуды акустических импульсов от второго и последующих токовых импульсов. Причиной такого возрастания акустических откликов может быть развитие быстрой релаксации остаточных напряжений под действием второго и последующих импульсов, что может вносить вклад в общий акустический эффект.

Как было показано в [9], действие СРЭП на первоначально не облученные металлы сопровождается закалкой исходной структуры. Такие структурные изменения вызваны быстрым охлаждением жидкой поверхностной пленки, образующейся при радиационном нагреве. В работе [10] было показано, что облучение данным пучком приводит к измельчению зеренной структуры алюминиевого сплава, в результате чего существенно повышаются его характеристики сверхпластического течения. Сжатие этого слоя во время последующего охлаждения приводит к сжатию глубинных слоев мишени. Каждый последующий импульс СРЭП снимает напряжения в поверхностном слое. Как результат,

глубинные слои, становясь свободными, расширяются и высвобождают упругую энергию, что ведет к возрастанию амплитуды генерируемого акустического сигнала. Второй и последующий импульсы СРЭП не влияют на толщину модифицированной зоны, а изменяют только глубину кратера из-за выброса материала с поверхности мишени (режим абляции) [11]. Амплитуды акустических импульсов после второго и последующих электронных ударов также не изменяются, что свидетельствует о корреляции между амплитудой акустического сигнала и структурой поверхности материала.

В качестве подтверждения нашего предположения о вкладе в формирование составляющей акустического импульса релаксации остаточных напряжений приведем результаты электронно-микроскопических исследований фрактограмм исследуемых материалов. На рис. 3 приведены РЭМ-снимки изломов необлученного и облученного титана. Для необлученного образца титана основным механизмом разрушения был скол и отрыв при образовании и слиянии микропор. Для облученного образца заметны вторичные трещины и длинные гребни, предположительно соответствующие высокоугловым ступеням по границам субзерен. При этом параллельные полосы рельефа предположительно вызваны волнами разрежения-сжатия, возбужденными электронным пучком в образце. Доминирующим механизмом разрушения является скол в сочетании с межзерненным разрушением.

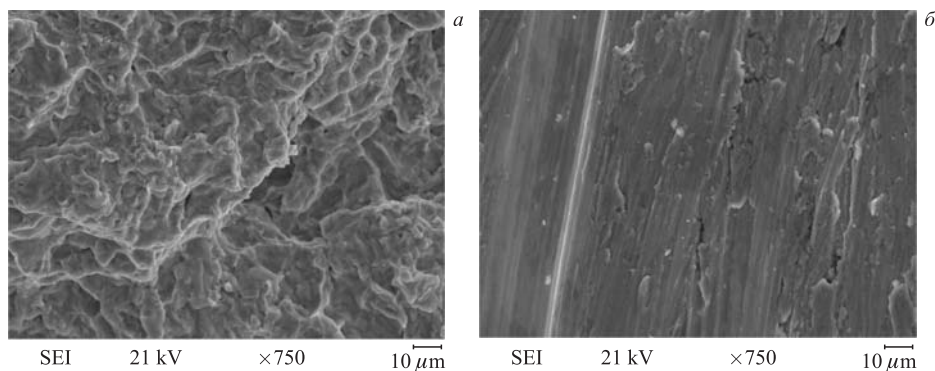


Рис. 3. Фрактограммы излома титана: *а)* необлученный образец; *б)* облученный образец

На рис. 4 приведены РЭМ-снимки изломов необлученного и облученного молибдена. Для необлученного молибдена (рис. 4, *а*) наблюдается однородная структура по всему излому образца. Для облученного образца (рис. 4, *б*) наблюдается характерная зона в приповерхностной области, на которой видны следы рекристаллизации материала из расплава, с наличием крупных пор, средний размер которых составляет около 5 мкм.

На рис. 5 приведены РЭМ-снимки изломов необлученной и облученной латуни. В необлученном образце (рис. 5, *а*) доминирующим механизмом разрушения является вязкое разрушение, и структура излома однородна по всему сечению образца. Для облученного образца латуни (рис. 5, *б*) можно выделить схематически две области, в которых механизмы разрушения различны. В приповерхностной области почти отсутствуют поры и наблюдается откольное разрушение, в более удаленной от облученной поверхности области наблюдается вязкое разрушение.

