

## СОВЕЩАНИЯ И КОНФЕРЕНЦИИ

УДК 534.26.

НАУЧНАЯ СЕССИЯ ОБЪЕДИНЕННОГО НАУЧНОГО СОВЕТА  
АН СССР ПО КОМПЛЕКСНОЙ ПРОБЛЕМЕ «ФИЗИЧЕСКАЯ  
И ТЕХНИЧЕСКАЯ АКУСТИКА»

С 31 марта по 2 апреля 1981 г. в г. Суздале состоялась очередная сессия объединенного научного совета АН СССР по комплексной проблеме «Физическая и техническая акустика». На сессии были заслушаны доклады по проблемам акустической эмиссии и акустике жидких кристаллов. Ниже публикуются тексты некоторых докладов.

Баранов В. М., Елесин В. Ф., Лавейкин Л. И., Молодцов К. И., Набойченко К. В., Сарычев Г. А., Щавелин В. М. Методики и результаты акустикоэмиссионных исследований материалов новой техники. Развиваемые в МИФИ исследования акустической эмиссии (АЭ) направлены на изучение свойств и работоспособности материалов и изделий в условиях воздействия высокой температуры, агрессивных сред, ионизирующих излучений. Это требует высокой чувствительности и помехозащищенности АЭ-аппаратуры. В широком температурном интервале нами изучены характеристики АЭ-сигналов в металлических и керамических материалах при деформировании, мало- и многоциклового усталости, коррозии, трении. Разработаны алгоритмы оптимальной обработки АЭ-информации и приборы для соответствующих испытаний. Предварительные усилители на основе металлокерамических электронных ламп и полевых транзисторов обеспечили возможность регистрации АЭ-сигналов, поступающих через металлический звукопровод из зоны нагрева или облучения объекта исследования. Сбор и обработка информации проводятся с помощью автоматизированных устройств.

Созданы установки для АЭ-исследований высокотемпературной пластичности керамических материалов в режиме ползучести, активного деформирования, циклического нагружения. Установки работают при температуре до 1700—2000 К как в лабораторных условиях, так и при облучении образца в активной зоне ядерного реактора. Разработана установка для исследования акустических явлений при фрикционном взаимодействии твердых тел в условиях меняющихся нагрузок, взаимных скоростей, температуры испытаний.

В частности, установлены следующие новые закономерности проявления АЭ.

При высокотемпературных испытаниях керамических материалов наблюдаются характерные для металлов проявления АЭ — сходство кривых ползучести и суммарной АЭ, появление импульсов большой амплитуды при переходе к ускоренной стадии ползучести, резкое увеличение интенсивности АЭ при достижении текучести в процессе активного деформирования.

При разгрузке интенсивность АЭ резко увеличивается в момент начала обратной пластической деформации, что обеспечивает возможность точного дистанционного измерения внутренних напряжений в материале.

При ползучести керамических материалов наблюдаются максимумы интенсивности АЭ, время достижения которых подчиняется закону Аррениуса. Соответствующие энергии активации позволяют связать их с процессами диффузии и указывают на перспективность использования АЭ для изучения этих процессов. Число максимумов совпадает с количеством активно диффундирующих компонентов.

Коррозия металлов под напряжением также характеризуется максимумом на зависимости интенсивности АЭ от времени, который связывается с проявлением конкурирующих процессов образования защитной пленки и ее разрушения, сопровождающегося растворением металла. Максимум предшествует резкому возрастанию интенсивности АЭ при коррозионном растрескивании. Отмеченный характер проявления АЭ наблюдали, в частности, в процессе испытаний тонкостенных циркониевых труб при одновременном воздействии температуры (до 650 К), механических напряжений (до 120 МПа) и паров галогенов. Указанные особенности АЭ могут служить для прогнозирования коррозионного разрушения металлов.

При усталостных испытаниях керамики наблюдали максимумы интенсивности АЭ при числе циклов 0,2 ... 0,35 от разрушающего, что также может служить для качественной оценки прочности соответствующих материалов и конструкций.

Максимумы интенсивности АЭ несут информацию о развитии, затухании и смене механизмов деформирования и разрушения объектов. Эта информация может быть ценной для физики деформирования и разрушения и способствовать развитию методов оценки прочности материалов и конструкций.

Показана возможность использования АЭ-метода для неразрушающегося контроля керамических изделий посредством приложения нагрузок, существенно меньших допустимых. Результаты хорошо коррелируют с данными контроля ультразвуковым методом. При фрикционном взаимодействии материалов по возрастанию интенсив-

ности АЭ и сопровождающему его изменению амплитудного и частотного спектров: можно зарегистрировать момент разрушения смазочного слоя или антифрикционного покрытия.

Результаты подтверждают перспективность АЭ-метода и показывают, что необходимо дальнейшее развитие методик исследований, а также систематизация и интерпретация фактических данных.

Московский инженерно-физический институт

**Буденков Б. А., Гитис М. Б., Домб Б. И., Копанский А. Г., Соседов В. Н.** Аппаратура для контроля методом акустической эмиссии. Метод акустической эмиссии (АЭ) является перспективным направлением в неразрушающем контроле качества материалов и изделий. Современная аппаратура АЭ позволяет обнаружить развивающиеся дефекты как в процессе производства, так и при эксплуатации конструкций, определять координаты развивающихся дефектов и другие параметры, обработка которых позволяет судить об опасности дефектов, прогнозировать момент разрушения конструкций, оценивать прочностные характеристики новых материалов.

Исследование метода АЭ и разработка аппаратуры проводится во ВНИИНКе с 1972 г. Выпущены серийно приборы АФ-10 и АФ-11. Однако эти приборы одноканальные и не решают ряда задач контроля, таких как определение координат дефектов, пространственная избирательность и др. Было решено наряду с усовершенствованием одноканального прибора разработать многоканальные системы с ЭВМ для решения широкого круга задач.

Наиболее полно требования важнейших отраслей народного хозяйства к аппаратуре неразрушающегося контроля методом АЭ отражаются в атомной энергетике. Поэтому сейчас ВНИИНК по техническим заданиям ИАЭ им. И. В. Курчатова разрабатывает эмиссионную аппаратуру для атомных электростанций. Такая аппаратура позволит осуществлять контроль за возникновением и развитием дефектов в энергетике, судостроении, авиации, нефтяной и газовой промышленности, в химическом машиностроении и т. п. Разработка ведется в трех направлениях.

1. Создание универсального переносного прибора с перестраиваемым диапазоном частот в пределах от 20 до 2000 кГц с выводом параметров на самописец и цифропечатающее устройство. Применение набора сменных блоков позволит использовать прибор для решения широкого круга задач контроля методом АЭ.

2. Создание стационарной установки для контроля энергетических объектов с использованием ЭЦВМ (АФ-33) для обнаружения, локализации и регистрации источников АЭ как при непрерывном наблюдении за оборудованием первого контура и корпуса реактора атомной электростанции в процессе эксплуатации, так и при периодических проверочных испытаниях. Установка может также обеспечить контроль нагруженных крупномасштабных изделий и комплексов в энергетике, судостроении, авиации, химическом машиностроении и других отраслях промышленности.

