

## **Исследование разрушения стекол, ситаллов и их наносоединений с использованием метода акустической эмиссии**

**В. А. Стрижало, Ю. В. Добровольский, М. П. Земцов, В. П. Маслов, Ю. М. Родичев, В. Е. Бодунов**

Институт проблем прочности им. Г. С. Писаренко НАН Украины, Киев, Украина

*Для оптических систем, работающих при больших перепадах температуры окружающей среды, используются материалы с особыми свойствами, например с неизменными геометрическими характеристиками, такие, как стеклокерамика типа Zerodur с нулевым коэффициентом термического расширения. Необходимыми элементами систем являются прецизионные прочные соединения деталей. Процессы разрушения в нагружаемых материалах изучаются с помощью метода акустической эмиссии, позволяющего регистрировать момент зарождения трещины и исследовать ее развитие в хрупком материале в процессе нагружения. Показана перспективность оценки прочности оптических хрупких материалов и их наносоединений методом акустической эмиссии. Установлено, что количество импульсов акустической эмиссии зависит от прочности образца. При испытаниях наносоединений ситаллов возможны два характерных вида разрушения: с переходом трещины в материал образца и без выхода ее за пределы соединительного шва. Метод акустической эмиссии гарантирует надежность регистрации этих видов разрушения.*

**Ключевые слова:** стеклокерамика, ситалл, стекло, наносоединения, прочность, акустическая эмиссия.

**Введение.** Создание оптических систем, работающих в сложных условиях воздействия окружающей среды, например в космическом пространстве, требует использования материалов, которые обладают особыми свойствами. Так, при значительных перепадах температуры необходимыми условиями являются сохранение неизменными геометрических характеристик и отсутствие температурных напряжений в элементах данных конструкций. Этим требованиям отвечает стеклокерамика типа Zerodur.

Стеклокерамика типа Zerodur, имеющая нулевой коэффициент термического расширения, относится к упругохрупким неметаллическим материалам с уникально высокой однородной и свободной от дефектов внутренней стеклокристаллической структурой. Структура этого материала представляет собой композицию из стеклофазы и кристаллической фазы, размер которой 80...120 нм. Нулевой коэффициент термического расширения достигается за счет отрицательного линейного термического расширения кристаллической фазы, тогда как стеклофаза обладает положительным коэффициентом термического расширения.

Необходимыми элементами прецизионных конструкций являются прочные и стабильные соединения деталей. Наносоединения деталей имеют стабильные деформационные параметры, уникальную стабильность формы и размеров благодаря применению адгезионно-активных металлических вакуумных покрытий и специальных технологий диффузионного соединения. Эти соединения были разработаны для уникальных высокопрецизионных составных конструкций оптических приборов.

Таким образом, исследование механических свойств таких материалов и их соединений представляется актуальным. Для отработки методики испытаний стеклокерамики типа Zerodur использовали близкие по механическим свойствам хрупкие материалы, такие, как стекло и стеклокерамика (ситаллы литиево-алюмосиликатной системы CO115M). Процессы разрушения в нагружаемых материалах изучали методом акустической эмиссии (АЭ), позволяющим регистрировать момент зарождения трещины и исследовать ее развитие в хрупком материале в процессе нагружения.

**Методика испытаний.** В качестве основной схемы нагружения выбрали испытание призматических образцов на трехточечный изгиб. Образцы для исследования прочности соединений изготавливали по той же технологии и имели такую же форму, что и образцы из сплошного материала. Соединительный шов проходил по плоскости, нормальной к оси образца в его центральной части. Такая схема нагружения позволяет при простой геометрической форме образца, что существенно при реализации технологии его изготовления, создать достаточно корректные условия для применения метода АЭ. Кроме того, можно с высокой точностью определять максимальные растягивающие напряжения, которые характеризуют прочность рассматриваемого класса хрупких материалов или их соединений.

Нагружение образцов проводили на испытательной машине Instron-1126 в режиме постоянства скорости перемещения траверсы. При этом регистрировалась диаграмма нагружения при постоянной скорости диаграммной ленты. Приспособление для нагружения позволяло изменять расстояние между нижними опорами в необходимых пределах, верхняя опора была жестко закреплена на перемещающейся траверсе машины.