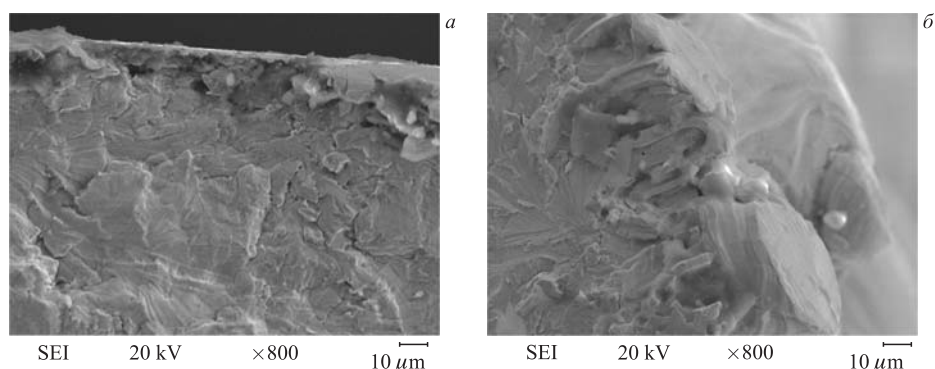


Рис. 4. Фрактограммы излома молибдена: а) необлученный образец; б) облученный образец

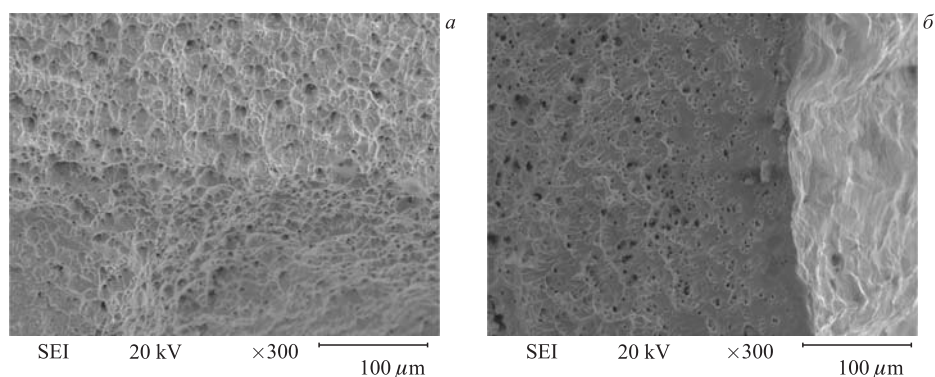


Рис. 5. Фрактограммы излома латуни: а) необлученный образец; б) облученный образец

При воздействии трубчатого СРЭП на стержневую мишень происходила генерация акустических импульсов в двух зонах, расположенных в точках пересечения пучка со стержнем. В каждой зоне возникают равные термоакустические импульсы, которые распространяются по стержню к акустическому детектору, расположенному на свободном конце стержня. Несмотря на это, вторые (дальние от детектора) импульсы превышают первые (ближние к детектору) примерно на 30%. Возможно, это связано с неполной релаксацией остаточных термоупругих напряжений в облученном металле за время между двумя проходящими импульсами. Первый импульс приходит на детектор, проходя через необлученный материал, в то время как второй проходит через радиационно-модифицированную зону на пути к детектору. Изменение напряжений второго импульса обусловлено разрушением дислокаций, вызывающих когерентную акустическую эмиссию из структурно-модифицированной зоны, которая усиливает второй импульс.

Как видно из таблицы, большее увеличение амплитуды акустического напряжения наблюдалось для тугоплавких материалов: Ti, Mo и Nb (для Nb $\bar{\sigma}/\sigma_1 = 2,6 \pm 0,4$). Несколько меньший эффект наблюдался для более плавких и пластичных металлов, таких как Al, латунь и Cu (для Al $\bar{\sigma}/\sigma_1 = 1,4 \pm 0,2$). Мы связываем этот факт с более значительным вкладом взрывного испарения в генерацию звука для легкоплавких металлов и с

уменьшением остаточных напряжений при закалке у пластичных металлов. Измеренные амплитуды акустических импульсов σ_1 и $\bar{\sigma}$ можно представить в виде $\sigma_1 = \sigma_t + \sigma_j$ и $\bar{\sigma} = \sigma_t + \sigma_j + \sigma_r$, где σ_j и σ_t есть вклад механизма реактивной (струйной) отдачи и термоупругого механизма соответственно; σ_r — компонента, вызванная снятием остаточных напряжений в зоне генерации вторым и последующими электронными импульсами благодаря разрушению напряженного поверхностного слоя. В соответствие с экспериментальными данными $\sigma_r = \bar{\sigma} - \sigma_1 = (0,4-1,6)\sigma_1$. Видно, что механизм снятия остаточного напряжения является главным генерационным механизмом в тугоплавких металлах для второго и последующих импульсов.