Установка позволяет принимать и обрабатывать сигналы АЭ, поступающие по 32 каналам, преобразовывать информативные параметры сигналов АЭ в цифровую фигуру, производить проверку комбинаций сигналов АЭ на истинность с помощью аппаратных средств, вычисление координат дефектов, определение степени их опасности, определение амплитуды огибающей и числа превышений сигналами АЭ заданного уровня, определение разности времени прихода сигналов АЭ на преобразователь, номер группы каналов, условное текущее время.

3. Разработка комплекса аппаратуры акустической эмиссии АФ-32, смонтированного на микроавтобусе типа РАФ 2203. Этот комплекс позволяет принимать сигналы АЭ по 8 каналам, с обработкой информации на ЭВМ. В состав передвижного комплекса войдут также универсальный прибор для контроля методом акустической эмиссии, универсальный ультразвуковой дефектоскоп и прибор для измерения затухания и скорости ультразвука. Комплекс предназначен для получения исходных данных для разработки методик контроля и определения состава стационарных установок. Кроме того, он позволит вести испытания отдельных узлов в процессе монтажа крупных объектов.

Наиболее ответственной частью аппаратуры АЭ являются датчики. Требования к ним определяются как условиями распространения сигналов АЭ в объекте контроля, так и необходимостью акустического контакта с его деталями, имеющими температуру порядка 300°С и являющимися источниками интенсивных акустических помех.

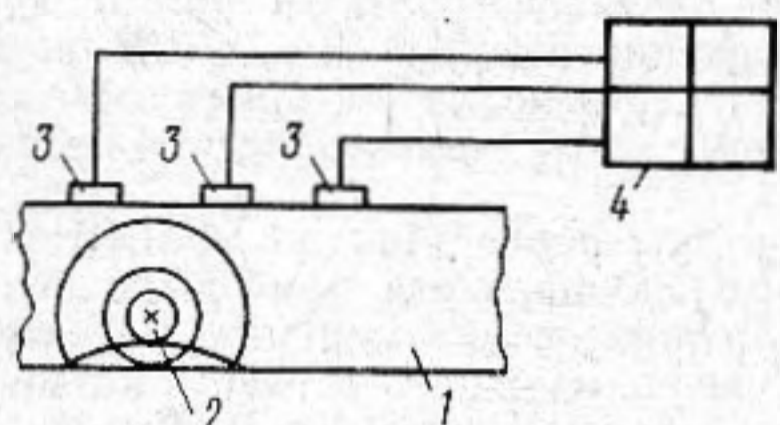
Узлы и агрегаты атомных электростанций представляют собой листовые материалы различной конфигурации. Нами исследованы условия распространения ультразвуковых колебаний в листах толщиной 1÷200 мм. Во всех случаях амплитуда принятого сигнала нормальной или поверхностной волны в 5÷10 раз превышала амплитуду продольной составляющей, чем было подтверждено преимущество приемников нормальных или поверхностных волн для приема сигналов АЭ в ограниченных средах.

Широкий температурный диапазон обеспечивается за счет применения специальных материалов, а помехозащищенность — за счет дифференциальной схемы включения пьезоэлементов преобразователей.

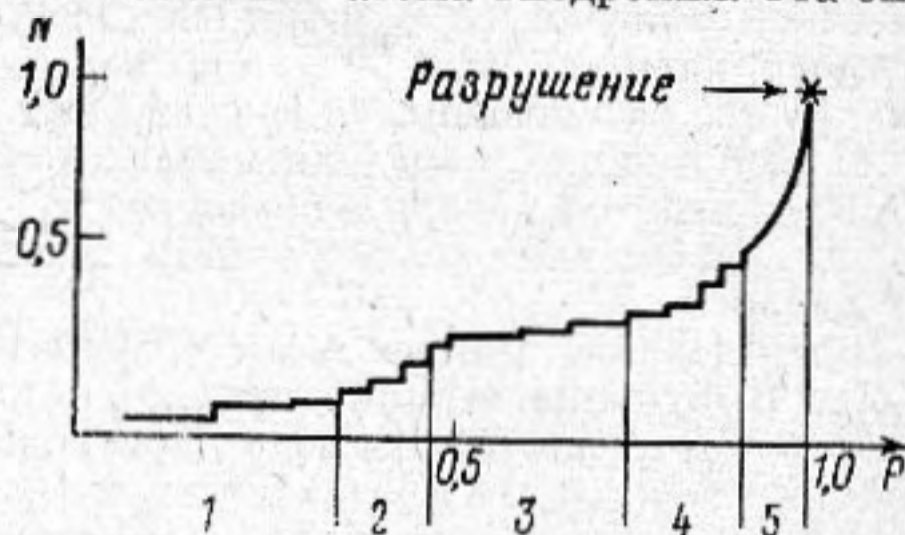
Всесоюзный научно-исследовательский институт  
по разработке неразрушающих методов и средств  
контроля качества материалов

**Иванов В. И.** Применение акустической эмиссии для исследования твердого тела и контроля объектов. Перестройка структуры твердого тела, развитие микро- и макродефектов сопровождаются излучением упругих колебаний. Явление «акустической эмиссии» (АЭ) используется для исследования динамических процессов в твердом теле, контроля объектов и технологических процессов [1—5].

Имеется конечная вероятность того, что атом кристаллической решетки в процессе тепловых колебаний оторвется от узла и окажется в промежутке между другими атомами. Образуются два микродефекта: вакансия и атом внедрения. Разрыв связей при перескоке атома носит импульсный характер и сопровождается излучением акустического возмущения. Решетка приобретает дополнительную энергию, связанную с искажениями структуры вблизи вакансии и атома внедрения. Эта энер-



Фиг. 1



Фиг. 2

Фиг. 1. Схема применения метода АЭ. 1 — контролируемый объект; 2 — источник АЭ; 3 — датчик; 4 — блоки усиления, обработки и регистрации

Фиг. 2. Характерная зависимость числа импульсов АЭ от нагрузки при развитии трещины.  $N$  — число импульсов АЭ;  $P$  — нагрузка

гия сконцентрирована в зоне неоднородности. Любой дефект можно представить как локальную или распределенную неоднородность поля напряжений.

Обратный процесс, когда атом внедрения и вакансия встречаются и аннигилируют, приводит к исчезновению искажения решетки, импульсному уменьшению внутренней энергии тела. Потенциальная энергия превращается в энергию излучения, равную сумме энергии вакансии и атома внедрения. По порядку величины она составляет для металлов  $2 \div 3 \cdot 10^{-19}$  Дж.

