

Акустическая эмиссия при фазовом переходе «кристалл-жидкость» в сотовой структуре типа «пчелиных сот»

Е.М. Асеев*

ООО «НУЦ «Качество». Россия, 127018, Москва, проезд Марьиной роши 3-ий, д.40, стр. 1
(Поступила в редакцию 09.06.2024; подписана в печать 11.12.2024)

Экспериментально изучается сложная система, представляющая собой сотовую структуру, сопряженную по нормали с композиционной структурой, и содержащая внутри себя дефект типа «конденсат воды» в виде кристалликов льда. Для обнаружения такого дефекта используется явление акустической эмиссии. Обычно для возникновения акустической эмиссии прибегают к механическому воздействию на объект. Но в отличие от этого традиционного нагружения (сжатия или растяжения) образца внешними силами, здесь используется вариация температурного поля, в которое помещен образец. В процессе нагревания экспериментального образца начинается фазовый переход «лед-вода», приводящий к явлению акустической эмиссии. Зависимости амплитуд акустических сигналов от времени и от скорости изменения температуры обнаруживают четкое отличие образцов с дефектом «скопление воды» от образцов без таких дефектов.

PACS: 43.40.Le

УДК: 534-8

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

ВВЕДЕНИЕ

Основной подход в использовании метода акустической эмиссии (АЭ) состоит в необходимости нагружать объект контроля [1–8]. 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 акустической эмиссии [9, 10].

Такой метод исследования связан, хоть и с малыми, но необратимыми перестройками исследуемой структуры. Однако акустическую эмиссию можно вызывать путем изменения температурного поля, в которое помещен экспериментальный образец [11, 12].

В этой работе продолжено экспериментальное изучение дефектов замкнутой сотовой структуры. Такие сотовые структуры находят широкое применение в современной авиационной, космической, железнодорожной технике [13–17]. Замкнутая сотовая структура представляет собой «сэндвич» с сотовым наполнителем между двумя листами углепластикового композита. Сотовый наполнитель состоит из синтетических волокон. Такие структуры, в силу условий их изготовления и эксплуатации, обладают разнообразными дефектами. При этом самым распространенным из них является отслоение хотя бы одной из плоскостей композита, закрывающих соты. Это способствует активному скоплению конденсата воды, поскольку отслоение такой плоскости, во-первых, позволяет влаге извне проникать в соты, а во-вторых, создает возможность распределяться влаге между сотами.

Для обнаружения дефектов типа «скопление воды» была применена методика АЭ обнаружения дефектов под воздействием тепловых полей [11, 12] и развита для регистрации акустических импульсов, источником которых является фазовый переход «лед-вода» в сотах.

Цель настоящей работы состоит в том, чтобы выяснить, как наличие дефекта «скопление воды» в структуре типа «пчелиных сот» будет проявлять себя в ультразвуковом диапазоне.

1. МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

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. Сами экспериментальные образцы по размерам составляли $135 \times 85 \times 30$ мм³ (рис. 1).

Так как описываемый дефект связан с *отслоением хотя бы одного из листов*, покрывающих сотовую структуру, для моделирования такой ситуации у экспериментальных образцов был удален один лист композита с одной стороны и контролируемо заполнили водой доверху ровно 4 соседние соты (ровно 2 мл воды). При этом преобразователь для регистрации сигналов акустической эмиссии ставился с нижней стороны образца.

Схема эксперимента и его аппаратное обеспечение описано в [11, 12]. С учетом того, что фазовый переход протекает относительно долго, данные собирались на протяжении более продолжительного времени,

* aseevgenij@yandex.ru

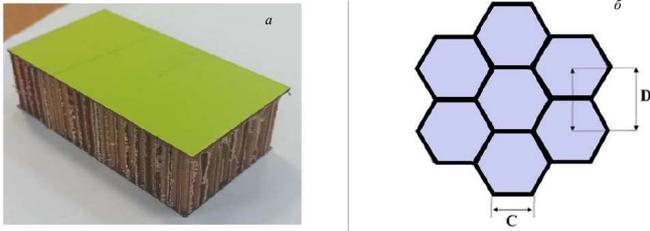


Рис. 1. Общий вид образца (а) и размеры сот (b). Соты сделаны из специально обработанной бумаги

чем в [11, 12]. Помимо этого, большое число принятых акустических импульсов потребовало их детального анализа.