Некоторые примеры акустических импульсов, возбуждаемых сплошным пучком в стержневых мишенях, приведены на рис. 6.

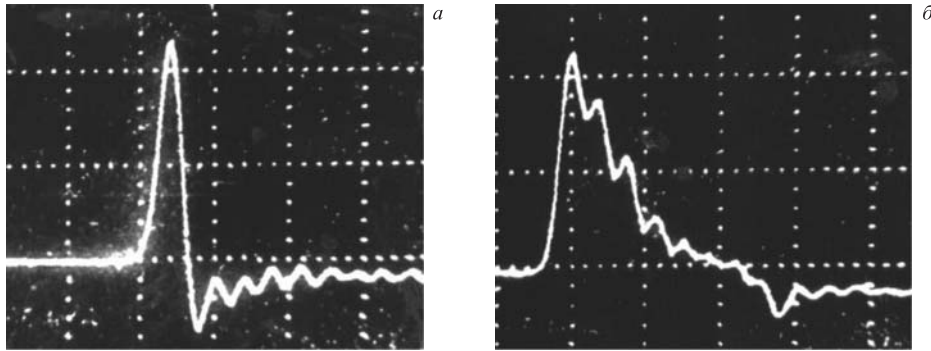


Рис. 6. Акустические импульсы, возбуждаемые в латуни (а) и в титане (б) сплошным СРЭП; $\tau_{\text{разв}} = 10$ мкс/дел

Импульсы регистрировались датчиком, размещенным в торце стержневой мишени. Некоторое отличие на хвостах генерируемых акустических импульсов для легкоплавких (латунь, рис. 6, а) и тугоплавких (Тi, рис. 6, б) мишеней заслуживает внимания. Появление субимпульса на хвосте звукового импульса в титановой мишени, вероятно, вызвано замедлением релаксации остаточных напряжений в зоне генерации.

На рис. 7 приведены формы акустических импульсов, генерируемых трубчатым и сплошным СРЭП в стержневой мишени из ниобия (Nb), а также способ пересечения пучка с мишенью. Из рисунка видно, что для сплошного пучка (рис. 7, а) генерируется один импульс, для трубчатого пучка (рис. 7, б) два импульса, разделенных временем $\Delta\tau$, пропорциональным диаметру пучка d и скорости звука ниобия $S_{\text{Nb}}\Delta\tau = d/S_{\text{Nb}}$. Длительность импульса $\tau_{\text{и}}$ сплошного пучка также связана с величиной d/S_{Nb} , т. е. $\tau_{\text{и}} \approx d/S_{\text{Nb}}$. Это позволяет из величин $\Delta\tau$ и $\tau_{\text{и}}$ определять d или S_{Nb} .

В месте взаимодействия СРЭП со стержневыми мишенями происходит быстрый локальный разогрев мишени до температур $\Delta T \sim 10^4$ К. Такие перегревы приводят к абляции поверхности мишени с образованием кратеров. Уносимое вещество в виде мишенной плазмы представляет собой различные фазовые состояния мишени — откольные частицы, капли расплавленного вещества, газоплазменные факелы. Эмиссия вещества, образование мишенной плазмы за счет импульса отдачи приводят к генерации ударных волн в веществе мишени, фронт которых затухает на очень малых расстояниях $\sim 0,1-0,5$ см.

