

УДК 53.05

О ПРИРОДЕ ДЕФЕКТОВ В СТРУКТУРЕ ТВЕРДЫХ ТЕЛ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ С ЭНЕРГИЕЙ, НЕ РАЗРУШАЮЩЕЙ МАТЕРИАЛ В ЦЕЛОМ

С. Д. Зотов, Э. Н. Лоткова, Н. А. Распопов

Методом акустико-эмиссионного анализа установлена природа дефектов в твердых образцах при облучении их поверхности импульсом излучения CO₂-лазера с энергией 1.5 Дж, не разрушающей образец. В качестве образцов использовались стержни, изготовленные как из материалов с кристаллической структурой (алюминий и медь), так и аморфных (стекло). Исследовались параметры сигналов акустической эмиссии от торца стержня при воздействии на противоположный торец сфокусированного лазерного излучения. Проведенный анализ показал, что в результате лазерного воздействия в структуре всех исследованных образцов происходят локальные изменения – появились дефекты в виде микротрещин, причем в случае стеклянного образца, наиболее хрупкого материала, произошло развитие трещин, существовавших в стекле еще до облучения.

Ключевые слова: лазерное воздействие, алюминий, медь, стекло, дефекты, акустическая эмиссия.

Введение. В настоящее время лазеры благодаря своим уникальным качествам узкой направленности излучения, широкого оптического спектра, возможных больших мощностей и др., широко применяются в науке и технике. При этом остаются актуальными исследования воздействия на материал лазерного излучения, в частности, возможных изменений в его структуре, возникновения дефектов вследствие облучения импульсом лазерного излучения с мощностью, не разрушающей материал в целом. В наших предыдущих работах [1–3] при исследовании воздействия сфокусированного излучения CO₂-лазера на твердые образцы из металла и стекла были обнаружены акустические сигна-

ФИАН, 119991 Россия, Москва, Ленинский пр-т, 53; e-mail: rna@sci.lebedev.ru.

лы в ультразвуковом диапазоне – акустическая эмиссия (АЭ). Это свидетельствовало о появлении в образцах в результате лазерного облучения локальных изменений, дефектов, источников упругих волн, поскольку АЭ – это процесс излучения упругих волн, волн напряжений, вызванных внутренними источниками в толще материала [4]. Причиной их появления в образце является термическое расширение отдельного участка вследствие его нагрева за счет поглощения лазерного излучения. Генерация волн напряжения в твердом образце при быстром нагревании части его поверхности подробно рассмотрена в работе [5].

Как установлено многими исследованиями, форма сигналов АЭ, “акустических событий”, их продолжительность, частотный спектр и другие параметры зависят от природы источников, их порождающих [6–10]. Современная диагностическая акустическая аппаратура позволяет регистрировать эти параметры, в связи с чем анализ характеристик АЭ позволяет определять природу этих источников, дефектов структуры, возникших в толще материала вследствие внешнего воздействия, нагрузок.

В данной работе с помощью специальной акустическо-эмиссионной аппаратуры были проведены исследования формы сигналов АЭ и их частотного спектра для твердых образцов в виде стержней после воздействия на поверхность одного из торцов образца импульса сфокусированного излучения CO_2 -лазера. Были исследованы образцы металлические, с кристаллической структурой (алюминиевый, размером $11.7 \times 3 \times 2.4 \text{ мм}^3$, медный $190 \times 5 \times 5 \text{ мм}^3$) и стеклянный, марки “Крон” ($120 \times 5.7 \times 4.4 \text{ мм}^3$) с аморфной структурой.

На основании анализа полученных данных сделан вывод о природе дефектов в твердых образцах, возникших в результате лазерного воздействия.

Техника эксперимента. На рис. 1 приведена схема экспериментальной установки.