Фазовый переход явился источником большого числа ультразвуковых импульсов. Часть из них были непригодны для получения достоверной информации (например, с одним выбросом или имевшие длительность более 20000 мкс, отсекались как шумовые).

Отметим, что резонансная частота преобразователей, использовавшихся для регистрации сигналов акустической эмиссии, составляла 55 кГц, а частота снятия термограмм равна одному кадру в 5 секунд.

На рис. 2 приведена схема заполнения сот водой.

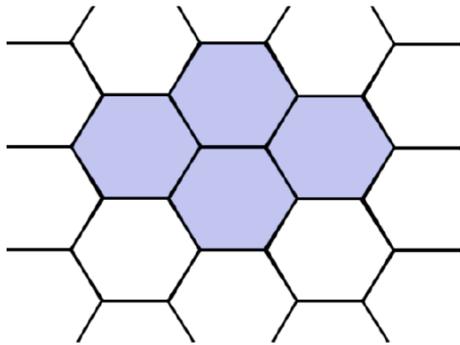


Рис. 2. Схема заполнения сот водой в экспериментальных образцах

Фильтрация принятых сигналов проводилась как средствами программного обеспечения акустической системы A-Line, так и с помощью специальных библиотек (pandas, numpy).

Анализ осциллограммы принимаемых импульсов.

На скриншоте (рис. 3) приведена осциллограмма (зависимость амплитуды от времени) одного отдельно взятого акустического импульса.

Параметры 1а, 2а, 3а (см. рис. 2) задаются пользователем и остаются неизменными во время всего проведения эксперимента. А параметры 1, 2, 3, 4, 5, 6 — характеристики акустических импульсов, которые записываются в память компьютера для каждого отдельного сигнала.

Порог дискриминации (мкВ) — задаваемый уровень, при превышении которого система начинает записы-

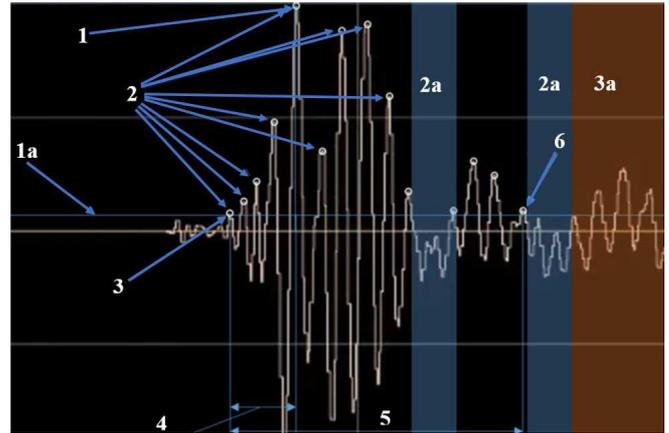


Рис. 3. Осциллограмма акустического импульса: 1а — порог дискриминации; 2а — время ожидания; 3а — мертвое время; 1 — амплитуда; 2 — выбросы; 3 — начало импульса; 4 — время нарастания; 5 — длительность; 6 — конец импульса

вать осциллограмму импульса.

Время ожидания (мкс) — задаваемое время, отсчет которого начинается после каждого опускания амплитуды сигнала ниже порога дискриминации. В течение этого времени сохранения осциллограммы в память прибора не происходит. Это своего рода таймер. И если амплитуда сигнала станет выше порога дискриминации раньше, чем этот таймер закончит отсчет, то продолжится запись данного импульса. Таймер же запустится заново, когда амплитуда сигнала снова опустится ниже порога дискриминации.

