

УДК 53.08:004, 53.087/.088

КОМБИНИРОВАННЫЙ МЕТОД ИССЛЕДОВАНИЯ ДЕФОРМАЦИИ И РАЗРУШЕНИЯ ОБРАЗЦОВ ИЗ УГЛЕРОД-УГЛЕРОДНОГО КОМПОЗИЦИОННОГО МАТЕРИАЛА ПО ДАННЫМ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ, КОРРЕЛЯЦИИ ЦИФРОВЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ И ТЕНЗОМЕТРИИС.В. Панин^{1,2}, М.В. Бурков¹, А.В. Бяков¹, П.С. Любутин¹¹ Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, г. Томск² Томский политехнический университет
E-mail: burkovispms@mail.ru

Панин Сергей Викторович, д-р техн. наук, доцент, заведующий лабораторией полимерных композиционных материалов Института физики прочности и материаловедения СО РАН, г. Томск.

E-mail: svp@ispms.tsc.ru

Область научных интересов: физическая мезомеханика, полимерные композиционные материалы на основе СВМПЭ, неразрушающий контроль.

Бурков Михаил Владимирович, аспирант Института физики прочности и материаловедения СО РАН, г. Томск. E-mail: burkovispms@mail.ru
Область научных интересов: материаловедение.

Бяков Антон Викторович, канд. техн. наук, мл. науч. сотр. Института физики прочности и материаловедения СО РАН, г. Томск.

E-mail:

biakov.anton@gmail.com

Область научных интересов: метод акустической эмиссии.

Любутин Павел Степанович, канд. техн. наук, мл. науч. сотр. Института физики прочности и материаловедения СО РАН, г. Томск.

E-mail: ps_box@mail.ru

Область научных интересов: обработка и анализ изображений.

Проведено исследование деформации и разрушения образцов из углерод-углеродного композиционного материала с различным размером концентратора напряжений в форме центрального отверстия диаметром 7, 10 и 13 мм с использованием комбинированного метода. Результаты численного анализа экспериментальных данных представлены в виде диаграмм (зависимостей) интенсивности деформации сдвига и активности акустической эмиссии, как функций от времени нагружения. Обсуждаются и трактуются причины подобия и различия результатов исследований. Полученные данные предлагается использовать для неразрушающего контроля композиционных материалов, путем выделения характерных стадий развития деформации и момента, предшествующего разрушению.

Ключевые слова:

Тензометрия, акустическая эмиссия, метод корреляции цифровых изображений, композиционный материал, неразрушающий контроль.

Введение

В конструкциях из волокнистых композиционных материалов (КМ) из-за особенностей технологии или её несовершенства, уже на стадии производства могут появляться дефекты (расслоения, разрывы волокна и матрицы, газовые поры и т. д.). Наличие наружных и внутренних дефектов различного вида обуславливает сложность выбора эффективных методов неразрушающего контроля изделий.

Традиционно для дефектоскопии волокнистых КМ используется ультразвуковой метод, который позволяет, преимущественно, обнаруживать крупные дефекты типа несплошностей, расслоений, нарушения адгезии (клеевых слоев) и используется на этапе входного контроля полуфабрикатов и изделий. В то же время, весьма часто, дефекты зарождаются в процессе эксплуатации и имеют крайне малый размер, поэтому актуальным является разработка новых или адаптация существующих методов неразрушающего контроля, способных выявлять дефекты такого рода (и размера). Перспективным методом для выявления формирующихся несплошностей в КМ в процессе нагружения (эксплуатации) является метод акустической эмиссии (АЭ). Сигналы АЭ, излучаемые материалом в процессе нагружения (разрушения), могут нести информацию о размере трещин, скорости их роста, позволяя решать задачу раннего обнаружения

разрушения КМ [1, 2]. Активные исследования по изучению деформационного поведения и разрушения конструкционных материалов проводятся в СибНИИ им. Чаплыгина (г. Новосибирск) [1, 2], где комплексно применяются приборы для регистрации АЭ и тензометрии.