Импульс длительностью 0.3 сек непрерывного CO_2 -лазера мощностью ~ 5 Вт сформирован электромеханическим прерывателем и имел форму, близкую к прямоугольной. Вид импульса приведен в [1, 2]. Диаметр фокального пятна ИК-излучения на поверхности облучаемого торца составлял 0.8 мм. На противоположном торце в качестве датчика был закреплен акустический пьезопреобразователь, сигнал от которого через дифференциальный широкополосный усилитель попадал в анализатор акустической эмиссии СДС-1008 и затем для регистрации выводился на компьютер. На мониторе компьютера воспроизводилась общая картина АЭ – все акустические сигналы (АС) (события), возникающие с момента воздействия лазерного импульса. Наблюдения велись более 1 часа до полного прекращения возникновения АС. Вид общей картины АЭ и коли-

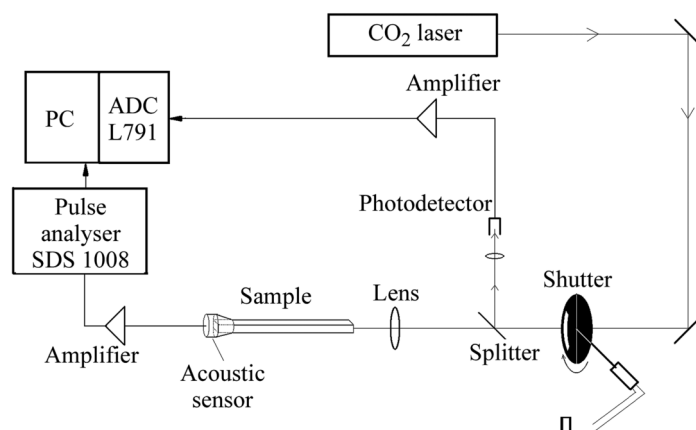


Рис. 1: Схема экспериментальной установки.

чество всех акустических событий в экспериментах со всеми исследуемыми образцами приведены в [2]. Для каждого АС записывалась его форма, т.е. зависимость амплитуды сигнала от времени, и спектр. Полоса частот регистрации возникающих АС составляла 20–4800 кГц. Подробные данные параметров АС приведены в [1, 2]. С целью выделения полезной информации от возможных наводок для каждого образца перед серией опытов записывались показания акустического датчика с полностью включенной аппаратурой, но с перекрытым лазерным пучком перед торцом образца.

Результаты эксперимента и их обсуждение. С каждым образцом последовательно с интервалом 10–15 минут были проведены серии опытов: 7 опытов с алюминиевым, 4 – с медным и 3 – со стеклянным. В каждом опыте наблюдалось несколько АС, от 10 до 100.

На рис. 2 приведены форма (А) и спектр (В) характерных сигналов от исследованных образцов: рис. 2(а) – данные алюминиевого образца, рис. 2(б) – медного (масштаб для наглядности уменьшен), рис. 2(в) – стеклянного.

При регистрации АС механические импульсы преобразуются в электрические пьезопреобразователем, который сам обладает резонансными свойствами. В результате на форму сигнала накладывается “звон” самого датчика, что и наблюдается в экспериментах. Маленькие пички в спектре, повторяющиеся с одним и тем же интервалом, обусловлены резонансными свойствами измерительной аппаратуры.

Как показано в [2], количество АС в каждом опыте было различное. Время возникновения и амплитуды также различались, но некоторые сигналы имели одинаковую форму и частотный спектр, т.е. были одного типа. Выделяются два типа полезных сигналов.