Для приема и регистрации сигналов АЭ использовали систему, разработанную и изготовленную на базе персонального компьютера в Институте проблем прочности им. Г. С. Писаренко НАН Украины. Данная система является дальнейшим развитием системы измерения и регистрации параметров АЭ “Сигнал-4М” и автоматизированного комплекса “Эхо”, разработанных и изготовленных ранее [1, 2]. В качестве электроакустического преобразователя использовали широкополосный датчик из пьезокерамики на основе цирконата-титаната свинца ЦТС-19.

После предварительного усиления сигналы АЭ детектировались, оцифровывались с частотой дискретизации 12,693 кГц и регистрировались в виде файлов на жестком диске компьютера. Зарегистрированные данные подвергали дальнейшей обработке с целью визуализации и представления в виде, удобном для работы. Отметим, что в процессе обработки результатов испытаний использовали не акустограммы вторичных параметров акустической эмиссии (такие, как огибающая амплитуды, скорость счета и т.п.), а графики исходных сигналов АЭ.

При испытаниях хрупких материалов общий вид графиков сигналов АЭ представляет собой короткие импульсы дискретной АЭ различной амплитуды. Разрушение всегда сопровождается мощным импульсом АЭ, после которого может наблюдаться последовательность импульсов большой величины, вызванных процессами, не связанными с исследуемыми процессами (падение обломков образца с закрепленным на нем датчиком сигналов АЭ, трение этих обломков об опоры и т.п.).

При проведении испытаний с использованием метода АЭ необходимо особое внимание уделять методическим вопросам [1, 3], в частности устранению побочных сигналов АЭ, вызываемых процессами, не имеющими прямого отношения к процессам, протекающим в нагружаемом материале. Наибольшая трудность при идентификации этих сигналов заключается в необходимости отделения информативных сигналов АЭ, обусловленных деформированием и разрушением основного материала образца, от сигналов АЭ, вызванных дроблением и перемещением мелких частиц (пылинки) данного материала, неизбежно остающихся на его поверхности после механической обработки (например, шлифовки). Как показала практика, достичь полного удаления микрочастиц с поверхности образца не удастся известными методами механической очистки или промывки.

Для устранения появления таких побочных сигналов на образец в зонах приложения нагрузки наклеивали особую пленку [4]. Эффективность данного способа иллюстрируют акустограммы (рис. 1).

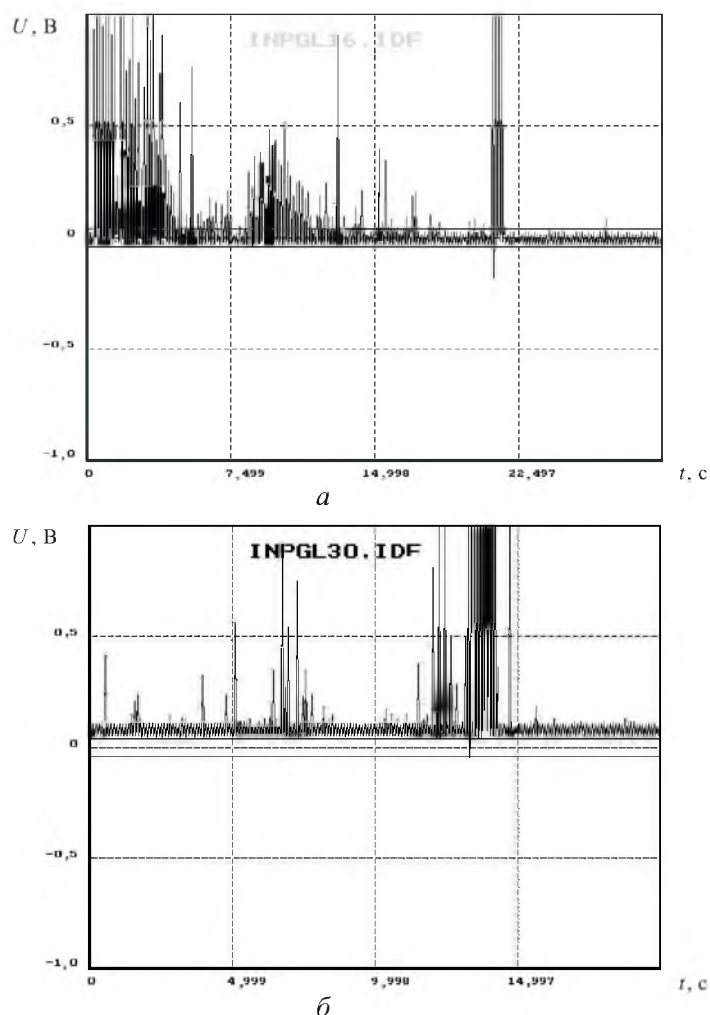


Рис. 1. Типичный вид акустограмм сигналов АЭ при испытаниях на изгиб образцов из материала типа Zerodur без наклеенной пленки в зонах приложения нагрузки (а) и с наклеенной (б).