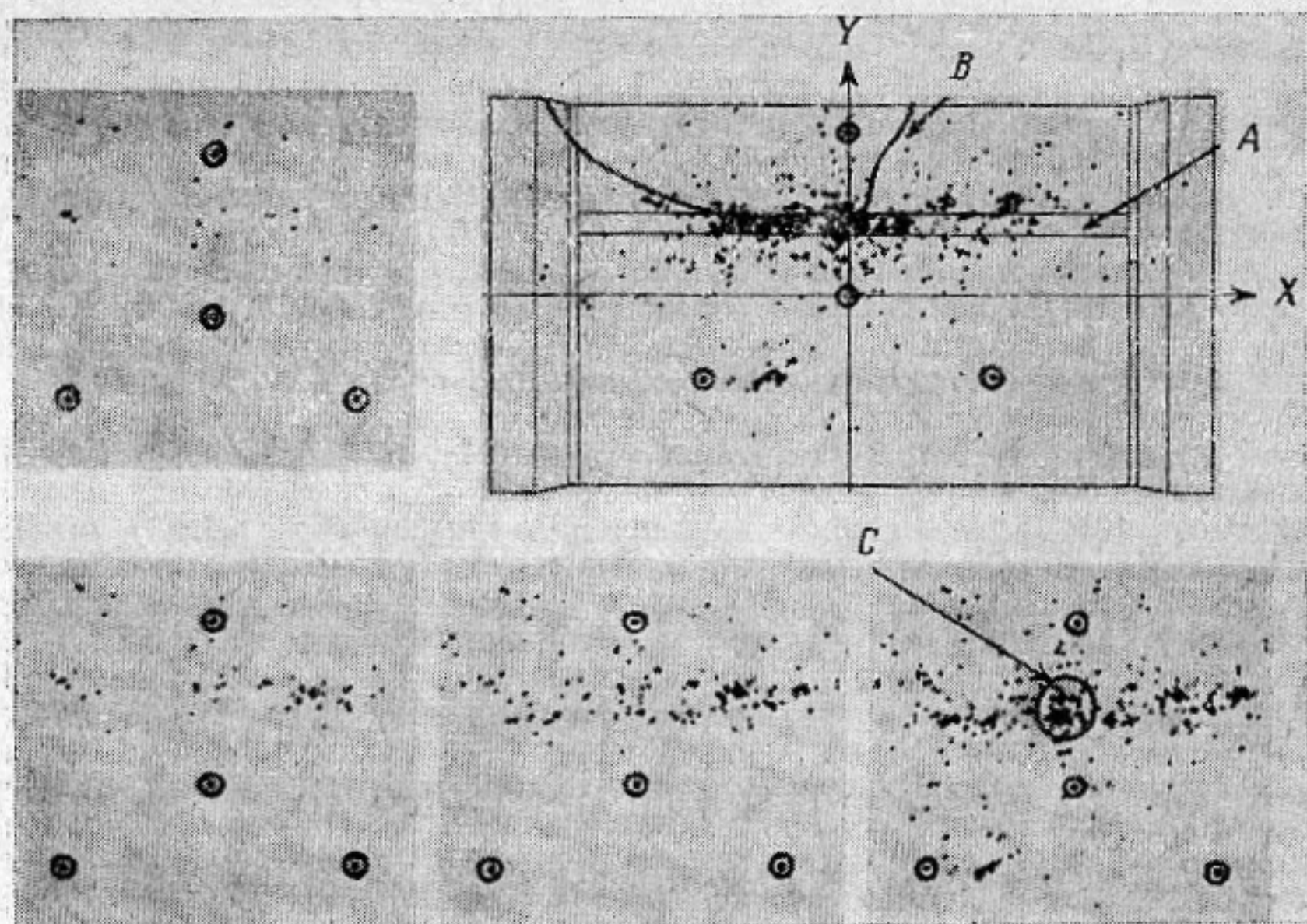
Энергия АЭ зависит от степени искажения кристаллической решетки и размеров упругого поля неоднородности. Так, при аннигиляции дислокаций длиной  $10^{-5}$  мм энергия импульса составит  $10^{-17}$  Дж, а при возникновении микротрещины микронных размеров —  $10^{-10} - 10^{-12}$  Дж.

Перемещение микро- и развитие макродефектов может быть выявлено, поскольку энергия импульсов АЭ превосходит уровень теплового шума. При наличии дефектов (вакансий, дислокаций и их сочетаний) параметры теплового шума должны отличаться от шума идеальной структуры. Белый тепловой шум приобретает «окраску». Относительно просто можно обнаружить процессы коллективных перемещений дислокаций или развитие трещин, когда перестройка структуры охватывает объемы  $10^{-18} - 10^{-15}$  м<sup>3</sup> и более. Для выявления перемещения отдельных микродефектов или их вклада в тепловой шум необходима постановка тонкого физического эксперимента.

В настоящее время АЭ используется для изучения возникновения и движения дислокаций и их скоплений [1, 6, 7], фазовых превращений в металлах и сплавах [1, 2, 5], пластической деформации [1, 2] и других динамических процессов. АЭ позволит проследивать жизнь микродефектов не по следам (как в металлографических исследованиях с применением микроскопа), а непосредственно в процессе их движения. Перспективно применение АЭ для неразрушающего контроля объектов и технологических процессов (сварка, механическая обработка и др.) [1, 2, 5]. Мощное излучение, сопровождающее скачки трещин, используется для слежения за развитием этих наиболее опасных дефектов конструкций. Единичные сигналы АЭ дают информацию об изменении локальных условий напряженно-деформированного состояния и скачках трещин. Полный сигнал АЭ, представляющий собой импульсный стохастический процесс, отображает развитие поврежденности материала. Регистрация и анализ АЭ позволят прогнозировать поведение конструкции и предсказать момент отказа (разрушения).

Схема использования АЭ для неразрушающего контроля приведена на фиг. 1. Контроль можно проводить по различным параметрам сигнала АЭ. Применяется, как правило, суммарное число импульсов АЭ. Если считать, что каждый импульс соответствует единичному акту локального разрушения, то их общее число покажет суммарную площадь разрушения. На фиг. 2 приведена характерная зависимость суммы импульсов АЭ при развитии трещины.

Можно отметить пять характерных участков. На участке 1 нагрузка мала и трещина не развивается, источник АЭ не активен. На участке 2 началось активное развитие трещины, однако она еще не опасна. Такой источник АЭ считается активным. При дальнейшем росте нагрузки и размера трещины произошло перераспределение напряжений в объекте и трещина замедлила свой рост (участок 3). Далее трещина



Фиг. 3. Рост числа источников АЭ при увеличении давления в процессе испытания сосуда давления. 1 —  $P=180$  кг/см<sup>2</sup>, 2 —  $P=200$ , 3 —  $P=235$ , 4 —  $P=340$  кг/см<sup>2</sup>, А — сварной шов, В — линия разрушения, С — зона начала разрушения

вновь стала расти, источник АЭ стал критически активен. И, наконец, на участке 5 зависимость приобретает вид  $N=aP^m$ , где  $P$  — нагрузка,  $a$  и  $m$  — постоянные, причем  $m \geq 4$ . Источник АЭ считается катастрофически активным, поскольку трещина в данном случае достигла критических размеров и разрушение неминуемо.