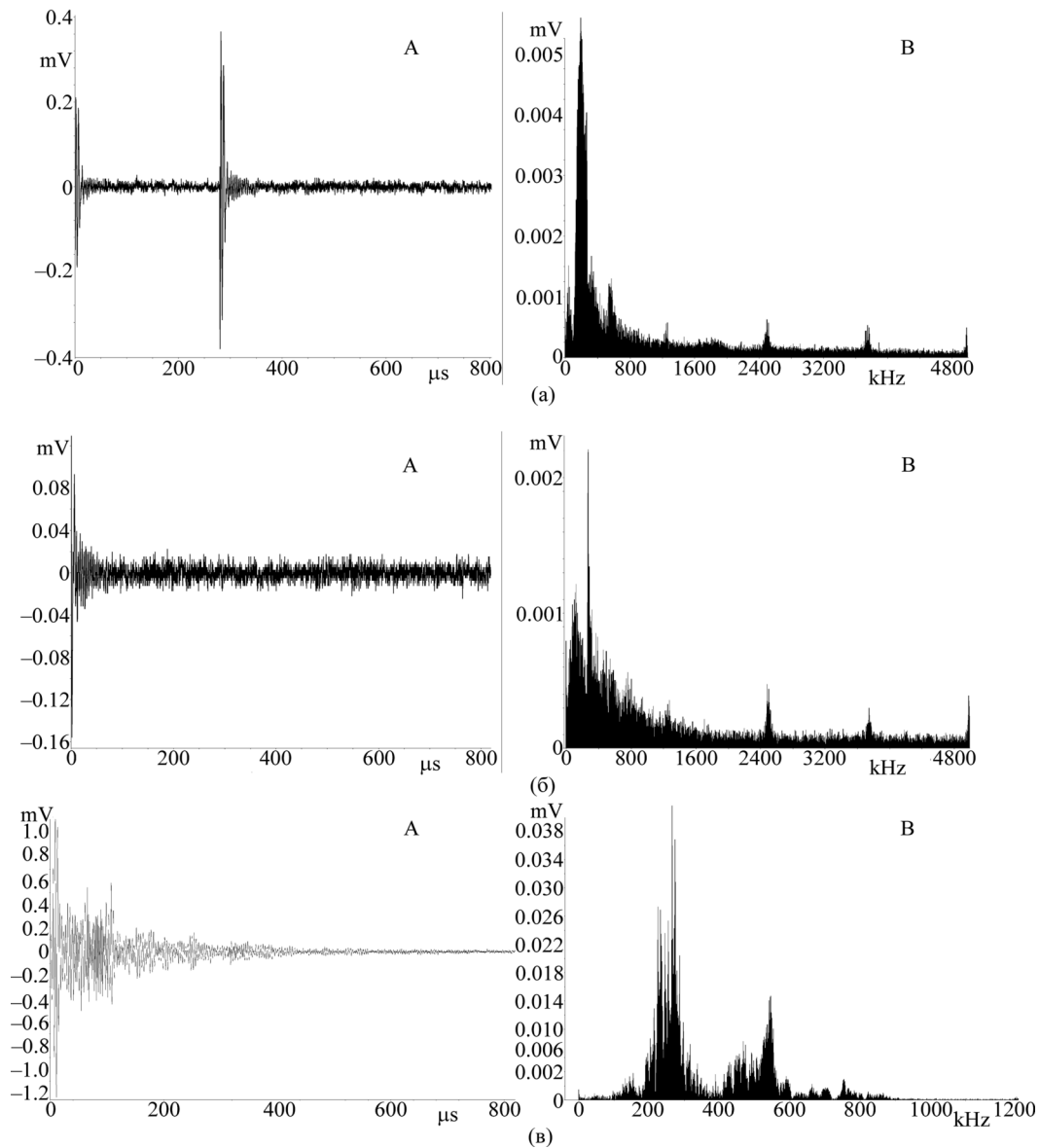


Рис. 2: (а) Форма (А) и спектр (В) акустических сигналов, (а) – алюминиевого образца, (б) – медного образца, (в) – стеклянного образца.

Тип I. Сигнал очень короткий, < 10 мкс, с резким максимумом и выраженным “хвостом”, спектр находится в диапазоне 20–800 кГц и имеет один резкий максимум вблизи 30 кГц (см., напр., рис. 2(а) и 2(б)).

Тип II. Сигнал сравнительно продолжительный ~ 400 мкс (рис. 2(в)) и также имеет “хвост”, содержащий характерные биения. В спектре наблюдаются несколько максимумов в диапазоне 800–4000 кГц.

Появление хвоста в форме сигнала, как показали экспериментальные и теоретические исследования [4, 11], наблюдается в случае, когда воздействие источника АЭ резко обрывается, в результате чего происходит резкое изменение градиента плотности материала, искажается форма механического импульса по мере его распространения и появляется хвост вследствие разных зависимостей фазовых и групповых скоростей от длины волны (частоты).

Сигналы типа I мы наблюдали в экспериментах со всеми образцами.

В случае алюминиевого образца (рис. 2(а)) форма сигнала имеет резкий максимум с амплитудой более 0.40 мВ, спектр имеет один резкий максимум > 0.005 мВ, что свидетельствует о том, что сигнал обусловлен одним акустическим событием. В случае медного образца (рис. 2(б)) наблюдаемые сигналы были значительно меньшей амплитуды (< 0.1 мВ). Максимум в спектре один и также меньшей величины ~ 0.001 – 0.002 мВ. В стеклянном образце величина сигналов лежала в интервале 0.04–1 мВ.