Несмотря на то, что акустические методы позволяют получить количественную оценку развития деформационных процессов в объеме нагруженного материала, требуется подтверждение корректности интерпретации полученных результатов. Оптический метод позволяет путем визуального контроля идентифицировать типы дефектов, а также оценить их размер. Таким образом, метод корреляции цифровых изображений (DIC) является взаимодополняющим к АЭ, а также позволяет оценить величину деформации в области наблюдения [3]. В результате, за счет совместного использования метода тензометрии, АЭ и оптического метода измерения деформации предоставляется возможность оценить интегральную и локальную деформацию в нагруженном образце и зарегистрировать излучение упругих (акустических) волн, сопровождающих процессы разрушения.

С применением такого подхода в настоящей работе проведено исследование процессов деформации и разрушения образцов из углерод-углеродного КМ (УУКМ) с отверстиями различного диаметра при статическом растяжении. Данный материал обладает высокой способностью к излучению АЭ при нагружении, а наличие одного концентратора напряжений (КН) позволяет фиксировать область локализации деформации оптическим методом. За счет изменения диаметра отверстия менялось распределение напряженно-деформированного состояния в образцах, а также степень локализации деформации, характер которой в образцах с подобной конфигурацией концентратора напряжений должен проявляться в виде формирования креста макрополос локализованного сдвига.

Актуальность данной работы связана с разработкой подхода к неразрушающему контролю волокнистых КМ. Основные сложности, возникающие при испытании УУКМ, и разработки метода НК:

- наличие нескольких слоев с разным направлением армирования и, соответственно, различными свойствами;
- плохая отражающая способность, требующая подготовки поверхности для фоторегистрации ее изображений;
- с помощью оптического метода можно наблюдать деформационные процессы и дефекты только в поверхностном слое;
- низкая пластичность материала;
- сложная гетерогенная структура, обуславливающая необходимость высокого разрешения оптической системы для наблюдения деформационных процессов на различных масштабных уровнях (волокно, слой армирования, композит и т. п.).

Помимо развития комбинированного метода неразрушающего контроля в работе решалась задача установления взаимосвязи между деформационными процессами, развивающимися на различных масштабных уровнях [4]. Данные тензометрии, АЭ и DIC позволяют одновременно регистрировать проявление активности деформации на следующих масштабах:

- тензометрия отражает макроуровень или изменение размеров образца при приложении нагрузки;
- DIC (Мезо II) – уровень, сопоставимый по масштабу с макроуровнем деформации, поскольку в поле обзора попадает практически вся исследуемая поверхность образца [3];
- АЭ (Мезо I) – уровень нарушения сплошности, прежде всего, по границе волокон и связующего. Измерения АЭ характеризуют процессы в объеме всего образца, в то время как оптический метод характеризует, прежде всего, изменения в верхнем наблюдаемом слое композита.

Помимо выбора *in situ* методов исследования деформации актуальным является вопрос выбора информативных параметров, адекватно характеризующих развитие деформационных процессов на каждом из указанных масштабов. В качестве таких параметров для метода АЭ использовали активность событий $\dot{N}_\Sigma = dN_\Sigma / dt$ (количество сигналов АЭ в единицу време-

ни); для метода DIC – интенсивность деформации сдвига γ , для тензометрии – $d\sigma/dt$ (производную внешнего приложенного напряжения по деформации, либо времени).

Удобным и наглядным подходом к выявлению активизации деформационных процессов является выделение характерных стадий развития деформации и разрушения, которые связаны с соответствующими механизмами и деформационными (дефектными) структурами. В наших предыдущих исследованиях испытывали алюминиевые образцы с различными видами КН [5–7]. Идеология выделения стадий процессов деформации и разрушения, использованная в этих статьях, сохранена и в настоящей работе.

Материал и методика исследований

В работе применяли комбинированный метод для исследования процессов локализованной деформации в образцах из углерод-углеродного композиционного материала (УУКМ) с различными размерами концентратора напряжений – центрального отверстия с диаметрами 7, 10 и 13 мм. Применение одновременной регистрации несколькими методами позволило проследить и сравнить регистрируемые параметры на протяжении всего времени эксперимента. Материал представляет собой псевдоизотропный композит из слоев однонаправленных углеродных лент $[0^\circ, 45^\circ, -45^\circ, 90^\circ]$, спеченный в углеродной матрице. На рис. 1, а приведена схема образцов, размеры которых выбраны в соответствие со стандартом ASTM D5766-D5766M (Standard Test Method for Open Hole Tensile Strength of Polymer Matrix Composite Laminates). Образцы вырезали на прецизионном отрезном станке Struers Secotom-10 (диск с алмазным режущим слоем на металлической основе, охлаждение водой) из плит композита толщиной 15 мм. В связи с ограниченными размерами этих плит длины образцов были снижены по сравнению с предлагаемыми в стандарте.