Большое влияние на получаемые результаты оказывает выбор способа и места установки преобразователя сигналов АЭ [1, 3]. В данной работе преобразователь устанавливали через слой акустопрозрачной смазки для уменьшения потерь сигналов АЭ на границе с преобразователем. Использовали два варианта размещения преобразователя: непосредственно на образце и на верхней нагружающей опоре. Как и следовало ожидать, установка датчика сигналов АЭ на верхней нагружающей опоре приводит к существенному уменьшению их уровня. При этом сигналы небольшого уровня становились ниже порогового, определяемого шумами аппаратуры, и регистрировалось меньшее количество импульсов АЭ. Если позволяли размеры образца и другие условия испытаний, датчик сигналов АЭ устанавливали на образце.

При испытаниях реализовывалось нагружение до разрушения с постоянной скоростью перемещения траверсы испытательной машины 0,033 мм/с.

**Результаты испытаний.** Призматические образцы из технического стекла размером 9×12×120 мм испытывали на трехточечный изгиб при монотонном нагружении. Установлено, что первые сигналы АЭ обычно появляются по достижении нагрузок, составляющих 20...50% разрушающих. Общее число импульсов АЭ варьировалось в пределах 1...30. Наибольшее число импульсов наблюдалось для менее прочных образцов. Для образцов, выдержавших наибольшую нагрузку, характерно отсутствие сигналов АЭ до момента разрушения.

Из рис. 2 видно, что для более прочных образцов количество предшествующих разрушению импульсов АЭ меньше. Это вполне оправдано с физической точки зрения, так как каждый импульс АЭ является отражением акта разрушения, происходящего в испытуемом материале. Естественно, чем больше в образце развивающихся дефектов (чем больше актов разрушения), тем меньше его прочность [5].

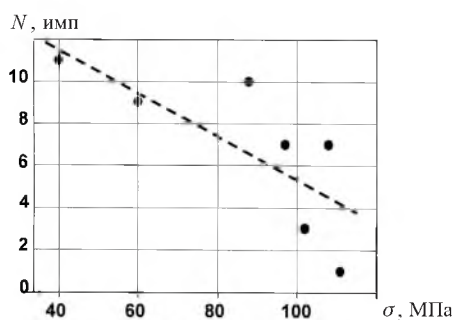


Рис. 2. Зависимость числа импульсов АЭ от напряжения разрушения образца.

При испытании наносоединений ситаллов наблюдались два характерных вида разрушения. В одном случае разрушение развивалось по соединительному шву без выхода трещины за его пределы. В другом случае трещина переходила из соединительного шва в материал образца. Для каждого из этих видов разрушения акустogramмы сигналов АЭ имели свои особенности. При разрушении строго по соединительному шву отмечался только один импульс АЭ, соответствующий моменту разрушения (рис. 3). В случае

перехода трещины в материал образца регистрировались несколько импульсов АЭ, предшествовавших разрушению (рис. 4). При этом акустограммы сигналов АЭ напоминали акустограммы при испытании и разрушении цельных призматических образцов из данного материала.

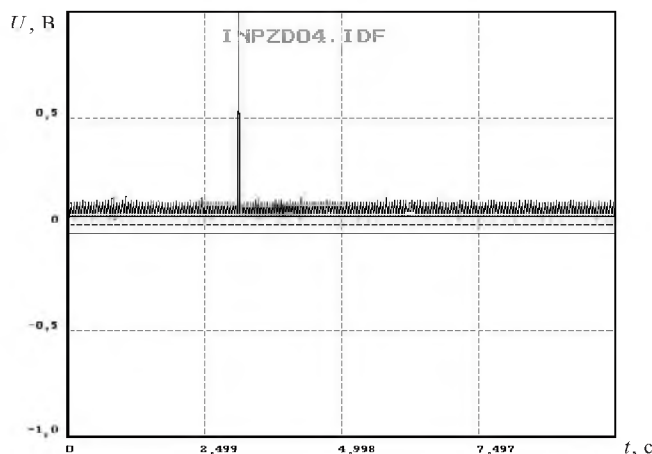


Рис. 3. Типичный вид акустограмм сигналов АЭ при испытаниях образцов из наносоединений ситаллов при разрушении строго по соединительному шву.