На фиг. 2 можно выделить две принципиальные зоны: первая — участки 1—4, вторая — участок 5. Для первой характерно то, что приращение числа импульсов АЭ меняется, но при сохранении режима нагружения стабильного роста их числа не наблюдается. На участке 5 характерно стабильное увеличение числа импульсов АЭ при сохранении режима нагружения. При этом непрерывно наступает разрушение объекта, а отмеченное увеличение  $N$  связано с ускоренным ростом трещины.

На фиг. 3 приведен последовательный ряд изображений на экране дисплея акустико-эмиссионной системы при контроле сосуда давления. Сосуд  $\varnothing=850$ , толщиной стенки 40 и высотой 1600 мм нагружали внутренним давлением до разрушения, произошедшего при 400 кг/см<sup>2</sup>.

На контролируемой зоне расположены четыре датчика АЭ, помещенные в вершины равностороннего треугольника и в центре его. Видны положения источников сигналов АЭ в виде точек. Регистрируя картину акустической активности, можно оценить развитие повреждений и зону наибольшей опасности. Эксперименты в ЦНИИТМаш показали, что разрушение начинается только в зонах наиболее активных. На фиг. 3 эта сформировалась при давлении 300÷340 кг/см<sup>2</sup> (обведена кружком). Источником разрушения в данном случае послужил небольшой дефект в виде несплавления в продольном сварном шве сосуда.

Возможности метода АЭ требуют его скорейшего внедрения в промышленность и практику научных исследований. Необходима концентрация усилий специалистов по физике твердого тела, акустике, механике разрушения, неразрушающему контролю.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Drouillard T. F. Acoustic Emission. A Bibliography with Abstracts. III Plenum. N. Y., 1979. 787 p.
2. Грейников В. А., Дробот Ю. Б. Акустическая эмиссия. М.: Изд-во стандартов, 1976. 272 с.
3. Баранов В. М., Молодцов К. И. Акустико-эмиссионные приборы ядерной энергетики. М.: Атомиздат, 1980. 143 с.
4. Акустическая эмиссия и ее применение для неразрушающего контроля в атомной энергетике / Под ред. Ванера К. Б. М.: Атомиздат, 1980. 216 с.
5. Иванов В. И., Белов В. М. Акустико-эмиссионный контроль сварки и сварных соединений. М.: Машиностроение, 1981. 184 с.
6. Acoustic Emission. ASTM STP SOS. Philadelphia, 1972. 289 p.
7. Бойко В. С., Нацук В. Д. В кн.: Элементарные процессы пластической деформации кристаллов. Киев: Наукова думка, 1978. 159 с.

**Капустина О. А.** Акустооптические свойства жидких кристаллов и их применение. Факт влияния механического воздействия на оптические свойства жидких кристаллов известен со времени классической работы О. Лемана (1910 г.) [1]. В настоящее время работы в этой области ведутся в научных центрах Франции, ФРГ, Италии, Японии, США и ряде стран СЭВ с различными видами мезофаз в широком диапазоне частот.

При систематизации данных, относящихся к воздействию ультразвуковых колебаний на жидкие кристаллы, прослеживаются три группы работ. К первой и наиболее обширной группе относятся исследования, где рассматривается оптическая задача поведения ориентированного жидкокристаллического образца в акустическом поле. Эти исследования выполнены с различными типами мезофаз и граничных условий в широком диапазоне частот. Установлено, что наблюдаемые изменения могут быть обусловлены: 1) изменением угла наклона молекул [2—5]; 2) деформацией макроскопических слоев [6]; 3) изменением направления оси спирали [7]; 4) изменением шага спирали [8]. Большинство имеющихся в настоящее время данных относится к нематической фазе, и свойства, характерные для нее, в той или иной степени проявляются у смектических фаз, а также у холестерических кристаллов с большим (но конечным) шагом спирали (единицы и десятки микрон). Так, в опытах с нематической фазой показано, что существует три вида деформации структуры слоя: однородная; пространственно-периодическая и неоднородная. Реализация того или иного типа деформации зависит от силы ультразвука и взаимной ориентации волнового вектора  $k$  и «директора»  $n$ , характеризующего направление преимущественной ориентации молекул. Хотя некоторые деформации можно реализовать также у холестерических и смектических жидких кристаллов, существует принципиальное различие поведения мезофаз по сравнению с нематической. Оно проявляется в том, что в стадии неоднородной деформации по окончании озвучивания в холестерической и смектической А фазах устанавливается некое метастабильное состояние со значительным остаточным рассеянием (50 и 90% от значения, наблюдаемого при воздействии ультразвука в указанных фазах соответственно) [7]. Обратный спонтанный переход к исходной прозрачной для света текстуре требует сотен часов. Нематическая фаза подобным эффектом «акустической памяти» не обладает. Недавно обнаружена еще одна возможность реализации необратимой деформации. Оказалось, что искажения, вызванные в слое мезофазы вблизи перехода нематик — смектик А механическим воздействием, прочно удерживаются в ходе перехода в другие смектические модификации и сохраняются в твердом состоянии [9]. В холестерических кристаллах с шагом спирали порядка тысяч ангстрем в акустическом поле проявляется эффект изменения спектра отражения в области селективного рассеяния света, обусловленный деформацией шага спирали. У некоторых холестерических кристаллов это рассеяние имеет место в области длин волн видимого диапазона, так что изменение цвета образца легко наблюдать визуально.

Вторая группа работ посвящена непосредственно исследованию эффекта взаимодействия поля с веществом. В качестве возможных причин, вызывающих появление соответствующего дестабилизирующего момента, указывают радиационное давление, различного вида акустические потоки, акустическую анизотропию среды, вязкоупругие эффекты, параметрический резонанс. Подробному анализу этой группы работ посвящен доклад Е. Н. Кожевникова, тезисы которого опубликованы в этом же номере журнала.

