

## Акустическая эмиссия в системе „сотовая матрица–композит“ при разных режимах нагрева

© Е.М. Асеев,<sup>1,2</sup> Е.В. Калашников<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Научно-учебный центр „Качество“,  
127018 Москва, Россия

<sup>2</sup> Московский государственный областной университет,  
105005 Москва, Россия  
e-mail: aseevgenij@yandex.ru, ekevkalashnikov1@gmail.com

Поступило в Редакцию 10 января 2023 г.

В окончательной редакции 11 декабря 2023 г.

Принято к публикации 14 декабря 2023 г.

Экспериментально изучена сложная система, сочетающая в себе сотовую структуру, сопряженную по нормали с композиционной структурой. Для этого использованы идеи акустической эмиссии в твердых телах (т.е. измерение отклика в акустическом диапазоне на внешнее воздействие). Но в отличие от традиционного нагружения (сжатие или растяжение) образца внешними силами использована вариация температурного поля, в которое помещен образец. Изменение температурного поля во времени (скорость изменения температуры) порождает градиенты температурного поля в образце, которые, в свою очередь, генерируют механические напряжения в образце, возбуждая в нем акустические колебания. Зависимости амплитуд акустических сигналов от времени и от скорости изменения температуры обнаруживают четкое отличие бездефектного образца от образца с дефектом.

**Ключевые слова:** структура пчелиных сот, композит, механические напряжения, дефекты в структурах, температурное поле, акустическая эмиссия.

DOI: 10.61011/JTF.2024.02.57085.1-23

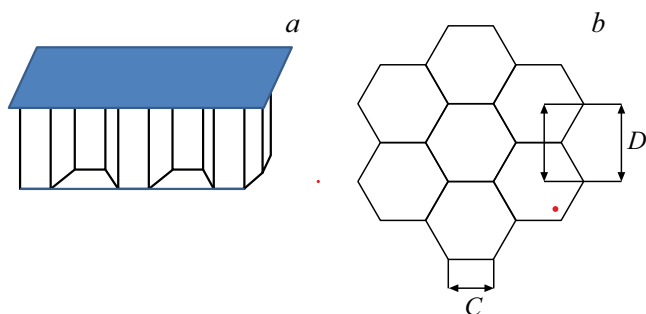
### Введение

Возникновение излучения акустических колебаний в телах под воздействием нагрузки, известное как акустическая эмиссия (АЭ), широко используется для исследования дефектов твердых тел и их дислокационной природы [1–9]. Эти методы позволяют контролировать фазовые переходы в кристаллах [5] и в неоднородных жидких средах [6]. Причем в последних двух случаях ультразвуковые колебания возникали не в результате внешней нагрузки, а в результате возникновения (или снятия в случае растворения) механического напряжения при фазовом переходе в процессе понижения температуры. В этих последних случаях управляющим фактором является изменение температуры. Методы АЭ являются одним из эффективных методов исследования дефектности [7–9] и качества изделий [10,11]. Эти же методы используют для исследования сотовых наноструктур растений [12]. Методы АЭ применяют к исследованию специальных, искусственно созданных структур в виде пчелиных сот [13–15].

Основной подход в использовании метода АЭ состоит в необходимости нагружать объект контроля. При воздействии внешней нагрузки, например изгибающей силы, на исследуемый объект его дефекты, склонные к развитию, начинают скачкообразно подрастать, вызывая локальные перестройки материала, которые являются источниками акустических волн, а сама область перестройки — источником АЭ [16,17].

В случае искусственной системы „сотовая матрица–внешний композит“ (рис. 1) наличие многих границ сопряжения может вызывать плохо контролируемые напряжения и приводить либо к высокому затуханию ультразвуковых (УЗ) колебаний, либо к большому числу дополнительных источников УЗ колебаний. Сопряжение сот между собой, их изготовление и сопряжение с композиционной пластиной, нормальной к оси сотовой структуры, не исключает их неидеального исполнения. Это предполагает, что соты, изготовленные из специально приготовленной бумаги, могут иметь неплотное прилегание стенок сот между собой — неоднородность такого прилегания, неоднородность сопряжения сотовой структуры с композиционным внешним слоем. Все это создает трудность и неопределенность даже в определении понятия дефектности для такой структуры. Также в повседневных испытаниях нет возможности механически изгибать или сжимать такую конструкцию.

Между тем изменение температурного поля со временем и возникающие при этом температурные градиенты могут изменять напряжения в телах [18]. Эти изменения могут вызывать структурные перестройки вблизи дефектов, склонных к развитию, и, как следствие, явление АЭ. Таким образом, манипуляции с температурой и контроль возникающей при этом АЭ могут служить независимым методом исследования сложной системы типа „сотовая матрица–внешний композит“. Отметим, что изменения температурного поля в образцах позволяют определять



**Рис. 1.** Общий вид образца (а) и размеры сот (b). Соты сделаны из специально обработанной бумаги.

температуры, при которых происходят фазовые превращения [5].

В работе [19] сообщалось, как сложная система типа „сотовая матрица–внешний композит“ откликается на, в общем-то, неконтролируемые температурные изменения в зависимости от наличия дефекта в сотовой структуре. Однако то, как характер этих температурных изменений (свободный или принудительный нагрев) влияет на сигналы АЭ, осталось неясным.

Цель настоящей работы состоит в том, чтобы выяснить, как наличие дефекта в системе „сотовая матрица–внешний композит“ будет откликаться на условия разных режимов (свободного и принудительного) нагрева образцов различных размеров.

## 1. Методика эксперимента

### 1.1. Образцы

Сотовая структура состоит из полимерной бумаги (известной, как арамидная), которая сопряжена с угольным композитом (рис. 1). Упругие и прочностные свойства в этих структурах достигаются применением пропитывающих составов на основе спирторастворимых фенолформальдегидных смол.