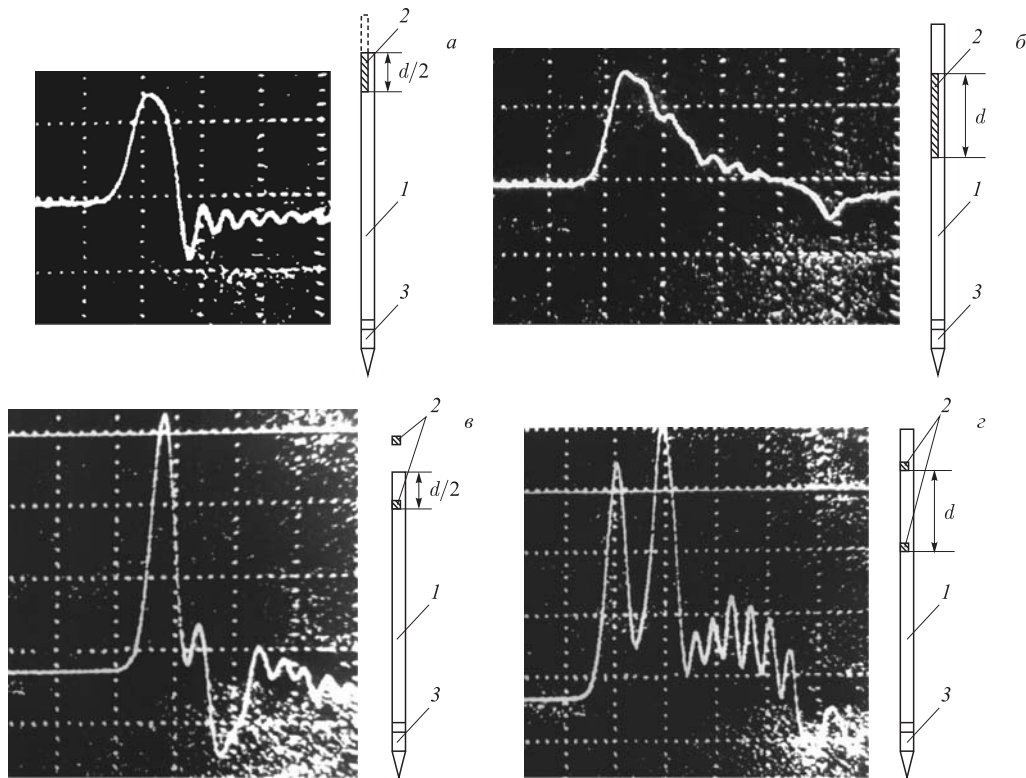


Рис. 7. Форма акустических импульсов, генерируемых сплошным (*а, б*) и трубчатым (*в, г*) пучками в мишени из ниобия; 1 — стержень; 2 — пучок; 3 — пьезодатчик; $\tau_{\text{раз}} = 10$ мкс/дел

Ударные волны, затухая, преобразуются в упругие волны, амплитуда которых по своей величине превышает термоупругие напряжения. Если термоупругие напряжения в различных мишенях при одинаковом энерговыделении определяются генерационной способностью вещества, мерой которой является параметр Грюнайзена, то упругие волны, сопровождаемые разрушением мишени, являясь существенно нелинейными, зависят от процессов плавления, испарения, от удельного выноса вещества мишени.

На рис. 8 приведено распределение напряжения упругих волн σ вдоль диаметра d сплошного (сплошная кривая на рис. 8, *а*) и трубчатого (рис. 8, *б*) СРЭП. Из рисунка следует, что в центре сплошного и трубчатого пучков амплитуда акустического напряжения принимает максимальное значение. Для сплошного пучка радиальное распределение напряжения упругих волн $\sigma(x)$ пропорционально распределению плотности потока электронов $J(x)$ вдоль диаметра пучка (штриховая кривая на рис. 8). Для трубчатого пучка обнаружено усиление амплитуды напряжения упругих волн в центре кольца по сравнению с местом попадания частиц в сходящейся цилиндрической волне на оси кольца. Максимум напряжения в центре кольца $\sigma_{\text{max}}(d/2)$ связан с амплитудой напряжения $\sigma(0)$ в месте попадания пучка соотношением

$$\sigma_{\text{max}}\left(\frac{d}{2}\right) \approx K_{\sigma}\sigma(0), \quad (7)$$

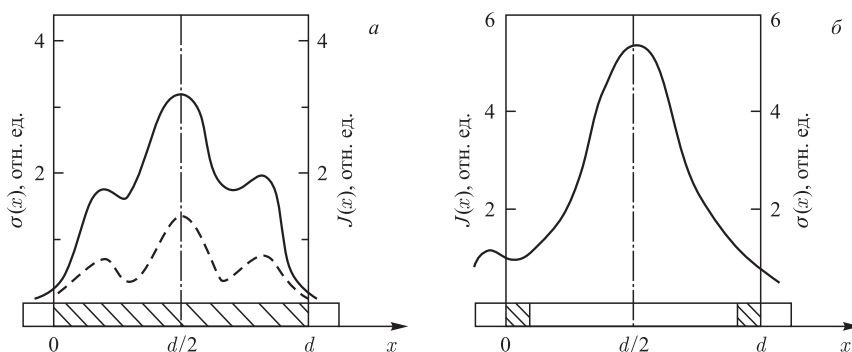


Рис. 8. Распределение напряжения упругих волн $\sigma(x)$ и плотности потока $J(x)$ электронов вдоль диаметра пучка d (заштрихованная область): а) сплошной пучок; б) трубчатый пучок

где $K_\sigma = 2\pi(d/\lambda)^{1/2}$ — коэффициент усиления по давлению сходящейся цилиндрической волны; λ — длина волны акустического сигнала, возбуждаемого РЭП в материале мишени. Для трубчатого пучка $\lambda \approx h_{\text{beam}}$ (h_{beam} — толщина стенки трубчатого пучка) и коэффициент усиления может принимать значение $K_\sigma \leq 10$. Из данных эксперимента следует, что для трубчатого РЭП с $d = 40$ мм и $h = 2$ мм $K_\sigma \approx 6$ (своего максимального значения K_σ достигает в случае, когда пробег ионизирующих частиц в мишени R_e равен диаметру кольца d , т. е. $R_e = d$).