К третьей группе относятся исследования прикладного характера по использованию жидких кристаллов для визуализации полей излучателей ультразвука [10,11], контроля технологических колебательных систем [12], при неразрушающем контроле изделий [13] и для медицинской диагностики.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Lehman O. Kristallisationsmikroskop und die damit gemachten Entdeckungen insbesondere die flüssigen Kristalle. Braunschweig. 1910.
2. Золина В. В. Упругие колебания анизотропной жидкости. — Тр. Ломоносовского ин-та АН СССР, 1936, № 8, с. 11—17.
3. Mailer H., Likins K. L., Taylor T. R., Ferguson J. L. Effect of Ultrasound on a Nematic Liquid Crystals. — Appl. Phys. Lett., 1971, v. 18, № 4, p. 105—107.
4. Капустин А. П., Дмитриев Л. М. Влияние ультразвука на доменную структуру жидких кристаллов. — Кристаллография, 1962, т. 7, № 2, с. 332—334.
5. Kessler L. W., Sawyer S. P. Ultrasonic Stimulation of Optical Scattering in Nematic Liquid Crystals. — Appl. Phys. Lett., 1970, v. 17, № 10, p. 440.
6. Ribotta R., Durand G. Mechanical Instability of Smectic Liquid Crystals under Dilative or Compressive Stresses. — J. Physique, 1977, v. 38, № 2, p. 179—204.
7. Капустина О. А., Лупанов В. Н., Чулая Г. С. Эффект акустической памяти в жидких кристаллах. — Акуст. ж., 1978, т. 24, № 1, с. 136—137.
8. Janossy I. Preliminary Experiment on the Shear Flow of Cholesterics. — Ann. Phys., 1978, v. 2, p. 345—346.
9. Капустин А. П., Пикин С. А. Эффекты памяти в тонких слоях мезофазы при фазовых переходах. — Письма в ЖЭТФ, 1981, т. 33, № 6, с. 332—336.
10. Kapusztina O. A., Lupanov W. N. Acusto-optische Eigenschaften von Nematischen Kristallen und Ihre Anwendung. Wiss.—Z. Univ. Halle. Halle, 1977, v. 25, № 5, p. 49—58.

11. Nagai S., Iizuka K. Ultrasonic Imaging utilising a Nematic Liquid Crystals.— Mol. Cryst. Liquid Crystal, 1978, № 45, p. 83–101.
12. Kagawa Y., Hatakeyama T., Tanaka Y. Detection and Visualisation of Ultrasonic Fields and Vibration, 1974, v. 36, № 3, p. 407–415.
13. Nagai S., Peters A., Candau S. Acousto-optical Effects in a Nematic Liquid Crystals— Revue de Physique Appliquée, 1977, v. 12, p. 21–30.

Акустический институт  
им. Н. Н. Андреева  
Академии наук СССР

**Капустин А. П.** Звук и жидкие кристаллы. Жидкие кристаллы (ЖК), в которых континуальные свойства сочетаются с наличием внутренней структуры, можно рассматривать в двух аспектах — как носители уникальных физических свойств и как материалы, являющиеся потенциальными естественными источниками, приемниками и преобразователями. Исследования воздействия акустических колебаний на ЖК показали, что при малых амплитудах звук выступает в качестве агента, несущего информацию об их структуре и свойствах, характере межмолекулярного взаимодействия и др. Напротив, при больших амплитудах он способен создавать в этих веществах структуры с новыми свойствами.

Хотя ЖК соединяют в себе свойства изотропной жидкости и твердого тела, но большинство наблюдаемых в них явлений не имеют аналогов ни в жидкости, ни в твердом теле. Они в несколько сот раз «мягче» твердых кристаллов, могут иметь деформацию поперечного и продольного изгибов, обладают акустической активностью, акустооптическими и пьезоэлектрическими свойствами, проявляют дифференцированную реакцию на механическую деформацию и температуру. Нематические кристаллы передают момент кручения и рассеивают свет в  $10^6$  раз сильнее обычных жидкостей. Пороговая чувствительность ЖК, являющихся регистрирующей средой в системах визуализации акустических изображений, может быть доведена до  $10^{-6}$  Вт/см<sup>2</sup>.

Все структурно-чувствительные свойства ЖК легко изменяются под действием разнообразных внешних факторов. Для фундаментальной и прикладной науки интересны особенности поведения этих веществ вблизи температуры фазовых превращений. В этой области они особенно рыхлы и лабильны, а их упруговязкие свойства нелинейны и проявляют аномалии в поведении. Можно предсказать, что в ближайшем будущем практическое применение ЖК будет связано главным образом с использованием особенностей их поведения в окрестности фазовых переходов.

Исследования в области акустики ЖК проводятся в диапазоне частот от инфразвуковых до гиперзвуковых. В молекулярной акустике большое число работ выполнено в мегагерцевом диапазоне. Широко используются продольные, сдвиговые и поверхностные волны. Наименее изучено акустическое поведение ЖК в герцевом, килогерцевом, гигагерцевом диапазонах. Особенно интересными были бы наблюдения, выполненные на частотах в диапазоне до  $10^4$  МГц, где звуковая волна может взаимодействовать с разнообразными элементарными возбуждениями; по результатам измерения интенсивности можно было бы судить об упругих модулях ЖК, а по данным о спектральном распределении — о его коэффициентах вязкости.

Наиболее исследована нематическая фаза, молекулы которой легко ориентируются в магнитном поле. В гидродинамическом режиме она обладает изотропной сжимаемостью, так что анизотропия скорости звука не наблюдается; анизотропия одноосной сжимаемости обнаружена лишь на высоких частотах. Холестерические кристаллы, обладающие высокой вязкостью и малой магнитной анизотропией, с трудом ориентируются в магнитном поле. Представляет интерес исследование поведения этого типа мезофазы для разных гидродинамических режимов при различном соотношении шага спирали  $P_0$  и длины волны звука  $\lambda$ .

Теоретические исследования показали, что в смектической А фазе анизотропия одноосной сжимаемости приводит к появлению двух бегущих волн — продольной и сдвиговой, хотя сдвиговая упругость и обращается в нуль. Значительное затухание не позволяет провести измерения этой величины. Особый интерес представляет возможность провести измерения коэффициента  $C_{44}$ , используя сдвиговые волны. Пока этого сделать не удалось.

Смектическая фаза В с трудом ориентируется в магнитном поле, и пока систематических исследований в этом направлении не ведется; анизотропия скорости продольных волн в смектике В выше, чем в смектике А.

Смектическая фаза С относится к двуосным структурам. При повороте магнитного поля затухание звука изменяется, тогда как скорость сохраняет постоянное значение. Это связано с тем, что структура слоев вслед за полем не сдвигается. Анизотропия затухания в этой фазе также двухосна и определяется как ориентацией слоев, так и ориентацией молекул, поскольку происходит переориентация молекул в слоях, изменяется и затухание.

В настоящее время мало исследованы лиотропные системы и жидкокристаллические полимеры. Большой интерес представляет исследование распространения звука в поле высоких энергий, которое сопровождается нелинейными эффектами. В частности, волны большой амплитуды вызывают акустические потоки, которые порождают ряд биологических и химических явлений.

Интересны предложения в области акустической кристаллографии: передача,

запись и хранение информации на нематических, холестерических, смектических кристаллах и их смесях. Перспективны также исследования по использованию смектической фазы для целей модуляции света в акустически управляемых системах.

Институт кристаллографии  
Академии наук СССР

**Кожевников Е. Н.** Влияние ультразвука на ориентацию нематического жидкого кристалла. При воздействии ультразвука на слой нематического жидкого кристалла (НЖК) ориентация молекул может меняться, это приводит к изменению оптических свойств, в частности к просветлению слоя. Различные механизмы поворота молекул в звуковом поле рассматривались ранее в работах [1—5].