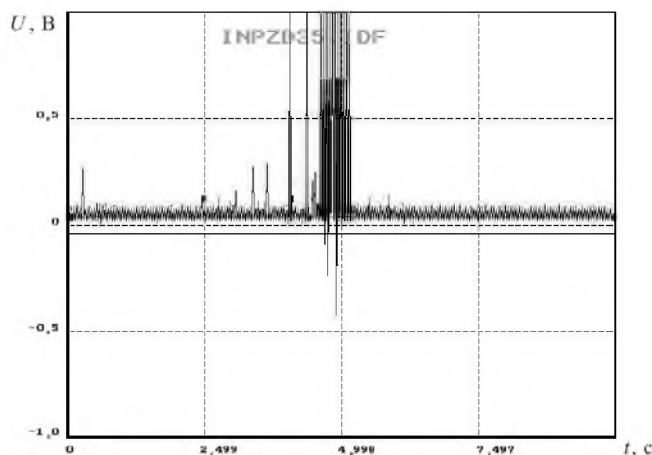


Рис. 4. Типичный вид акустограмм сигналов АЭ при испытаниях образцов из наносоединений ситаллов при переходе трещины в материал образца.

Прочность наносоединений при их разрушении как по соединительному шву, так и при переходе трещины в материал образца была практически одинаковой. В этом случае прочность, собственно, материала, определенная при испытании монолитных образцов, превышала прочность соединительного шва в несколько раз, что можно объяснить различным уровнем концентрации напряжений в зоне соединения.

## Выводы

1. Показана перспективность оценки прочности оптических хрупких материалов и их наносоединений с помощью метода АЭ.

2. Установлено, что для отсеивания неинформативных сигналов АЭ от разрушения и перемещения микрочастиц пыли материала образца необходимо принимать особые меры подготовки образцов к испытаниям, в частности применять наклейку особой пленки в местах контакта с опорами.

3. Количество импульсов АЭ зависит от прочности образца.

4. При испытаниях наносоединений ситаллов возможны два характерных вида разрушения, которые надежно регистрируются методом АЭ: с переходом трещины в материал образца и без выхода ее за пределы соединительного шва.

## Резюме

Для оптических систем, які експлуатуються за великих перепадів температури навколишнього середовища, використовуються матеріали з особливими властивостями, наприклад із незмінними геометричними характеристиками, такі, як склокераміка типу Zerodur із нульовим коефіцієнтом термічного розширення. Необхідними елементами систем є прецизійні міцні з'єднання деталей. Процеси руйнування в матеріалах при навантажуванні вивчаються за допомогою методу акустичної емісії, що дозволяє реєструвати момент зародження тріщини і дослідити її розвиток у крихкому матеріалі. Показано перспективність оцінки міцності оптичних крихких матеріалів та їх нано-з'єднань методом акустичної емісії. Установлено, що кількість імпульсів акустичної емісії залежить від міцності зразка. При випробуваннях нано-з'єднань ситалів можливі дві характерні моди руйнування: з переходом тріщини в матеріал зразка і без виходу її за межі з'єднувального шва. Метод акустичної емісії забезпечує надійну ідентифікацію цих мод руйнування.

1. *Стрижало В. А., Добровольский Ю. В., Стрельченко В. А. и др.* Прочность и акустическая эмиссия материалов и элементов конструкций / Под ред. Г. С. Писаренко. – Киев: Наук. думка, 1990. – 232 с.
2. *Писаренко Г. С., Стрижало В. А., Гришко В. Г. и др.* Автоматизированная система “Эхо” для исследования акустико-эмиссионных свойств материалов // Диагностика и прогнозирование разрушения сварных конструкций. – 1986. – Вып. 3. – С. 95 – 100.
3. *Грешиков В. А., Дробот Ю. Б.* Акустическая эмиссия. – М.: Изд-во стандартов, 1976. – 272 с.
4. *Патент № 11200.* Спосіб підготовки зразка крихкого неметалевого матеріалу типу скла, ситалів або кераміки до механічних випробувань з реєстрацією сигналів акустичної емісії / В. П. Маслов, Ю. М. Родичев, В. С. Бодунов та ін. – Чинний з 06. 06. 2005.
5. *Патент № 11145.* Спосіб реєстрації розвитку тріщини у матеріалі / В. П. Маслов, Ю. М. Родичев, Ю. В. Добровольський та ін. – Чинний з 26. 05. 2005.

Поступила 09. 11. 2005