Образцы испытывали одноосным статическим растяжением на электромеханической машине Instron 5582 со скоростью перемещения подвижного захвата 0,3 мм/мин. Данные тензометрии регистрировали с использованием штатного оборудования испытательной машины (встроенного тензодатчика).

Регистрацию АЭ осуществляли с помощью программно-аппаратного измерительного комплекса регистрации сигналов АЭ на базе ПК [8, 9]. В качестве основного информативного параметра данных АЭ рассчитывали производные от накопления сигналов АЭ по времени (активность акустической эмиссии $\dot{N}_\Sigma = dN_\Sigma / dt$).

Фотографирование поверхности для метода корреляции цифровых изображений осуществляли с помощью фотокамеры Canon EOS 550D, оснащенной длиннофокусным объективом Canon EF-S 100-400mm 1/4-5.6 IS. Для расчета величины средней интенсивности деформации сдвига (ИДС) γ выбирали область изображения размером 3300×4950 пикселей (физические размеры ~35×52,5 мм), расположенную в центре образца, вокруг отверстия. Размеры расчетной области выбирались с учетом того, чтобы гарантировано наблюдать формирование и развитие в ней макрополос деформации. Для исключения части, соответствующей отверстию (в которой отсутствует как сам материал, так и деформация в нем), с помощью программного обеспечения для расчета векторов перемещений вырезали данный участок, подобно тому, как это показано на рис. 1, б.

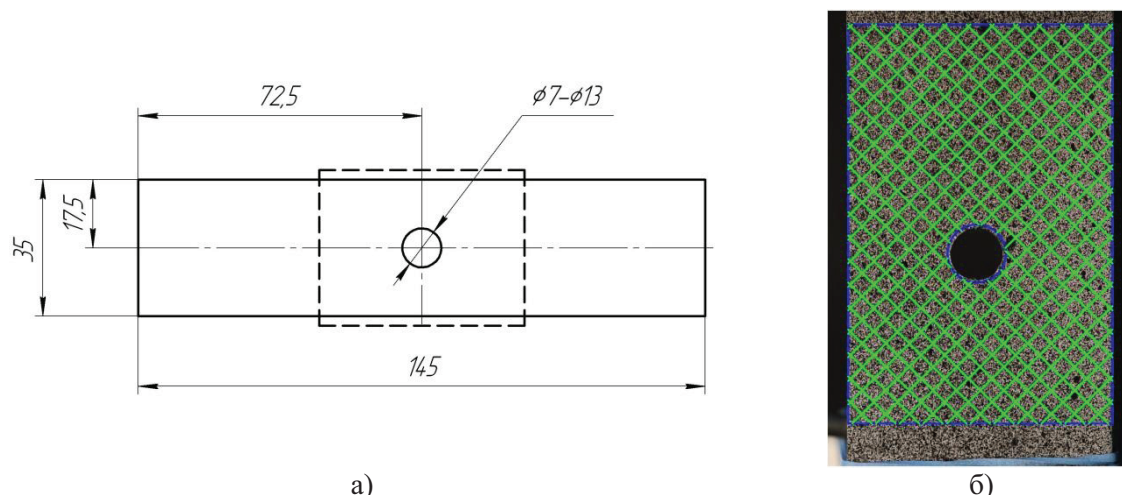


Рис. 1. Чертеж образцов (толщина 4 мм): а) штриховой линией показана область, выделяемая для построения поля векторов перемещений; б) пример выделения этой области