Дион [1] предположил, что за поворот молекул ЖК ответственные моменты, обусловленные анизотропией поглощения  $\delta_\alpha$ : молекулы стремятся развернуться так, чтобы уменьшить потери в звуковой волне. Теоретически этот эффект возможен, однако в реальном случае для интенсивности звука  $I$ , толщины слоя  $h$  соответствующий угол поворота молекул, который можно оценить выражением

$$\varphi \sim (\delta_\alpha h^3 / c K_3) I,$$

( $c$  — скорость звука,  $K_3$  — упругая постоянная Франка) на 2—3 порядка меньше наблюдаемого экспериментально. Мияно и Шен [2] рассмотрели потоки в жидком слое при распространении поверхностной волны по подложке слоя, за возникновение потоков ответственны средние по времени, квадратичные по скорости колебаний силы, сосредоточенные в пограничном слое вблизи подложки; численные оценки угла поворота молекул в потоках согласуются с данными эксперимента. Нагаи [3] считает, что при нормальном падении на НЖК-слой ультразвукового пучка поворот молекул обусловлен радиационными потоками; в действительности радиационные потоки возникают лишь вблизи концов пучка, при этом скорость течения жидкости и угол поворота молекул примерно на три порядка меньше наблюдаемых в эксперименте. Радиационные силы оказываются существенными при фокусировке ультразвукового пучка, падающего под углом на НЖК-слой [4], в этом случае предсказываемая теоретически картина потоков, замыкающихся вне сфокусированного пучка, соответствует наблюдаемой в эксперименте.

Автором данного сообщения рассмотрено изменение ориентации НЖК-слоя при нормальном падении на слой ультразвукового пучка ограниченной ширины. При отражении ультразвука от границ НЖК-слоя в нем устанавливается стоячая волна сжатия, градиенты сжатия вблизи краев пучка создают продольные волны, распространяющиеся от краев вдоль слоя и слабо затухающие вследствие вязких напряжений на границах слоя. Средние по времени силы, пропорциональные произведению колебательных скоростей в продольной волне и волне сжатия, сосредоточенные вблизи подвижной границы слоя, вызывают стационарные потоки жидкости, градиенты скорости которых приводят к повороту молекул кристалла. При первоначальной нормальной ориентации молекул угол поворота  $\varphi_2$  определяется формулой

$$\varphi_2 \approx \frac{\rho v^2 k h^2 \sqrt{2}}{q K_3} \left[ \left( \frac{z}{h} \right)^3 + \frac{1}{2} \left( \frac{z}{h} \right)^2 - \frac{1}{4} \frac{z}{h} - \frac{1}{8} \right] F(x),$$

где функция  $F(x)$  ( $\max F(x) \approx 2$ ) описывает распределение эффекта вдоль слоя,  $k = \omega/c$ ,  $\omega$  — частота ультразвука,  $q$  — волновое число в вязкой волне,  $v$  — амплитуда скорости в падающей звуковой волне. Изменение ориентации кристалла должно наблюдаться оптически в виде системы чередующихся светлых и темных полос; на частоте  $\omega \sim 10^7$  с<sup>-1</sup> при  $h = 10^{-4}$  м можно регистрировать амплитуды звуковой скорости  $v \sim 10^{-2} - 10^{-3}$  м·с<sup>-1</sup>.

При падении на слой ультразвукового пучка с круговым сечением радиуса  $R$  продольные волны фокусируются в центре, в этом случае эффект должен быть максимальным в центральной части пучка при  $r \sim 1/k$ , угол поворота молекул  $\varphi_2$  в этой области больше указанного выше угла  $\varphi_2$  в  $kR \gg 1$  раз.

Аналогичный механизм поворота молекул предложен Шрипайпаном [5] для НЖК-слоя со свободными концами: в этом случае продольные колебания жидкости в слое обусловлены движением свободных концов при сжатии слоя в звуковой волне. Соответствующая теория эффекта, построенная автором данного сообщения, удовлетворительно согласуется с данными эксперимента.

#### ЛИТЕРАТУРА

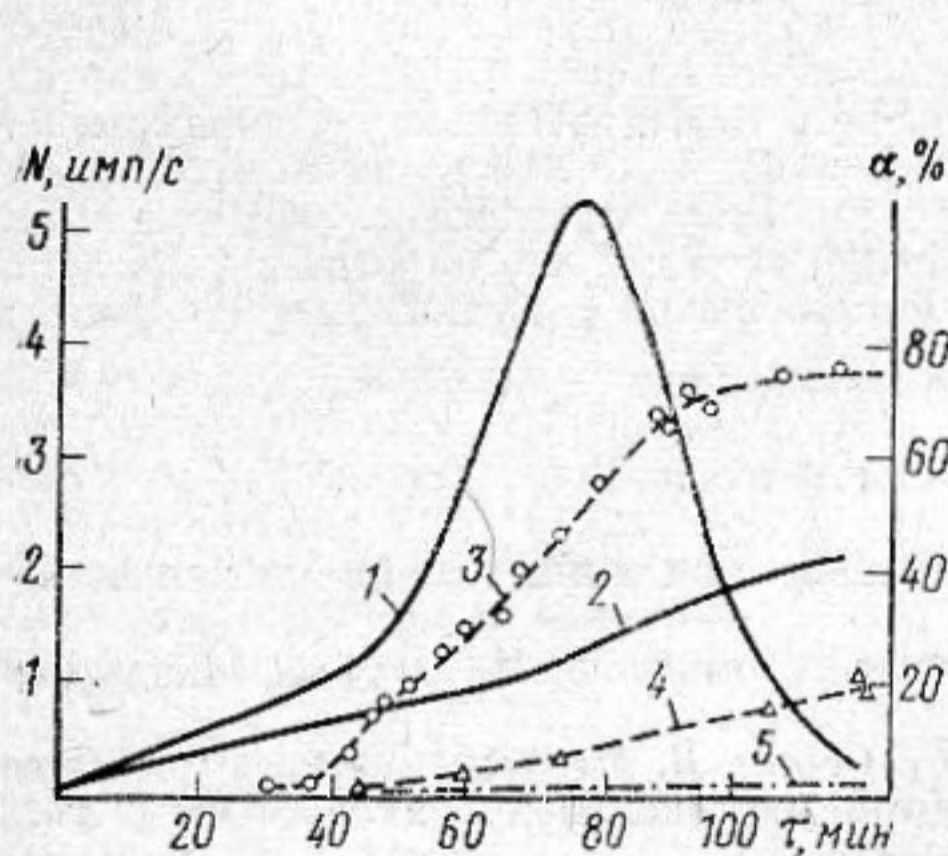
1. Dion J. L., Jacob A. D. A new hypothesis on ultrasonic interaction with a nematic liquid crystal.— Appl. Phys. Lett., 1977, v. 31, № 8, p. 490—493.
2. Miyano K., Shen J. R. Excitation of stripe domain patterns by propagating acoustic waves in an oriented nematic film.— Phys. Rev., 1977, v. A15, № 6, p. 2471—2486.
3. Nagai S., Peters A., Candau S. Acousto-Optical Effect in a Nematic Liquid Crystal.— Rev. Phys. Appl., 1977, v. 12, p. 21—30.