В экспериментах со стеклянным образцом, кроме сигналов типа I, были зарегистрированы сигналы типа II. На рис. 3 в качестве иллюстрации приводится характерная форма сигнала с несколькими максимумами (тип II) и, для сравнения, форма сигнала с четко выраженным одним максимумом. Как видно из приведенных рис. 2(в) и 3 (В), форма сигнала типа II представляет собой наложение нескольких последовательных сигналов типа I. Спектр лежит в диапазоне частот 200–600 кГц и также имеет несколько максимумов. Все это свидетельствует о том, что сигнал типа II обусловлен несколькими близкими акустическими событиями, следовавшими одно за другим на протяжении ~ 0.1 мс.

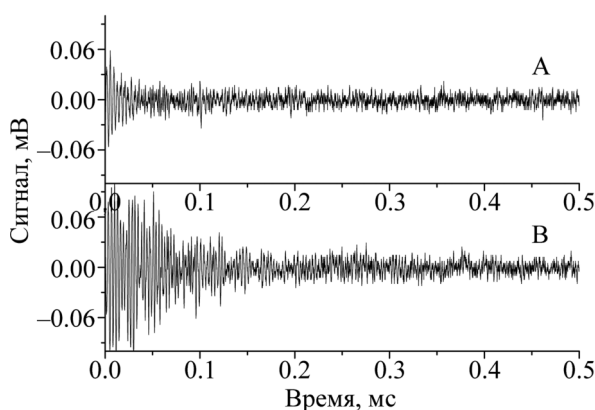


Рис. 3: Характерная форма акустического сигнала в опытах со стеклянным стержнем: с одним максимумом (А) и несколькими (В).

В опытах со всеми образцами иногда возникали акустические сигналы, форма которых имела резкие границы начала и конца, спектр со многими максимумами лежал в широком диапазоне 800–4500 кГц (см., напр., рис. 4). Они обусловлены наводками, связанными с работой всей измерительной аппаратуры.

К настоящему времени благодаря многочисленным работам (см., [7–11] и ссылки в них) установлено, что во всех твердых материалах, включая стекло, акустическая эмиссия при нагрузках вызывается, в основном, образованием или развитием микро-

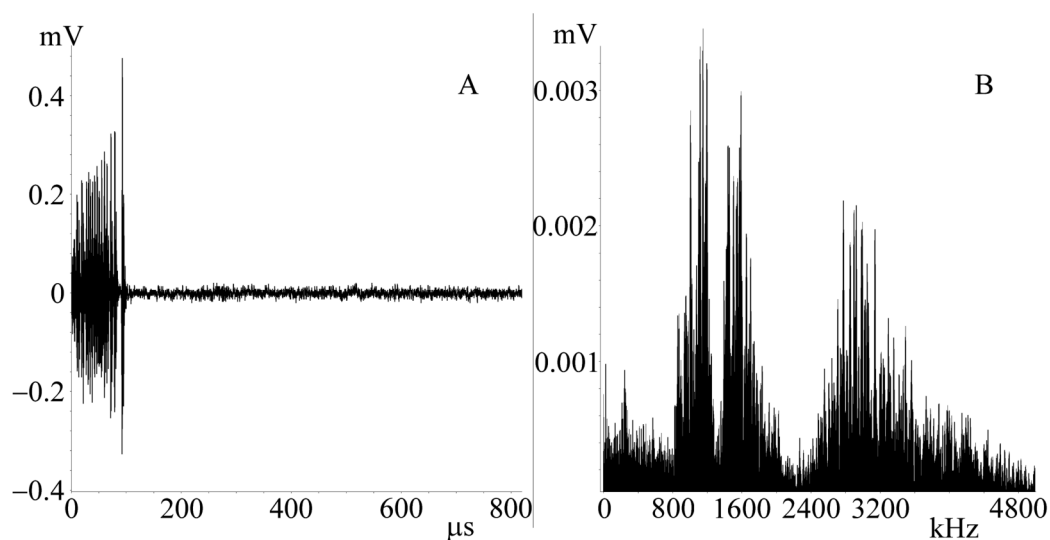


Рис. 4: Форма (A) и спектр (B) акустического сигнала, связанного с наводками.