Результаты экспериментов

3.1. Диаграммы нагружения

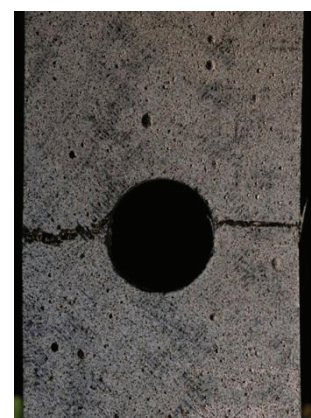
На рис. 2 приведены фотографии разрушенных образцов, характер разрушения которых соответствует допустимому в стандарте ASTM D5766-D576M для материала с псевдоизотропной структурой $[0^\circ, 45^\circ, -45^\circ, 90^\circ]$. Видно, что разрушение происходит в области минимального сечения, при этом трещины распространяются от отверстия в сторону внешнего края образца, что зачастую сопровождается их ветвлением, обусловленным структурой укладки волокон. Характер разрушения, при изменении диаметра отверстия, не меняется. Для каждого образца в подрисочной подписи приведены значения разрушающего напряжения $\sigma_{\text{разр}}$ и относительного удлинения $\varepsilon_{\text{разр}}$.



$\varepsilon_{\text{разр}} = 3,2 \%$, $\sigma_{\text{разр}} = 209 \text{ МПа}$
а)



$\varepsilon_{\text{разр}} = 2,6 \%$, $\sigma_{\text{разр}} = 175 \text{ МПа}$
б)



$\varepsilon_{\text{разр}} = 2,1 \%$, $\sigma_{\text{разр}} = 137 \text{ МПа}$
в)

Рис. 2. Фотографии разрушенных образцов: а) $\phi 7$ мм; б) $\phi 10$ мм; в) $\phi 13$ мм

На рис. 3 приведены диаграммы нагружения образцов с различным диаметром центрального отверстия и зависимости производной внешнего деформирующего напряжения по времени нагружения $d\sigma/dt = f(t)$, а также все диаграммы нагружения, собранные на одном графике (рис. 3, з).