4. Candau S., Ferre A., Peters A., Waton G., Pieranski P. Acoustical Streaming in a Film of Nematic Liquid Crystal.— Mol. Cryst. Liq. Cryst., 1980, v. 61, p. 7–30.  
 5. Sripaipan C., Hayes C. F., Fang G. T. Ultrasonically — induced optical effect in a nematic liquid crystal.— Phys. Rev., 1977, v. A15, № 3, p. 1297–1303.

Куйбышевский государственный университет

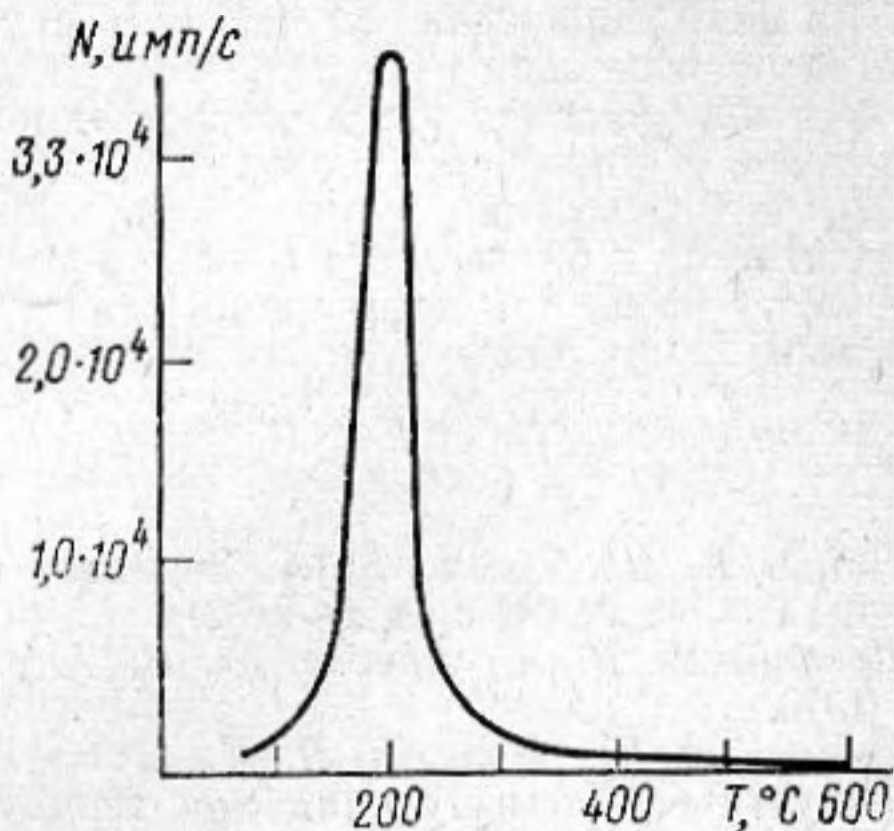
Кулемин А. В., Фомин В. В., Урусов В. С. Акустическая эмиссия при фазовых превращениях в сталях. Метод акустической эмиссии (АЭ) находит применение для изучения процессов, протекающих в металлах и в сплавах в твердом состоянии: при пластической деформации [1, 2], при образовании трещин [2] и др. Известен ряд работ, посвященных экспериментальному исследованию АЭ, возникающей при фазовых превращениях, в частности при мартенситной реакции [3, 4].

АЭ при мартенситном превращении обусловлена возникновением значительных упругих деформаций и напряжений при образовании кристаллов новой фазы [4]. При другом типе фазовых превращений аустенита — бейнитом, по современным представлениям, в сочетании с диффузионным процессом перераспределения углерода



Фиг. 1

Фиг. 1. Зависимость интенсивности акустической эмиссии при бейнитном (1, 2) и перлитном (5) превращениях в стали (0,45% С; 2,0% Сг; 4,0% Ni; 0,3% Мо), 3, 4 — магнитометрические кривые при бейнитном превращении. 1, 3 —  $T=295^\circ\text{C}$ , 2, 4 —  $T=600^\circ\text{C}$



Фиг. 2

Фиг. 2. Зависимость интенсивности импульсов акустической эмиссии при быстром охлаждении при мартенситном превращении в стали (0,45% С; 2,0% Сг; 4,0% Ni; 0,3% Мо)

происходит также и кооперативный  $\gamma \rightarrow \alpha$  переход [5]. Можно полагать, что и в процессе бейнитного превращения возникает АЭ. Однако скорость роста кристаллов  $\alpha$ -фазы бейнита значительно меньше, чем кристаллов мартенсита. Поэтому интенсивность АЭ при бейнитном превращении должна быть значительно меньше, а время образования отдельных кристаллов больше, чем при мартенситном превращении. Третий тип фазовых превращений аустенита — перлитное обусловлен диффузией атомов замещения и внедрения и можно полагать, что в этом случае АЭ будет отсутствовать. Исследования АЭ при бейнитном превращении и перлитном нам неизвестны.

В настоящей работе исследовалась АЭ при различных фазовых превращениях в сталях при относительно низких около  $-100^\circ\text{C}$  и высоких температурах до  $600^\circ\text{C}$ . Изучались стали составов (1,0% С; 5,0% Сг) (температура мартенситного превращения  $-120^\circ\text{C}$ ) и (0,45% С; 2,0% Сг; 4,0% Ni; 0,3% Мо) (температура мартенситного превращения  $+200^\circ\text{C}$ , температурный интервал бейнитного превращения  $250\div 350^\circ\text{C}$ , перлитного  $550\div 650^\circ\text{C}$ ). Результаты исследования АЭ при фазовых превращениях сопоставлялись с магнитометрическими измерениями кинетики превращения.

Для исследования мартенситных превращений при низких температурах была разработана система, включающая приемник АЭ, регистратор импульсов АЭ, двухкоординатный самописец и запоминающий осциллограф. Для получения большей чувствительности приемной системы был выбран приемник с ярко выраженным резонансом в области частоты 250 кГц. Полоса пропускания прибора АРЦ-01, использовавшегося для подсчета количества импульсов, составляла  $100\div 500$  кГц. Уровень шумов предварительного усилителя составлял 20 мкВ. Образец в виде пластины диаметром 7 и толщиной 1 мм прикрепляли через слой контактной жидкости к приемной пьезопластине.

Было показано, что при медленном охлаждении в стали (1,0% С; 5,0% Сг), начиная с  $T=-120^\circ\text{C}$  (температура начала мартенситного превращения, определенная

нами магнитометрическим методом), происходит интенсивная АЭ. При охлаждении до температуры жидкого азота ( $-196^{\circ}\text{C}$ ) сигналы исчезали.