Соты представляют собой шестигранные призмы высотой  $h = 28.5$  мм. Расстояние между центрами сот  $D = 5.2$  мм, ширина грани равна  $C = 3$  мм. Рассматривали два типа образцов. Образцы готовили таких же размеров, что и в случае пробных испытаний [19]. Первый тип образцов (далее образцы „S“, малые размеры) имеют размеры  $100 \times 53 \times 30$  мм<sup>2</sup>, а второй тип образцов является большим по размерам (далее большой образец „L“):  $225 \times 95 \times 30$  мм<sup>2</sup>. Большие образцы были выбраны так, чтобы их акустические свойства были такими же, как и в самом большом изделии, т.е. были проведены предварительные измерения.

### 1.2. Аппаратурное обеспечение эксперимента

Изменяющееся температурное поле в результате нагрева образца создает в нем градиенты температуры,

которые индуцируют внутренние напряжения. В результате, в исследуемом образце возникают локальные перестройки, которые становятся источниками дискретной АЭ. Сигналы АЭ поступают на вход преобразователя АЭ (ПАЭ), откуда сигнал идет на вход предусилителя и далее на блок аналого-цифрового преобразователя системы детектирования и обработки сигналов. Параллельно с контролем АЭ в режиме реального времени обеспечивается контроль температуры образца с помощью тепловизора с частотой 1 кадр в 10 с.

В процессе эксперимента использовали: низкочастотный пьезоэлектрический ПАЭ GT-205, масляную контактную смазку для увеличения коэффициента прохождения акустических сигналов и ПАЭ, предусилители ALP-01, комплекс акустико-эмиссионный измерительный „A-Line 32D“, тепловизор InfReC R550Pro-D.

Использование такой многоканальной техники позволило проводить и соблюдать одинаковость условий эксперимента одновременно для различных образцов. Это является важным, поскольку невозможно обеспечивать каждый раз одни и те же температурные условия, т.е. нет двух экспериментов, в которых были бы совершенно совпадающие температурные условия.

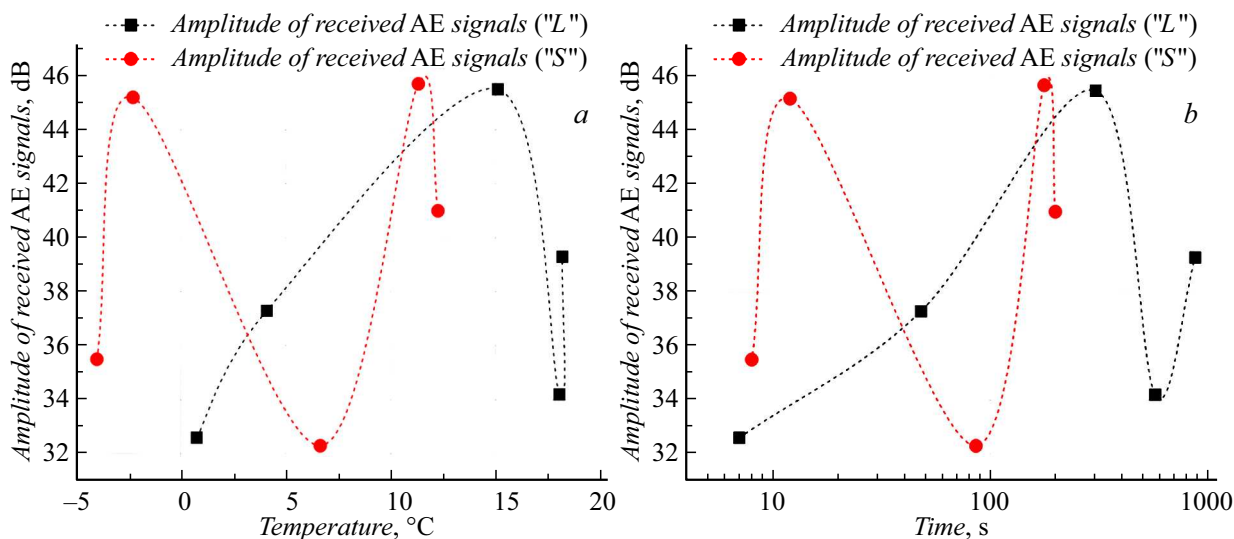
В ходе регистрации система A-Line 32D имела следующие параметры:

- коэффициент предварительного усиления 34 dB,
- усиление 0 dB,
- уровень собственных шумов 29 dB,
- порог дискриминации 32 dB,
- ФВЧ — 30 kHz,
- ФНЧ — 250 kHz.

В экспериментах образцы первоначально были помещены в морозильную камеру и охлаждались до температуры  $T = -10^\circ$ , после чего на внешний композитный слой каждого из них ставили по одному пьезоэлектрическому преобразователю АЭ. Параллельно с приемом УЗ волн регистрировали изменение температурного поля (закон изменения  $T^\circ\text{C}$  температуры во времени  $t$ ,  $T = T(t)^\circ\text{C}$ ) образца, определяли скорость изменения температуры. С помощью тепловизора одновременно регистрировали изменение температурного поля в образцах малых (S) и больших (L) размеров.

При рассмотрении поведения образцов в условиях изменения температур от отрицательных значений к комнатным значениям температуры необходимо было предусмотреть конденсацию влаги в соты. Поскольку при дальнейшем росте температуры от отрицательных значений и далее, через тройную точку воды и выше, возникшие при конденсации кристаллики льда в сотах при испарении до  $0^\circ\text{C}$ , а затем и при плавлении, вносили бы неконтролируемый вклад в акустический сигнал. Чтобы избежать такого влияния конденсата в сотах на акустический сигнал, образцы предварительно просушивали (в том числе и при высоких температурах), затем помещали в сухой холодильник при  $-10^\circ\text{C}$ .

После изготовления образцов и проведения всего комплекса исследований на бездефектных образцах в



**Рис. 2.** Зависимости амплитуды пришедших на ПАЭ сигналов АЭ для бездефектных образцов от температуры ( $S$ ) и от времени ( $L$ ) до создания искусственных дефектов имеют точечный характер. Точки соединены пунктирными линиями затем, чтобы отличить сигналы разных образцов. Сигналы существуют только в этих точках. Черные точки соответствуют маленькому образцу. Красные точки соответствуют большому образцу.