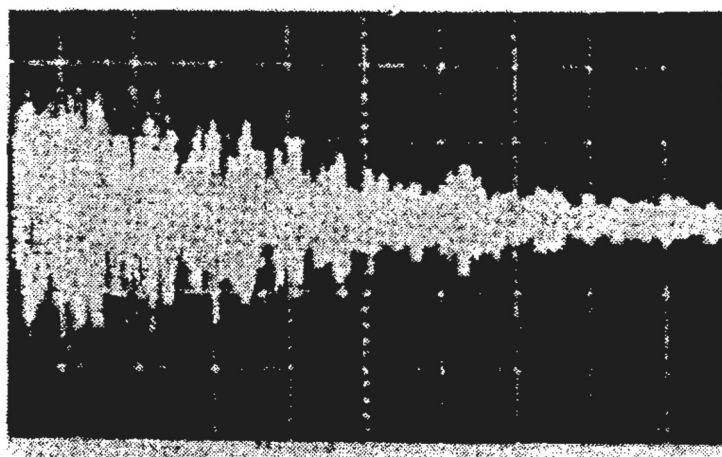


Рис. 5: Сигнал акустической эмиссии, вызванный ростом трещины, при испытании трубы на излом, 1.0 мс/см (из работы [10]).

трещин, а в случаях твердого материала с кристаллической структурой, кроме этого, смещением дислокаций – пластической деформацией [12–16]. Замечено, что образование микротрещин вызывает сигналы сравнительно короткие, что связано с разрывом атомных связей – процессов мгновенных, а смещение дислокаций – процесс сравнительно длительный, и соответствующее акустическое событие является довольно продолжительным [7–9]. В работе [7], посвященной нанометрологии при создании современных конструкционных материалов, приводится таблица параметров сигналов для некоторых источников АЭ, в ней показано, что длительность АС в случае образования микротрещин на несколько порядков меньше по сравнению с длительностью процессов $\sim 10^4$ мкс, связанных с дислокациями.

В опубликованных работах, касающихся корреляции характеристик АС с видом их источников, рассматриваются, в основном, случаи статических нагрузок, т.е. длящихся сравнительно продолжительное время, в течение которого и наблюдается возникновение АЭ. В нашем случае нагрузка, т.е. воздействие лазерного излучения, менее продолжительная, поэтому некоторые дефекты не успевают полностью проявиться, и сигналы АЭ более короткие. Однако результаты опубликованных работ полезны для анализа наших данных, т.к. в них приводятся данные различных дефектов в структуре твердых тел, которые могут быть источниками АЭ, характеристики соответствующих АС, а также ряд других полезных сведений. В связи с этим результаты работ [8–10] рассмотрены ниже подробнее, т.к. в них приведены фотографии форм АС, обусловленных образованием и развитием зафиксированных микротрещин.

В работах [8, 9] из анализа АС различных материалов (сталей разных сортов, алмаза, и др.) сделан вывод о том, что все АС по форме можно разделить на две группы: сигналы от микро- и макротрещин и сигналы, возникающие при пластической деформации. В [8] исследовались АС при нагрузках разного вида (растяжение, сжатие), в ней приведены формы АС на стадиях пластического деформирования и трещинообразования. Отмечено, что в первом случае наблюдались сигналы с небольшой амплитудой и затаженные, их связывают с дислокациями. Во втором случае наблюдались сигналы с широким диапазоном амплитуд и остроконечной формы, их связывают с возникновением трещинам и их развитием, что экспериментально зафиксировано (см. подробности в [3]).

В работе [10] отмечается, что развитие трещин, уже имеющихся в материале, приводит к сравнительно продолжительному АС. В ней приводится вид акустического сигнала, вызванный ростом трещины при испытании трубы из углеродистой стали на излом

(см. рис. 5). При рассмотрении АЭ, обусловленной увеличением трещины, представляющей собой высокочастотный пакет акустических событий, авторы считают “наиболее разумным, что наблюдаемый АС представляет собой ряд отдельных эмиссионных событий, ибо нелогично рассматривать увеличение трещины в пределах одного зерна”.

Как видно из [8], экспериментально подтверждено, что форма АС с одним максимумом, “остроконечность”, обусловлена образованием одной микротрещины. А сопоставление формы АС на рис. 3(В) и рис. 5 подтверждает, что сигналы типа II, наблюдаемые в наших экспериментах, связаны с ростом трещины.