Время образования отдельного мартенситного кристалла определялось по переднему фронту импульса АЭ и составляло  $0,1 \div 0,4$  мкс.

Была разработана методика, позволяющая регистрировать АЭ при высокой температуре. Поскольку температура аустенитизации образца из стали (0,45% С; 2,0% Cr; 0,4% Ni; 0,3% Mo) достигает  $900^{\circ}\text{C}$ , необходимо было отделить образец и приемник акустическим волноводом из материала, в котором отсутствуют фазовые превращения. Таким образом, система приема и обработки содержала никелевый волновод, пьезоприемник, АРЦ-01 и самописец. После аустенитизации в течение 12 мин при  $900^{\circ}\text{C}$  образец с волноводом погружали в оловянную ванну и выдерживали различное время при температурах фазовых превращений в стали (0,45% С; 2,0% Cr; 4,0% Ni; 0,3% Mo). Зависимость интенсивности АЭ от времени выдержки при бейнитном превращении показаны на фиг. 1 (кривые 1 и 2). На этой же фигуре приведены кривые (3 и 4) бейнитного превращения, полученные магнитометрическим методом. Видно, что начало бейнитного превращения совпадает с началом возникновения АЭ, т. е. экспериментально доказано наличие излучения при бейнитном превращении.

Исследовалась АЭ при температуре  $600^{\circ}\text{C}$ , при которой в стали (0,45% С; 2,0% Cr; 4,0% Ni; 0,3% Mo) происходит перлитное превращение. АЭ при этом полностью отсутствует (фиг. 1, кривая 5).

На фиг. 2 приведена зависимость интенсивности АЭ от температуры при мартенситном превращении в исследуемой стали. Как видно из фиг. 2, после точки мартенситного превращения резко возрастает интенсивность излучения, на несколько порядков выше, чем при бейнитном. Сравнивая интенсивность АЭ при различных типах фазовых превращений: чисто деформационного (мартенситного), диффузионного (перлитного) и смешанного (бейнитного), можно полагать, что акустическое излучение имеет место при деформации сдвига кристаллической решетки исходной фазы и отсутствует при диффузионных процессах.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Нацик В. Д., Чишко К. А. Звуковое излучение при аннигиляции дислокаций.— ФТТ, 1972, № 14, с. 3126–3132.
2. Грешников В. А., Дробот Ю. Б. Акустическая эмиссия. М.: Изд-во стандартов, 1976.
3. Иевлев И. Ю., Мелехин В. П., Мицу Р. И., Сегаль В. М. Особенности параметров акустического излучения при термоупругой мартенситной реакции.— ФТТ, 1973, № 15, с. 2647–2650.
4. Кулежин А. В., Соловьев В. А., Замбружицкий В. Н., Жиряков В. В. Исследование атермического мартенситного превращения методом акустической эмиссии.— ФММ, 1979, № 48, 1, с. 135–140.
5. Курдюмов Г. В., Утевский Л. М., Энтин Р. И. Превращения в железе и стали. М.: Наука, 1977.

Центральный научно-исследовательский институт черной металлургии им. И. И. Бардина

**Пикин С. А.** Ориентационная неустойчивость жидких кристаллов в акустических полях. Воздействие высокочастотного звука ( $\sim 1$  МГц) на жидкие кристаллы (ЖК) нематического и холестерического типа связано главным образом с возникновением акустических потоков, являющихся следствием нелинейных эффектов. Потоки характеризуются практически стационарными распределениями скорости в слое ЖК. Расчет и экспериментальное определение скорости течения представляют немалые трудности. Акустические потоки имеют разнообразные конфигурации, зависящие от конструкции ячейки и направления распространения звуковых волн. Однако во всех случаях можно выделить участки слоя с характерными размерами и градиентами постоянной скорости течения, не зависящими от ориентации ЖК. На таких участках ориентация молекул (например, первоначально однородная) подвергается возмущениям вследствие возникновения потоков.

Ориентационные возмущения могут иметь различный характер в зависимости от направления скорости, градиента скорости и исходной ориентации. В частности, эти возмущения могут быть пороговыми и беспороговыми, модулированными и немодулированными. В настоящее время описаны конкретные случаи куэттовского и пуазейлевского потоков, которые вызывают пороговое и беспороговое немодулированные возмущения ориентации молекул. Модулированные возмущения всегда имеют пороговый характер. Оптические наблюдения указывают на существование всех перечисленных ситуаций, причем часто наблюдаются беспороговые немодулированные возмущения. Модуляции появляются, как правило, на фоне однородных возмущений, увеличиваясь с ростом скорости потока и порождая при этом новые моды неустойчивости. При определенном пороге скорости потока наступает ориентационная турбулизация слоя ЖК, что соответствует наблюдаемому динамическому рассеянию света.

Имеется принципиальная возможность изучения физической природы наблюдаемых явлений путем выявления акустических потоков, не связанных с анизотроп-

ными свойствами жидкости, экспериментального определения зависимости ориентационных возмущений и их пороговых характеристик от амплитуды и частоты звуковых колебаний, толщины слоя ЖК и сравнения этих данных с теоретическими моделями. Представляет интерес изучение зависимости масштабов и времен релаксации развитого пульсационного движения от параметров звуковой волны и ячейки ЖК, что определяет возможности приложений акустооптических эффектов.

При сравнительно низких частотах ( $\sim 10$  кГц) ориентация ЖК может искажаться благодаря эффектам первого порядка, например при периодических сдвигах и сближении ограничивающих пластин. В этом случае наряду с акустооптическими эффектами могут наблюдаться специфические пьезоэлектрические явления, присущие ЖК.

Институт кристаллографии  
им. А. В. Шубникова  
Академии наук СССР

Скалкин О. А., Чувывров А. Н. Пьезоэлектрический эффект в жидких кристаллах. Первые неудачные попытки обнаружения пьезоэлектрических свойств жидких кристаллов принадлежат Фредериксу и Репьевой, и лишь в последнее время появилось ряд сообщений об обнаружении прямого пьезоэффекта: появление заряда при механической деформации жидких кристаллов (ЖК). Такие эксперименты наиболее достоверны для сегнетоэлектрических смектических ЖК. Авторы предприняли попытки экспериментального исследования пьезоэлектрического эффекта в ряде нематических ЖК при сдвиговой деформации и изгибе слоя жидкого кристалла. Обнаружено, что в нематических ЖК пьезоэлектрические коэффициенты  $e_{in}$  составляют  $10^{-5}$ — $10^{-4}$  ед. CGSE, а реально наблюдаемые разности потенциалов при скорости сдвига  $v = 1$  см/с составляют  $10^{-2}$  В (двухкольчатые эфиры). С ростом температуры в окрестности фазового перехода значение пьезокоэффициентов максимальное, а в изотропной фазе уменьшается до нуля в интервале  $10^\circ$ — $15^\circ$  С.

Отделение физики и математики  
Башкирского филиала Академии  
наук СССР