каждом из них на одной из бумажных сот был введен искусственный дефект — сделан вертикальный надрез (параллельный бумажной соте). Затем повторялся весь вышеописанный комплекс испытаний для дефектных образцов.

Рассмотрение влияния изменения температуры на АЭ бездефектных и дефектных образцов проводили двумя разными способами.

Первый способ предполагал естественный нагрев образца в результате помещения предварительно охлажденного образца в условия комнатной температуры. В среднем этот процесс можно охарактеризовать скоростью изменения температуры. На начальном этапе нагрева эта скорость самая высокая:  $\Delta T/\Delta t \approx 0.1^\circ \text{C/s}$ .

Второй способ использовал принудительное нагревание. Суть этого подхода состояла в том, что предварительно охлажденный образец подвергался нагреву галогенной лампой, тем самым повышалась скорость увеличения температуры.

В предварительных экспериментах проводился следующий опыт: на поверхность, куда планировалось устанавливать преобразователь, ставился принимающий ПАЭ в различных точках, а с обратной стороны в одну конкретную точку ставился второй ПАЭ — излучающий. Проводилась эта операция с целью выяснить, будет ли точка установки принимающего преобразователя влиять на результаты эксперимента. Выяснилось, что не будет. Будь размеры образцов больше, то влияние на результаты взаимного расположения источника АЭ и принимающего ПАЭ проявилось бы. Но в настоящей работе линейные размеры образцов сравнительно небольшие. Тем не менее для сопоставимости результатов в каждом

эксперименте принимающий ПАЭ ставился в одну и ту же точку.

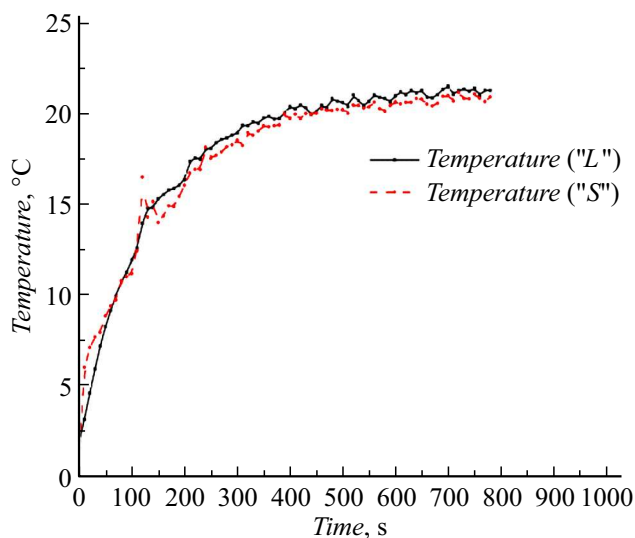
Основной характеристикой при АЭ является поток акустических импульсов. Поток акустических импульсов возникает при больших нагрузках. Перестройка структуры при этом носит необратимый характер. В нашем же случае (в случае тепловых воздействий в диапазоне от  $-10$  до  $30^\circ \text{C}$ ) количество энергии, получаемое при таком воздействии (см. разд. 3) оказывается гораздо меньше. Соответственно количество испускаемых в структуре импульсов оказывается малым. В таком случае уместно говорить о зависимости амплитуд акустических сигналов от температуры и времени, а не о числе импульсов в единицу времени.

## 2. Результаты экспериментов

Все результаты по экспериментальным данным для дефектных образцов можно разбить на две группы: малых ( $S$ ) и больших ( $L$ ) образцов. Каждый раз пара образцов, состоящая из образца малого размера ( $S$ ) и образца большого размера ( $L$ ), помещалась в одно и то же температурное поле.

Нас интересует поведение дефектных образцов. Но чтобы увидеть в чем и как проявляется дефектность, необходимо сравнить их поведение с бездефектными образцами. Тем более, что каждый шаг изучения начинался с бездефектного образца. Поэтому на рис. 2 для сравнения приведено поведение бездефектных образцов разного размера при свободном нагреве.

Большая часть пришедших сигналов температуры — начальный, линейный участок:  $0-15^\circ \text{C}$ , а далее при



**Рис. 3.** Свободная релаксация температуры от  $-10$  до  $+25^\circ\text{C}$  на дефектных образцах. На красной кривой (большой образец ( $L$ )) при  $120\text{ s}$  возникает единственный сигнал (красная точка на рис. 4). Обозначим эту пару образцов как  $\alpha$ -образцы.

переходе температурной зависимости в насыщение зависимость амплитуд акустических сигналов падает (эта зависимость сходна с кривой, приведенной на рис. 3 для дефектного образца, за исключением ярко выраженного пика на ней).

Первое, на что указывают результаты экспериментов — существует разница в акустическом поведении образцов малых и больших размеров, когда они помещены в идентичные внешние условия.

## 2.1. Свободная релаксация температуры дефектных образцов от отрицательных значений температуры до комнатной температуры

Рассматривали, как образцы разных размеров с искусственным дефектом (вертикальный надрез параллельный образующей бумажной соты), охлажденные до отрицательных температур ( $-10^\circ\text{C}$ ) и помещенные в условия комнатной температуры ( $+25^\circ\text{C}$ ), проявляют себя при релаксации температуры от отрицательных значений до ее комнатных значений при скорости нагрева  $\Delta T/\Delta t \approx 0.1^\circ\text{C/s}$  (рис. 3).

При этом регистрировали амплитуду приходящих с образцов сигналов (рис. 4). Здесь при наличии дефекта активная часть излучения сигналов приходится на интервал температур от  $0$  до  $\sim 16^\circ\text{C}$ . Скорость изменения температуры в этом интервале  $\Delta T/\Delta t \approx 0.1^\circ\text{C/s}$ .

Вариации закона изменения температуры ( $T = T(t)$ ) и создание в новой паре образцов дефектов ведет и к изменению общей картины размещения точек излучения акустических сигналов на зависимостях от времени.