4. ВЫВОДЫ

Экспериментально обнаружено возрастание акустической эмиссии в образцах при их облучении сильноточным электронным пучком. Такая звуковая сверхэмиссия имеет не просто термоупругую или абляционную природу. Она, вероятно, связана со структурной рекристаллизацией материала мишени, а именно, с изменением размеров кристаллических зерен, сверхбыстрой закалкой и рекристаллизацией, порождаемой первым электронным ударом и возникновением метастабильных напряженных поверхностных слоев. Второй и последующие электронные импульсы воздействуют на уже модифицированную поверхность, при разрушении которой высвобождаются остаточные упругие напряжения в зоне взаимодействия, что усиливает генерируемый акустический импульс.

При облучении дисковой мишени трубчатым СРЭП самый высокий уровень акустической эмиссии зарегистрирован вблизи оси пучка, а максимальная амплитуда акустических напряжений была примерно в 10 раз выше, чем измеренная в точках энергетического поглощения пучка.

Наблюдалось различие формы импульсов акустических напряжений, возбуждаемых сплошным РЭП в латуни, Nb и Ti. В латуни, где происходит процесс испарения поверхности при взаимодействии с РЭП, импульс напряжения имеет четко выраженный передний и задний фронты, в Nb и Ti, где происходит процесс плавления, импульс напряжения имеет четко выраженный передний фронт, а задний фронт «развален», что характеризует процесс сильного затухания акустического сигнала в расплаве металла на длине области взаимодействия СРЭП с мишенью.

Таким образом, по форме акустических напряжений можно контролировать теплофизические характеристики и структурное состояние облучаемых конструкционных материалов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Уваров В. Т. и др. Получение сильноточных пучков микросекундной длительности с высоким к. п. д. М.: ЦНИИАтоминформ, 1984. 13 с. (Препринт ХФТИ 84-30).
2. *Lytvynenko V. V. et al.* Analysis of the Mechanisms of the High-Current Relativistic Electron Beam Influence on Metallic Materials and Rocks // Stress and Texture Investigations by Means of Neutron Diffraction: Book of Abstr. of the Intern. Conf. Dubna: JINR, 2011. P. 28.
3. *Bazaleev N. I. et al.* Simulating the Radiation Transformations in Rocks: Potential Media for Radioactive Waste Disposal // Phys. Part. Nucl. Lett. 2009. V. 6, No. 5. P. 417–423.
4. Боршковский И. А. и др. Исследование возбуждения акустических волн в металлах быстрыми заряженными частицами и γ -квантами // ЖЭТФ. 1972. Т. 63, вып. 4(10). С. 1337–1342.
5. Воловик В. Д., Лазурик В. Т. Акустический эффект пучков заряженных частиц в металлах // ФТТ. 1973. Т. 15. С. 2305–2307.
6. Залюбовский И. И., Калининченко А. И., Лазурик В. Т. Введение в радиационную акустику. Харьков: Вища шк., 1986. 168 с.
7. Бацанов С. С., Демидов Б. А., Рудаков Л. И. Использование сильноточного РЭП для осуществления структурных превращений // Письма в ЖЭТФ. 1979. Т. 30, вып. 9. С. 611–613.
8. Королев М. В. Аперiodический пьезодатчик для ультразвуковых дефектоскопов // Дефектоскопия. 1975. № 4. С. 12–18.
9. Уваров В. Т. и др. Поверхностная закалка углеродистой стали сильноточным РЭП микросекундной длительности // Тез. докл. на всесоюз. конф. «Модификация свойств конструкционных материалов пучками заряженных частиц». Томск, 1988. Ч. III. С. 96–98.
10. Брюховецкий В. В. и др. Влияние импульсного электронного облучения на параметры сверхпластичности дюралюмина // Физика и химия обработки материалов. 2002. № 4. С. 33–38.
11. Донец С. Е. и др. Абляция медных мишеней при облучении сильноточным трубчатым пучком релятивистских электронов // Физика и химия обработки материалов. 2011. № 2. С. 8–12.

Получено 28 мая 2013 г.