Мертвое время (мкс) — задаваемое время, отсчет которого начнется, если во время ожидания сигнал не превысил порога дискриминации. В этом интервале канал выключен. Даже если амплитуда сигнала превысит порог дискриминации, запись производиться не будет, потому что в промежуток мертвого времени преобразователь отключен от системы. Этот механизм призван абстрагироваться от повторной регистрации одной и той же акустической волны, пришедшей повторно на датчик после переотражения либо после пробега по замкнутой траектории.

Выброс — каждое отдельное пересечение порога дискриминации. При этом началом импульса считается момент, когда произошел первый выброс, а концом — последний. Каждый сигнал характеризуется количеством выбросов в нем.

Длительность (мкс) — время от начала до конца импульса.

Время нарастания (мкс) — время от начала импульса до момента достижения им максимальной амплитуды.

Частота (кГц) — отношение числа выбросов к длительности импульса. На иллюстрации этого параметра нет. Строго говоря, это усредненная частота. При этом она тем ближе к истинной частоте, чем больше в ней выбросов.

В процессе эксперимента записывались все сигналы, но часть из них являлись полезными, а часть — шумами. К примеру, электромагнитные помехи имеют небольшое количество выбросов (как правило, меньше восьми), крайне малую длительность (менее 10 мкс) и очень высокую амплитуду [18].

2. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

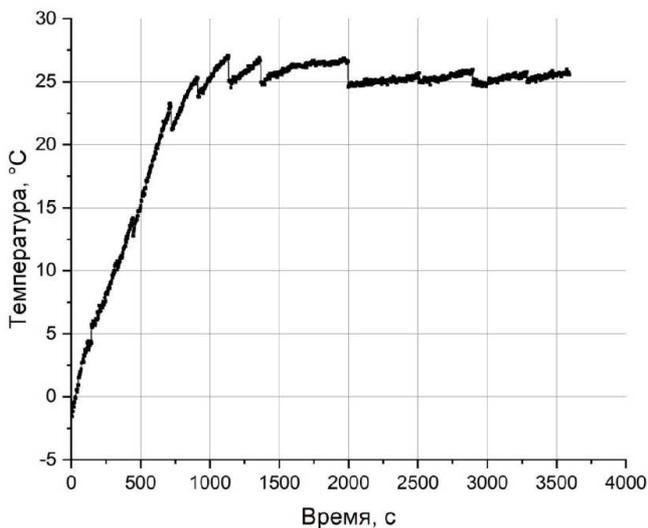


Рис. 4. График изменения температуры экспериментальных образцов (данные приведены для одного образца)

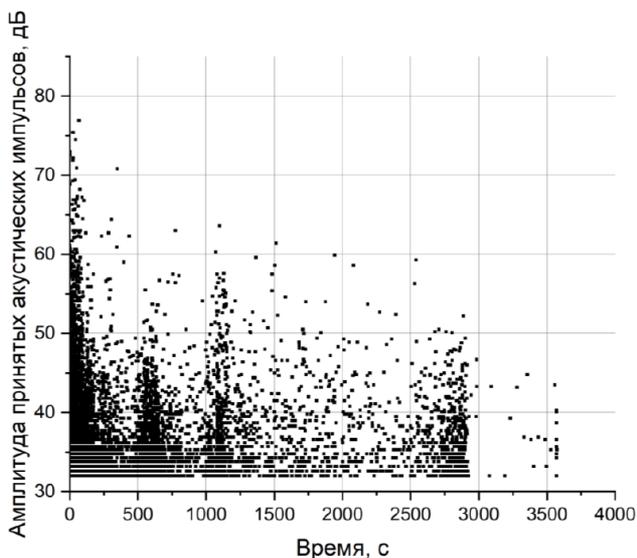


Рис. 5. Амплитуды принятых сигналов АЭ (данные приведены для одного образца)

Большинство принятых сигналов лежит в частотном диапазоне $90 \div 110$ кГц (рис. 8).