Как следует из сопоставления рис. 3 и 4 с рис. 5, закон изменения температуры ( $T = T(t)$ ) существенным обра-

зом меняет число событий АЭ. В одном случае (рис. 3) „картина“ АЭ очень бедна. В другом (рис. 5) — количество пришедших на систему акустических импульсов оказывается существенно большим. Таким образом, отличия акустического поведения малого и большого образцов существенны. Наконец, на следующей паре образцов (рис. 6) возникает другая, новая, картина зависимости амплитуд акустических сигналов от времени.

В отсутствие изменения температуры (при стационарных значениях температуры в интервале от  $-2$  и до  $+25^\circ\text{C}$ ) акустические сигналы не наблюдаются.

## 2.2. Принудительный нагрев образцов от отрицательных значений температуры до комнатной температуры

Далее проводили эксперимент с нагреванием дефектных образцов с помощью галогенной лампы (принудительный нагрев). При этом было выбрано расстояние от лампы  $1.5\text{ m}$  для обеспечения, с одной стороны, достаточного нагрева, а с другой — равномерности пятна нагрева (рис. 7).

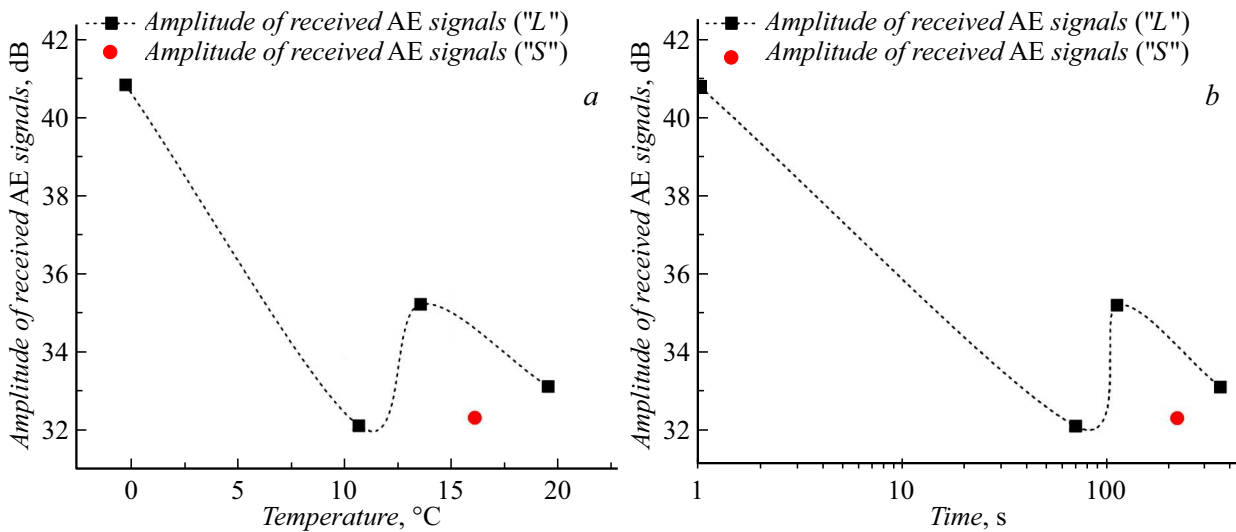
Скорость изменения температуры при принудительном нагревании увеличивается в два раза по сравнению со свободной релаксацией температуры. Принудительный нагрев приводит к общему конечному повышению температуры образца до  $30^\circ\text{C}$ . При этом зависимости „температура–амплитуда принятого сигнала“ и „время–амплитуда принятого сигнала“ (рис. 8) существенно отличаются от таких же зависимостей для естественной релаксации (рис. 4). В частности, теперь количество сигналов АЭ на начальном этапе разогрева увеличивается (для малого образца), а для большого образца возникает два сигнала (красная линия, рис. 8).

Этим зависимостям (рис. 8) соответствует закон изменения температуры (рис. 9), и он задает характер изменения акустических сигналов в зависимости от температуры и от времени.

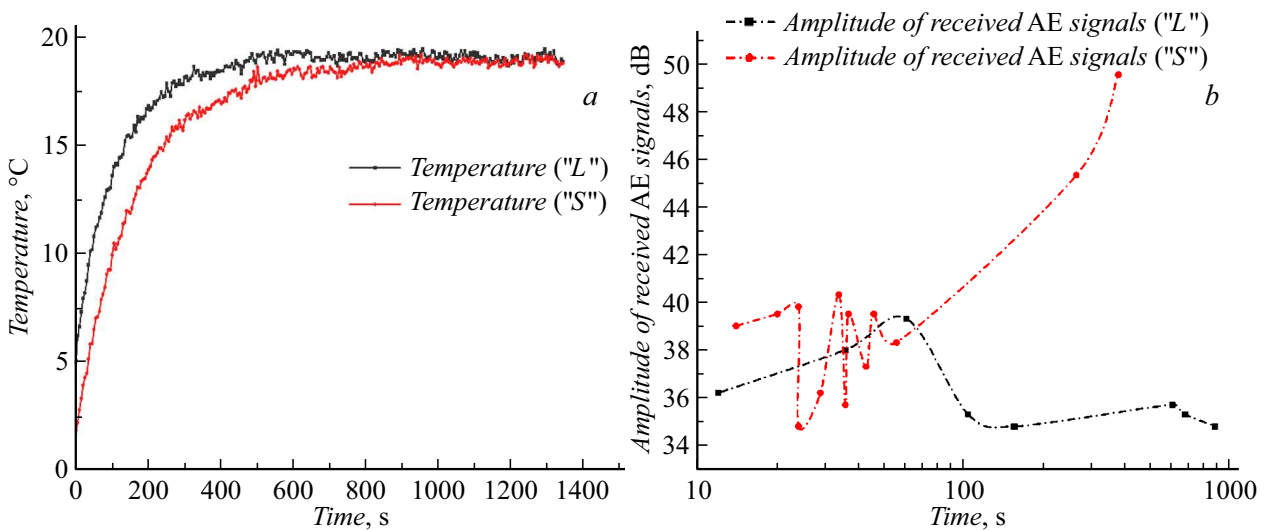
При стационарных значениях температуры в интервале  $0-30^\circ\text{C}$  акустические сигналы отсутствовали.