Таким образом, из анализа результатов проводимых нами экспериментов следует вывод, что АС типа I, продолжительностью < 10 мкс, с одним максимумом в спектре, свидетельствующим о том, что соответствующий сигнал связан с одним акустическим событием, обусловлен образованием микротрещины. Это подтверждается и сопоставлением формы сигнала с теоретическими расчетами для случая, уже упомянутого ранее, когда воздействие резко обрывается [4, 11]. Меньшая величина сигналов в случае медного образца по сравнению с алюминиевым связана с тем, что медь относится к группе “тяжелых” металлов, а алюминий к группе “легких”. Удельная плотность меди (8.9 г/см^3) значительно больше удельной плотности алюминия (2.7 г/см^3) и “внутреннее трение” [11] в случае меди будет сильнее ослаблять акустическую волну, регистрируемую пьезодатчиком, по сравнению со случаем алюминия.

Наблюдаемые сигналы типа II в случае стеклянного образца связаны с ростом, т.е., развитием микротрещин. Как видно из приведенных рисунков, форма акустического сигнала включает в себя нескольких импульсов, характерных для одной микротрещины.

Сигналы АЭ, которые можно было бы связать с дислокационными дефектами, т.е. сигналы с длительностью десятки миллисекунд, не обнаружены. Возможно, это объясняется недостаточной энергией воздействующего лазерного импульса.

Заключение. Во всех исследованных образцах, металлических и стеклянном, при воздействии лазерного импульса на их поверхность с энергией, не разрушающей образец в целом, в толще образцов появляются дефекты структуры в виде микротрещин; причем величина акустического сигнала зависит от характеристик материала. В случае стеклянного образца, помимо этого, такое воздействие лазерного излучения приводит к развитию уже имеющихся до облучения микротрещин.

Авторы выражают благодарность Е. М. Кудрявцеву за ценные замечания и обсуждение результатов, и сотруднику ИМЕТ РАН М. М. Ляховицкому за предоставление

акустико-эмиссионного оборудования и ценные замечания при обсуждении результатов представленной работы.

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

Л И Т Е Р А Т У Р А

- [1] С. Д. Зотов, А. А. Лебедев, Э. Н. Лоткова, М. М. Ляховицкий, Инж. Физ., № 3, 3 (2015).
- [2] С. Д. Зотов, А. А. Кузнецов, А. А. Лебедев, Э. Н. Лоткова, Краткие сообщения по физике ФИАН, **44**(8), 3 (2017).
- [3] С. Д. Зотов и Э. Н. Лоткова, Препринт ФИАН № 1 (ФИАН, Москва, 2017).
- [4] В. А. Грешников, Ю. Б. Дробот, *Акустическая эмиссия* (М., изд. Стандартов, 1976).
- [5] R. M. White, J. Appl. Phys. **34**(12), 3359 (1963).
- [6] Н. А. Семашко, В. И. Шпорт, Б. Н. Марьин и др., *Акустическая эмиссия в экспериментальном материаловедении* (М., Машиностроение, 2002).
- [7] Ж. Желкобаев, В. Иванов и др., *Наноиндустрия*, № 6, 34 (2009).
- [8] Н. В. Новиков, С. Ф. Филоненко, И. Н. Городынский, В. С. Бирюков, *Сверхтвердые материалы*, № 3, 42 (1987).
- [9] С. Ф. Филоненко, И. Н. Городынский, В. С. Бирюков, *Физико-химическая механика материалов*, № 6, 105 (1985).
- [10] *Методы неразрушающих испытаний. Физические основы, практическое применение, перспективы развития. II. Теоретические и физические основы.* Под ред. Р. Шарпа (М., Мир, 1972).
- [11] Г. Кольский, *Волны напряжения в твердых телах.* Изд. И.Л. (М., Ин. Лит., 1955).
- [12] Т. А. Конторова, Я. И. Френкель, *ЖЭТФ* **8**, 89 (1938).
- [13] N. Kiesewetter, *Scripta Metallurgica* **8**, 249 (1974).
- [14] N. Kiesewetter, P. Shiller, *Phys. Stat. Sol. (a)* **38**, 569 (1976).
- [15] В. А. Greenberg, М. А. Ivanov, Yu. N. Gornostirev, L. E. Karkina, *Phys. Stat. Sol. (a)* **38**, 653 (1976).
- [16] Y. Pau, W. Sachse, H. Fukuoka, *Phys. Acoustic* **XVII**, 61 (1984).
- [17] С. Д. Зотов, А. А. Кузнецов, А. А. Лебедев, Инж. Физ., № 10, 20 (2015).

Поступила в редакцию 19 апреля 2017 г.