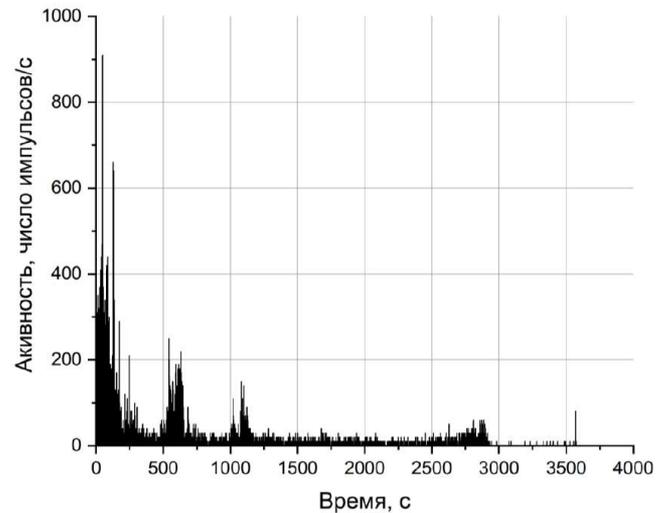


Рис. 6. Активность АЭ экспериментальных образцов (данные приведены для одного образца)

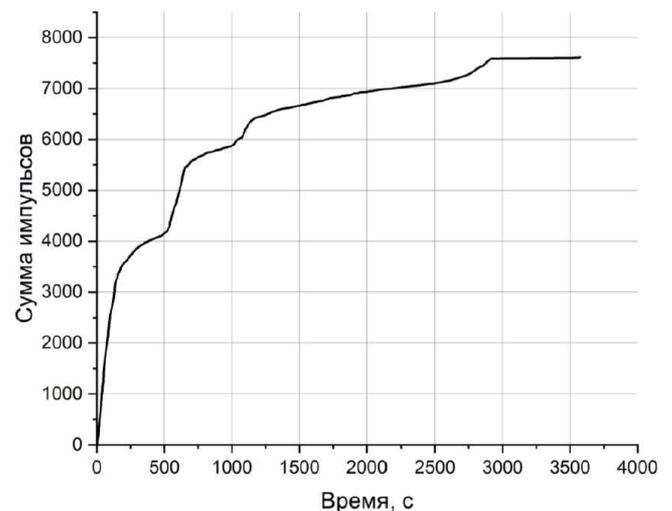


Рис. 7. Суммарное число импульсов от экспериментальных образцов (данные приведены для одного образца)

3. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Исследование дефектов, включающих в себя конденсат воды, методом акустической эмиссии, индуцированной изменениями температурного поля, обнаружило несколько закономерностей.

Во-первых, наблюдается разительное отличие явления акустической эмиссии в процессе фазового перехода от проявления ее в таких же сотовых структурах в отсутствие фазового перехода [12]. Это особенно ярко проявляется в количестве принятых импульсов.

Во-вторых, в условиях принудительного нагрева возникла четкая пилообразность в зависимости температуры образца от времени. (рис. 4), что может служить четким показателем наличия дефекта «влага в замкну-