Однако при применении принудительного нагрева изменение закона вариации температуры (рис. 10) меняет существенным образом зависимости амплитуд акустических сигналов образцов. В частности, малый образец ( $S$ ) быстро приходит в равновесие, тогда как большой продолжает излучать. При этом следует отметить, что на начальном этапе нагрева для малого образца „ $S$ “  $\Delta T/\Delta t \approx 0.2^\circ\text{C/s}$ , в то время как для большого образца „ $L$ “  $\Delta T/\Delta t \approx 0.1^\circ\text{C/s}$ .

Сочетание и сравнение трех типов зависимостей бездефектного, дефектного при свободной релаксации и дефектного с принудительным нагревом (рис. 2–10) четко обнаруживает влияние дефекта принудительного нагрева и размеров образца на сигналы АЭ и их последовательность во времени. При этом определяющим элементом в характеристиках акустической активности является закон температурного изменения образца, ( $T = T(t)^\circ\text{C}$ ).



**Рис. 4.** Зависимости амплитуды пришедших на ПАЭ сигналов АЭ для дефектных образцов от температуры (а) и от времени (b) при свободной релаксации температуры, соответствующей закону нагревания рис. 3. Здесь также точечная зависимость амплитуды сигнала. И пунктирная линия приведена лишь для того, чтобы указать на отличие сигналов от разных образцов. При этом сигнал от образца (L), большего по размеру, вырождается в единственную точку (красная точка), т. е. за все время наблюдения возникает и фиксируется только один сигнал. Эта пара образцов относится к  $\alpha$ -образцам.



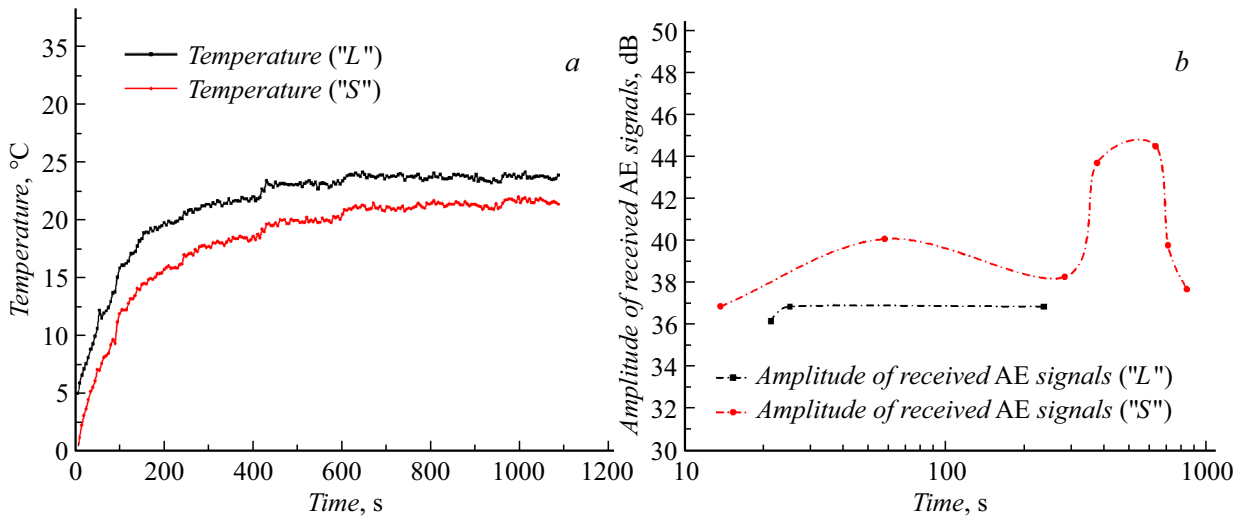
**Рис. 5.** Закон изменения температуры (а) и соответствующая ему зависимость амплитуд акустических сигналов от времени (b) малого (S) и большого (L) дефектных образцов. Обозначим эту пару образцов как  $\beta$ -образцы.

### 3. Результаты и их обсуждение

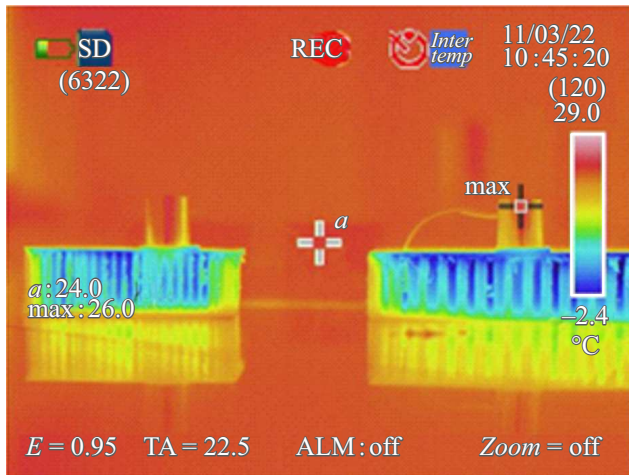
Методы АЭ, обычно применяемые на практике, используют внешние нагрузки, способные создавать существенные перестройки структуры, приводящие к росту уже существующих в теле дефектов, склонных к развитию, а также к появлению микродефектов в виде дислокаций, трещин (например, для создания дислокации требуется энергия  $\epsilon \sim 10^8 \text{ erg/cm}^3$  [20]). При этом происходит испускание ультразвуковых колебаний в испытуемом теле. К таким типам нагрузки можно отнести и методы исследования углепластиков методом

АЭ [21,22]. Однако температурные изменения в образце, сопровождающие процесс его нагрева, не всегда могут приводить к существенным перестройкам структуры. Например, в условиях нагрева количество энергии  $\epsilon \sim 10^2 \text{ erg/cm}^3$ , сообщаемое образцу (в нашем случае), оказывается, по крайней мере, на несколько порядков меньше. Скорее всего температурные изменения в рассматриваемом диапазоне температур (от  $-10$  до  $30^\circ\text{C}$ ) будут вызывать деформации обратимого типа и при этом создавать отклик системы в виде излучения ультразвуковых колебаний в образце. Продемонстрируем эту ситуацию [18].





**Рис. 6.** Закон изменения температуры (a) и соответствующая ему зависимость амплитуд акустических сигналов от времени (b) малого (S) и большого (L) дефектных образцов. Обозначим эту пару образцов как  $\gamma$ -образцы.



**Рис. 7.** Контроль внешней температуры, обеспечивающей однородность температурного поля окружения для двух разных образцов (синий цвет соответствует охлажденному образцу, желтый цвет соответствует комнатной температуре).

(i) Нашему исследуемому телу можно сопоставить свободную энергию

$$F(T) = F(T_0) - K\alpha(T - T_0)u_{ii} + \mu \left( u_{ik} - \frac{1}{3} \delta_{ik} u_{ii} \right)^2 + \frac{K}{2} u_{ii}^2, \quad (1)$$

из которой тензор напряжений равен

$$\sigma_{ik} = \partial F / \partial u_{ik}. \quad (2)$$

И из условия отсутствия внешних сил  $\sigma_{ik} = 0$  получаем

$$u_{ii} = \alpha(T - T_0). \quad (3)$$

Здесь  $T$  — абсолютная температура,  $T_0$  — исходное значение температуры, внешние нагрузки отсутствуют,  $\alpha$  —

коэффициент теплового расширения тела,  $K$  — модуль всестороннего сжатия,  $\mu$  — модуль сдвига,  $u_{ik}$  — тензор деформации,  $u_{ii}$  — его диагональные элементы.

(ii) Нагрев (или остывание) тела связано с подводом (или отводом) тепла  $dQ/dt = T \partial S / \partial t$ :

$$T \partial S / \partial t = \text{div } \mathbf{q}, \quad (4)$$

где  $\mathbf{q} = -\chi \nabla T$ ,  $\chi$  — теплопроводность,  $S$  — энтропия.

В условиях ультразвуковых колебаний в твердом теле выполняются условия адиабатичности, потому что за период колебаний между соседними участками тела обмен теплом произойти не успевает. А это означает, что энтропия тела за период колебаний остается неизменной:

$$S(T) = S(T_0) + K\alpha u_{ii}. \quad (5)$$

Из разложения  $S(T) - S(T_0)$  в ряд по отклонению  $(T - T_0)$  получаем

$$S(T) - S(T_0) = \partial S / \partial T |_{T=T_0} (T - T_0) = (C_v / T_0) (T - T_0). \quad (6)$$

Здесь  $C_v$  — теплоемкость при постоянном объеме.

Тогда из (5) получим, что разность температур порождает деформации, вызывающие локальное увеличение объема ( $u_{ii} = u_{11} + u_{22} + u_{33}$ ):

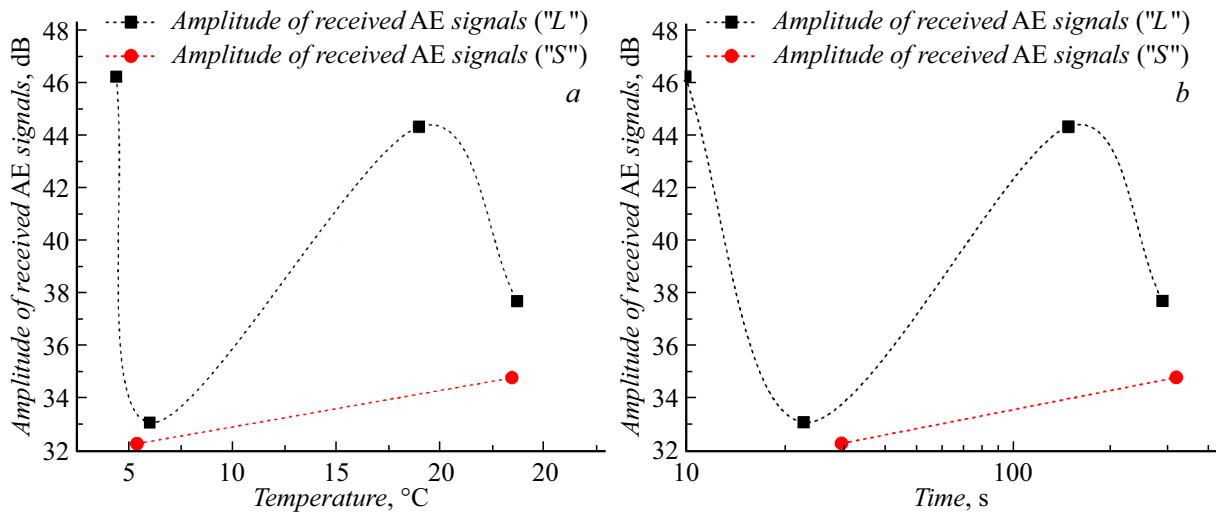
$$T - T_0 = (T_0 \alpha K / C_v) u_{ii}. \quad (7)$$

А подстановка (6) в (4) приводит к тому, что диагональный тензор деформации  $u_{ii}$  изменяется во времени, в зависимости от изменения температуры:

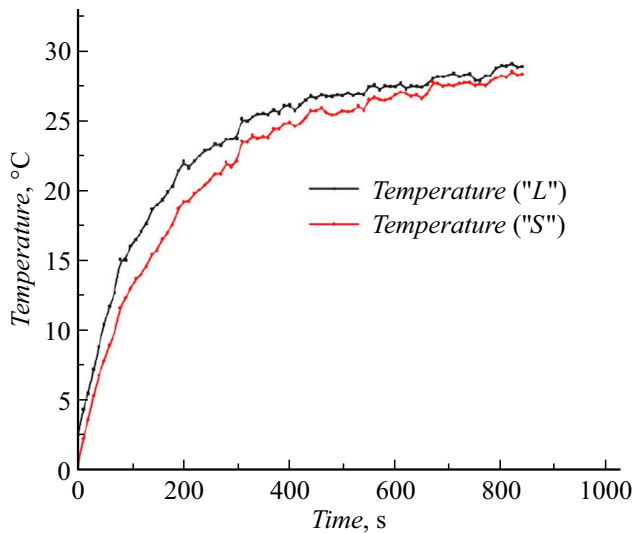
$$\partial u_{ii} / \partial t = \frac{1}{\alpha K T_0} (\chi \text{div grad } T - C_v \partial T / \partial t). \quad (8)$$