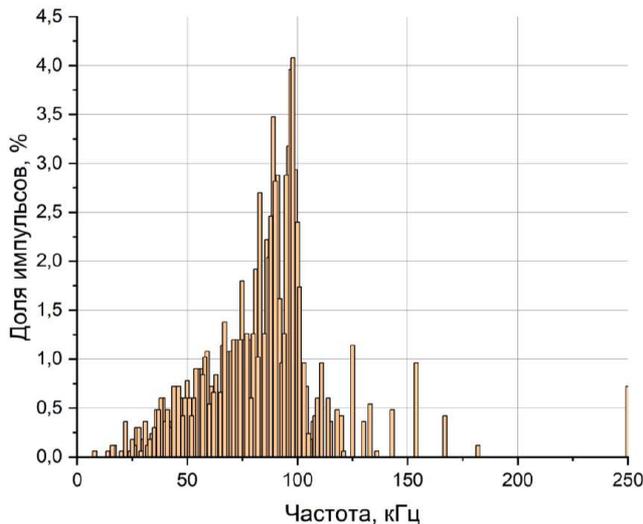


Рис. 8. Частотное распределение принятых импульсов

той структуре». Такая пилообразность может быть вызвана постепенным распространением тепла внутри дефекта. Поток тепла к соте определяется теплопроводностью как стенок соты, так и состоянием влаги в соте. Так, в начальный период нагрева соты со льдом нагрев льда определяется его высокой теплопроводностью. А как только лед превратился в жидкость, ее теплопроводность уменьшается в разы. Так, теплопроводность бумаги имеет значение ≈ 0.14 Вт/(м·К), смолы ≈ 0.18 Вт/(м·К), воздуха ≈ 0.022 Вт/(м·К), льда при $0^\circ\text{C} \approx 2.22$ Вт/(м·К), воды при $0.01^\circ\text{C} \approx 0.56$ Вт/(м·К). Таким образом, в пределах одной соты до завершения фазового перехода в ней распространение тепла происходит достаточно быстро через лед, однако далее процесс не распространяется, пока в конкретно данной соте не завершится таяние. После этого градиент температуры на границе «стенка соты — лед» испытывает резкое изменение, и тепло начинает с большей интенсивностью распространяться далее вглубь дефекта — к следующей соте, заполненной льдом. Соответственно, в такие моменты завершения фазового перехода в соте происходит скачкообразный отток тепла от внешних границ структуры.

В-третьих, этот же процесс может объяснить явные скачки на графиках амплитуды (рис. 5), активности

(рис. 6) и ступенчатость накопительного графика суммы импульсов (рис. 7).

В-четвертых, напомним, что резонансная частота использовавшихся преобразователей 55 кГц, однако максимум распределения частот принятых сигналов имеют смещение к $90 \div 100$ кГц. Это указывает на то, что сигналы АЭ при таянии воды внутри структуры такой геометрии имеют характерный частотный диапазон (вполне вероятно, зависящий от скорости нагрева, формы сотовой структуры и материала композитных листов).

Наблюдается выраженная картина всплесков амплитуды и активности в разрезе сравнения с результатами работы [19], где также изучалось явление акустической эмиссии в процессе таяния льда. Однако в работе [19] подобных всплесков не наблюдалось в принципе — только плавный спад амплитуды и активности. Мы видим в этом различии влияние геометрии и параметров сотовой структуры, в которую помещена вода, испытывающая фазовый переход. Это дает основания полагать, что есть хорошие предпосылки для обнаружения зависимостей «число всплесков — число соседних сот, заполненных водой» и «величина всплесков — степень средней заполненности сот водой».

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Сравнение зависимости амплитуд сигналов АЭ от времени дает следующие основные результаты.

1. Наличие в сотовой структуре дефекта типа «скопление воды» очень ярко выявляет себя в ходе фазового перехода. Суммарное число принятых импульсов при фазовом переходе «кристалл-жидкость» за тот же промежуток времени на порядки больше, чем в отсутствие жидкости [12].
2. Таяние воды в сотовой структуре коренным образом отличается от этого же процесса в отсутствие сотовой структуры, что дает предпосылки для оценки высоты столбцов конденсата внутри сотовых панелей и их количества по параметрам акустической эмиссии в ходе протекания фазового перехода.

[1] Андрианов Д.С., Благовещенский В.В., Панин И.Г. // ЖТФ. **86**(5). 124 (2016).
 [2] Chen Y., Ding X., Fang D. et al. // Scientific Reports. **1** (2019). doi.org/10.1038/s41598-018-37604-5
 [3] Chen Z., Qu J. // J. of Appl. Phys. **114**. 164906 (2013).
 [4] Kim C.S. Kwon S.I., Lissenden C.J. // Journal of the Korean Physical Society. **55**, 528 (2009).
 [5] Азимов Ш.Ш., Петухов В.Н., Лакаев А.Н., Лексовский А.М. // ЖТФ. **86**(4). 155 (2016).