Поскольку  $\text{grad } T$  мало меняется вдоль образца, то это соотношение еще упрощается

$$\partial u_{ii} / \partial t = -\frac{1}{\alpha K T_0} C_v \partial T / \partial t.$$



**Рис. 8.** Зависимости амплитуды пришедших на ПАЭ сигналов АЭ для дефектных образцов от температуры (а) и от времени (б) при принудительном нагревании. *а*-образцы.



**Рис. 9.** Закон изменения температуры при принудительном нагреве для рис. 8.

(iii) Изменение во времени тензора деформации приводит к возникновению сил внутренних напряжений  $\partial\sigma_{ik}/\partial x_k$ , которые приводят к уравнению движения упругой среды с плотностью  $\rho$

$$\rho d^2u_i/dt^2 = \partial\sigma_{ik}/\partial x_k.$$

А при учете того, что  $u_{ii} = \text{div } \mathbf{u}$ , после ряда преобразований [18] получим волновое уравнение для вектора  $\mathbf{u}$ :

$$\partial^2\mathbf{u}_y/\partial t^2 - C_y^2\Delta\mathbf{u}_y = 0,$$

где  $C_y$  — скорость звука для продольных ( $y = l$ ), или для поперечных ( $y = t$ ) деформаций.

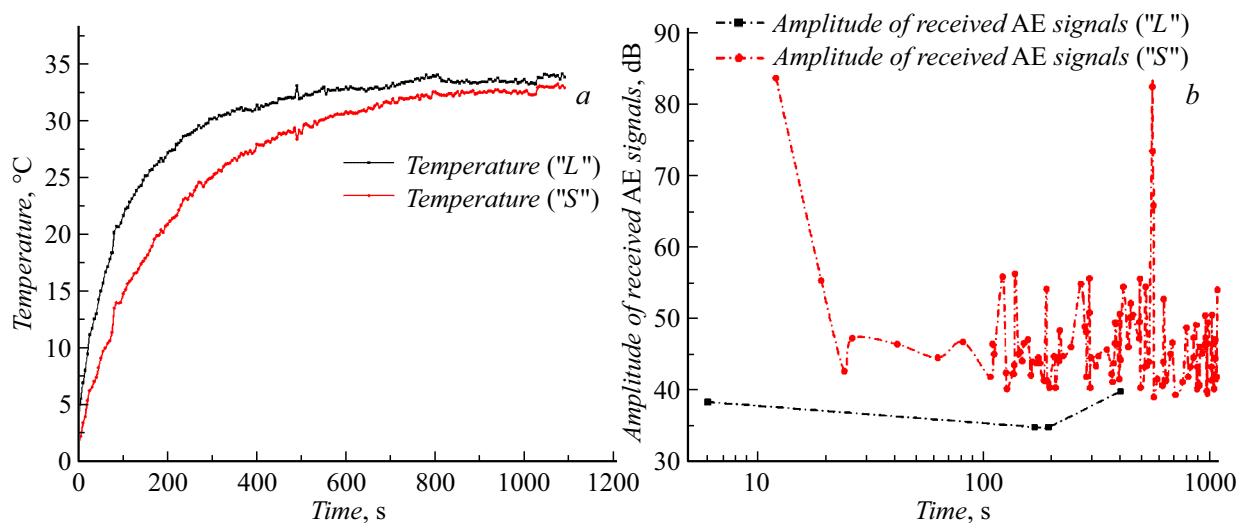
Таким образом, чтобы в образце наблюдать АЭ, можно менять в нем температурное распределение.

Возникающие при этом деформации невелики. И это не предполагает возникновения существенных перестроек в структуре образца, но обеспечивает излучение акустических колебаний. Кроме того, если в образце существует дефект, то он вызывает соответственно возникновение дополнительных напряжений. Это, в свою очередь, приводит к возникновению акустических сигналов.

Одним из результатов этой работы является выявление значимости вариации температуры образца со временем на возбуждение АЭ для бездефектных и дефектных образцов. Оказывается, что с повышением температуры бездефектный образец ведет себя на начальных стадиях активнее (генерирует большее число сигналов АЭ, рис. 2), чем дефектный (рис. 4, 7).

В случае образования дефекта наиболее четко проявляется зависимость амплитуд акустических сигналов от размеров образца. Однако однозначной картины, отличающей малый образец от большого, теперь нет. Всякий раз отличие размерного эффекта выявляется из их сопоставления. Причиной тому является закон  $T = T(t)^\circ\text{C}$ , который невозможно воспроизвести от опыта к опыту. Другой такой причиной отсутствия воспроизводимости является возникновение дефекта, который будет всегда отличаться от такого же дефекта в других образцах.

Другим важным результатом явилось то, что скорость изменения температуры при свободном нагреве (от отрицательных значений температуры до комнатной температуры) оказалась всего лишь в два раза меньшей, чем в случае принудительного нагрева. Такая слабая зависимость температурного изменения от нагрева сотых структур связана, по-видимому, в первую очередь, с их большой теплоемкостью. И принудительный нагрев здесь не будет сильно менять температуру, ровно до тех пор, пока в остальной части образца не будет распределено избыточное тепло по всему образцу. Такая ситуация сходна с фазовыми переходами первого рода,



**Рис. 10.** Закон изменения температуры (а) и зависимость амплитуд акустических сигналов дефектных образцов большого (L) и малого (S) размера во времени (b)  $\beta$ -образцы.

когда начало перехода и конец перехода определяются скрытой теплотой фазового перехода, например, плавления (в случае перехода „жидкость–твердое тело“). Действительно (рис. 8, 10), первый сигнал пришел при условии, что малая часть сотовой структуры прогрелась и возникли дополнительные напряжения, а последний сигнал возник тогда, когда вся остальная часть образца достигла одной температуры и стала как одно целое.

В заключении отметим, что на всех образцах малых размеров (пять образцов) и больших размеров (три образца) картина зависимости амплитуды пришедших сигналов АЭ от температуры и от времени при свободном нагревании проявляет сходство только в одновременном сопоставлении больших и малых образцов в каждой  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ ,  $\delta$ ,  $\epsilon$ -группе. Т.е. в каждой группе  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ ,  $\delta$ ,  $\epsilon$ -образцов при одновременном измерении большого и малого образца выявляется наличие дефекта. Здесь приведены результаты только по  $\alpha$ ,  $\beta$  и  $\gamma$ -группам образцов (в этих группах приведен полный комплект больших и малых образцов, группы  $\delta$ ,  $\epsilon$  обеспечены только малыми образцами и во многом повторяют поведение малых образцов из групп  $\alpha$ ,  $\beta$  и  $\gamma$ ).

## Заключение

Сравнение зависимости амплитуд акустических сигналов от температуры и от времени дает следующие основные результаты:

1) Идентичные сотовые панели, отличающиеся лишь геометрическими размерами, в отсутствие дефектов имеют различные зависимости амплитуды сигналов АЭ от времени.

2) Закон изменения температурного поля влияет на суммарное число зарегистрированных импульсов АЭ, возникающей в сотовой структуре. Это указывает на то,

что изменяется либо средняя амплитуда импульсов АЭ, либо разброс амплитуды вокруг среднего значения.

Таким образом, из экспериментов следует, что строго устойчивой картины зависимости амплитуд акустических сигналов от формы дефекта или размера дефекта и от размеров образцов нет. Но при отсутствии вариации температурных полей нет и сигналов АЭ. Сигналы АЭ возникают при вариации температурного поля и они отличаются в случае наличия дефектов и позволяют обнаруживать дефекты.

## Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

## Список литературы

- [1] Д.С. Андрианов, В.В. Благовещенский, И.Г. Панин. ЖТФ, **86** (5), 124 (2016).
- [2] Y. Chen, X. Ding, D. Fang, J. Sun, E.K.H. Salje. Scientific Reports, **9**, 1 (2019). DOI: 10.1038/s41598-018-37604-5
- [3] Z. Chen, J. Qu. J. Appl. Phys., **114**, 164906 (2013).
- [4] C.S. Kim, S.I. Kwun, C.J. Lissenden. J. Korean Phys. Society, **55**, 528 (2009).
- [5] Ш.Ш. Азимов, В.Н. Петухов, А.Н. Лакаев, А.М. Лексовский. ЖТФ, **86** (4), 155 (2016).
- [6] Д.М. Кузнецов, А.Н. Смирнов, А.В. Сыроешкин. РХЖ (хим. общ-ва им. Д.И. Менделеева), **52** (1), 114 (2008).
- [7] D.G. Aggelis, T. Shiotani, S. Momoki, A. Hirama. ACI Mater. J., **106–M56**, 6 (2009).
- [8] F. Bu1, L. Xue, M. Zhai1, X. Huang, J. Dong, N. Liang, C. Xu. Scientific Reports, **12**, 498 (2022).
- [9] L. Dong, Q. Tao, Q. Hu, S. Deng, Y. Chen, Q. Luo, X. Zhang. Intern. J. Mining Sci. Technol. (Available online 31 January 2022)
- [10] D.-J. Yoon, S. Lee, C.Y. Kim, D.-C. Seo. NDT Safety November 07–09, 2007, Prague, Czech Republic. P. 55–62.



- [11] A. Zejli, A. Khamlichi, S. Attajkani, K. Ameziane. 24ème Congrès Français de Mécanique Brest, 2019. 26 au 30 Août.
- [12] J. Cybulska, P.M. Picczywek, A. Zdunek. Eur. Food. Res. Technol., **235**, 119 (2012).
- [13] F.A. Leone, Jr., D. Ozevinb, V. Godinezb, B. Mosinyic, J.G. Bakuckas, Jr., J. Awerbuche, A. Laue, T.-M. Tane. *Conference Paper in Proceedings of SPIE — The International Society for Optical Engineering* (2008), March. DOI: 10.1117/12.776146
- [14] Y. Liu, B.J. Pang, B. Jia, Z.Z. Chang. Proc. 6<sup>th</sup> European Conference on Space Debris, Darmstadt (Germany, 22–25 April, 2013)
- [15] Y. Huang, K.M. Li. *The Summer Undergraduate Research Fellowship (SURF) Symposium* (4 August Purdue University, West Lafayette, Indiana, USA, 2016), p. 1–14.
- [16] С.А. Бехер, А.Л. Бобров. *Основы неразрушающего контроля методом акустической эмиссии* (Изд-во СГУП-Са, Новосибирск, 2013)
- [17] С.И. Буйло. *Физико-механические, статистические и химические аспекты акустико-эмиссионной диагностики* (Изд-во Южного федерального ун-та, Таганрог, 2017)
- [18] Л.Д. Ландау, Е.М. Лифшиц. *Теория упругости* (Наука, М., 1987)
- [19] Е.М. Асеев, Е.В. Калашников. Вестник МГОУ, **2**, 17 (2022). DOI: 10.18384/2310-7251-2022-2-17-27
- [20] А.А. Смирнов. *Молекулярно-кинетическая теория металлов* (Наука, М., 1966), 488 с.
- [21] Л.Н. Степанова, С.И. Кабанов, В.В. Чернова. Дефектоскопия, **4**, 3 (2022). DOI: 10.31857/S0130308222040017
- [22] Н.А. Махугов, Ю.Г. Матвиенко, В.И. Иванов, И.Е. Васильев, Д.В. Чернов. Приборы и техника эксперимента, **2**, 109 (2022). DOI: 10.31857/S003281622202001X