[6] Aggelis D.G., Shiotani T., Momoki S., Hirama A. // ACI MATERIALS JOURNAL. N106-M56, 6 (2009).
 [7] Bu F., Xue L., Zhai M. et al. // Scientific Reports. **12**. 498 (2022).
 [8] Dong L., Tao Q., Hu Q. et al. // International Journal of Mining Science and Technology. Available online 31 January 2022.
 [9] Бехер С.А., Бобров А.Л. Основы неразрушающего контроля методом акустической эмиссии. Новосибирск:

- Изд-во СГУПС, 2013.
- [10] *С.И. Буйло* Физико-механические, статистические и химические аспекты акустико-эмиссионной диагностики. Таганрог: Издательство Южного федерального университета, 2017.
- [11] *Асеев Е.М., Калашников Е.В.* // Вестник МГОУ. **2**, 17 (2022). DOI:10.18384/2310-7251-2022-2-17-27
- [12] *Асеев Е.М., Калашников Е.В.* // Журнал технической физики. (2024). **94**, вып. 2. (2024).
- [13] *Yoon D.-J., Lee S., Kim C.Y., Seo D.-C.* // NDT for Safety November 07–09, 2007, Prague, Czech Republic. P. 55-62.
- [14] *Liu Y., Pang B.J., Jia B., Chang Z.Z.* // Proc. 6th European Conference on Space Debris, Darmstadt, 2013 Germany, 22-25 April
- [15] *Liu Y., Pang B.J., Jia B., Chang Z.Z.* // Proc. 6th European Conference on Space Debris, Darmstadt, 2013 Germany, 22-25 April.
- [16] *Huang Y., Li K.M.* The Summer Undergraduate Research Fellowship (SURF) Symposium. 2016, 4 August Purdue University, West Lafayette, Indiana, USA P. 1-14
- [17] *Zejlj A., Khamlichi A., Attajkani S., Ameziane K.* 24 Congrès Français de Mécanique Brest, 2019. 26 au 30 Août.
- [18] *Бигус Г.А., Дерябин А.А., Ремизов А.Л.* Диагностика состояния сварных соединений и конструкций. Курс лекций: Учебн. пособие. МГТУ им. Н. Э. Баумана. (Нац. исслед. ун-т). 2-е изд., испр. М: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2019.
- [19] *Кузнецов Д.М., Смирнов А.Н., Сыроешкин А.В.* // РХЖ (хим.общ-ва им. Д.И. Менделеева). **52**(1). 114 (2008).

Acoustic emission during the «crystal-liquid» phase transition in a honeycomb structure of the «honeycomb» type

Е.М. Асеев

LLC «NTS «Kachestvo». Moscow 127018, Russia

E-mail: aseevgenij@yandex.ru

A complex system is being studied experimentally, which is a honeycomb structure, normal-conjugated with the compositional structure, and containing within itself a defect of the «water condensate» type in the form of ice crystals. To detect such a defect, the phenomenon of acoustic emission is used. Usually, to produce acoustic emission, mechanical impact on the object is used. But, unlike this traditional loading (compression or tension) of a sample by external forces, this uses a variation in the temperature field in which the sample is placed. During the heating of the experimental sample, the ice-water phase transition begins, leading to the phenomenon of acoustic emission. The dependences of the amplitudes of acoustic signals on time and on the rate of temperature change reveal a clear difference between samples with the «water accumulation» defect and samples without such defects.

PACS: 43.40.Le

Keywords: honeycomb structure, composite, mechanical stresses, defects in structures, temperature field, acoustic emission.

Received 09 June 2024.

Сведения об авторе

Асеев Евгений Михайлович — e-mail: aseevgenij@yandex.ru.