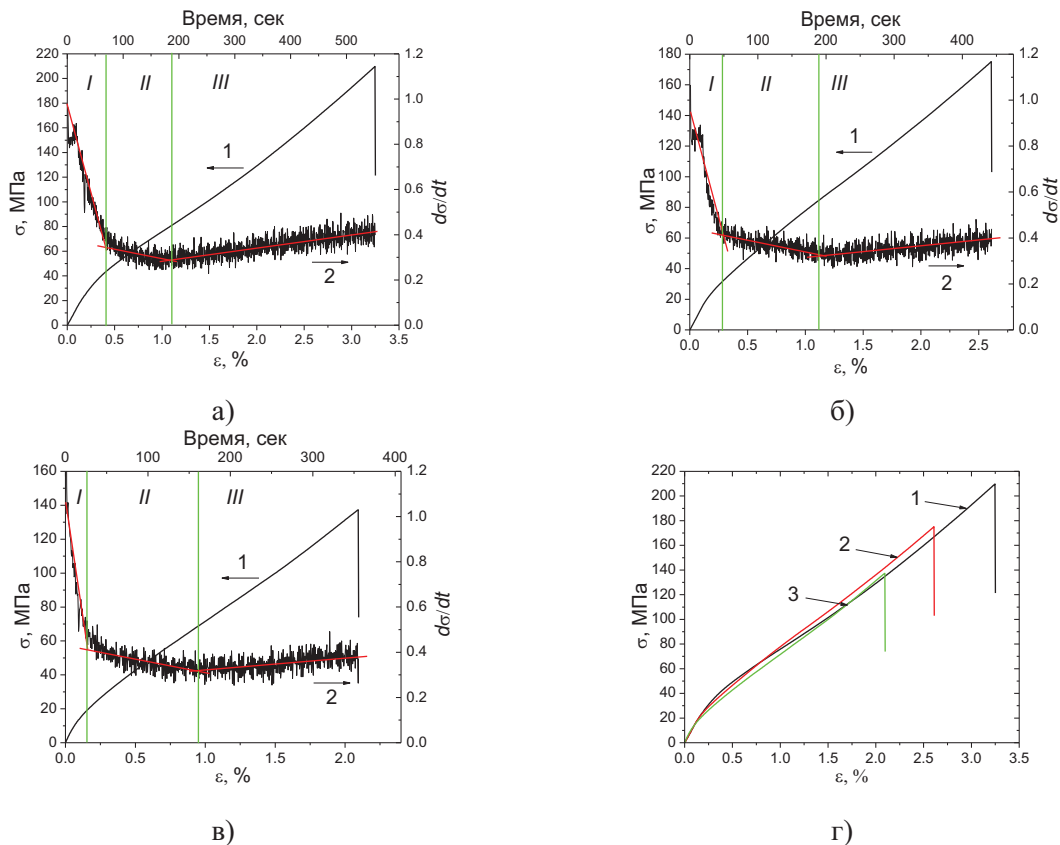


Рис. 3. Диаграммы нагружения (1) и графики производной внешнего деформирующего напряжения $d\sigma/dt$ (2): а) $\varnothing 7$ мм; б) $\varnothing 10$ мм; в) $\varnothing 13$ мм; г) сводный график кривых нагружения 1) $\varnothing 7$ мм; 2) $\varnothing 10$ мм; 3) $\varnothing 13$ мм

Сопоставление приведенных экспериментальных результатов позволяет выявить следующие закономерности:

- Диаграммы нагружения образцов хорошо соответствуют друг другу, отличаясь лишь величиной удлинения до разрушения (рис. 3, *з*).
- Увеличение диаметра отверстия приводит к снижению напряжения и относительного удлинения, соответствующих моменту разрушения (рис. 3, *з*), что может быть связано со степенью локализации деформации с самого начала нагружения.
- На графиках производной $d\sigma/dt = f(t)$ для всех типов образцов путем кусочно-линейной аппроксимации можно выделить три характерных участка (стадии), (рис. 3, *а-в*). При этом третий участок характеризуется небольшим ростом параметра $d\sigma/dt$, что может быть связано с натяжением все большего числа продольно ориентированных волокон, которые могли быть не вовлечены в сопротивление деформированию на начальном этапе нагружения из-за отклонения от траектории укладки при формовании.

В дальнейшем данные АЭ и DIC сравнивали со стадийностью по данным тензометрии, как наиболее достоверного способа интегральной оценки напряженно-деформированного состояния нагруженных материалов.

3.2. Оптический метод измерения деформации

Анализ распределений деформаций на мезо II масштабном уровне проводили путем обработки изображений интегральным и дифференциальным методами (более подробно эта методика была описана в работе [10]). В первом случае векторы перемещений строили путем сопоставления первого (начального) с каждым последующим изображениями, в то время как при дифференциальном способе расчета сравнивали текущее и последующее изображения поверхности деформируемого образца. На рис. 4 приведены зависимости значения интенсивности де-

формации сдвига $\gamma_{\text{инт}}$, полученные при анализе изображений интегральным (а) и дифференциальным (б) способами. Видно, что графики для образцов с любым диаметром отверстия, рассчитанные интегральным методом, имеют практически линейный вид и весьма подобны.

На рис. 5 приведены графики зависимости ИДС, рассчитанные дифференциальным способом, совмещенные с графиками производной внешней нагрузки по времени. В данном случае значение интенсивности деформации сдвига рассчитывали как среднее по 10 максимальным значениям в расчетной области.

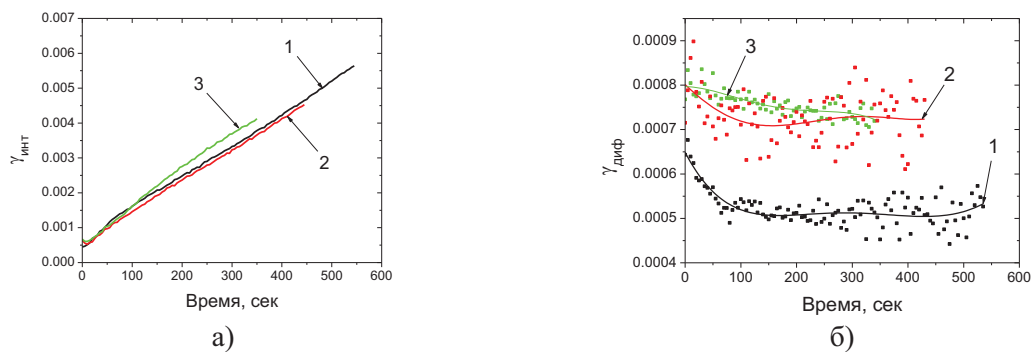


Рис. 4. Зависимости интенсивности деформации сдвига, рассчитанные: а) интегральным, б) дифференциальным способами. 1) $\varnothing 7$ мм, 2) $\varnothing 10$ мм, 3) $\varnothing 13$ мм

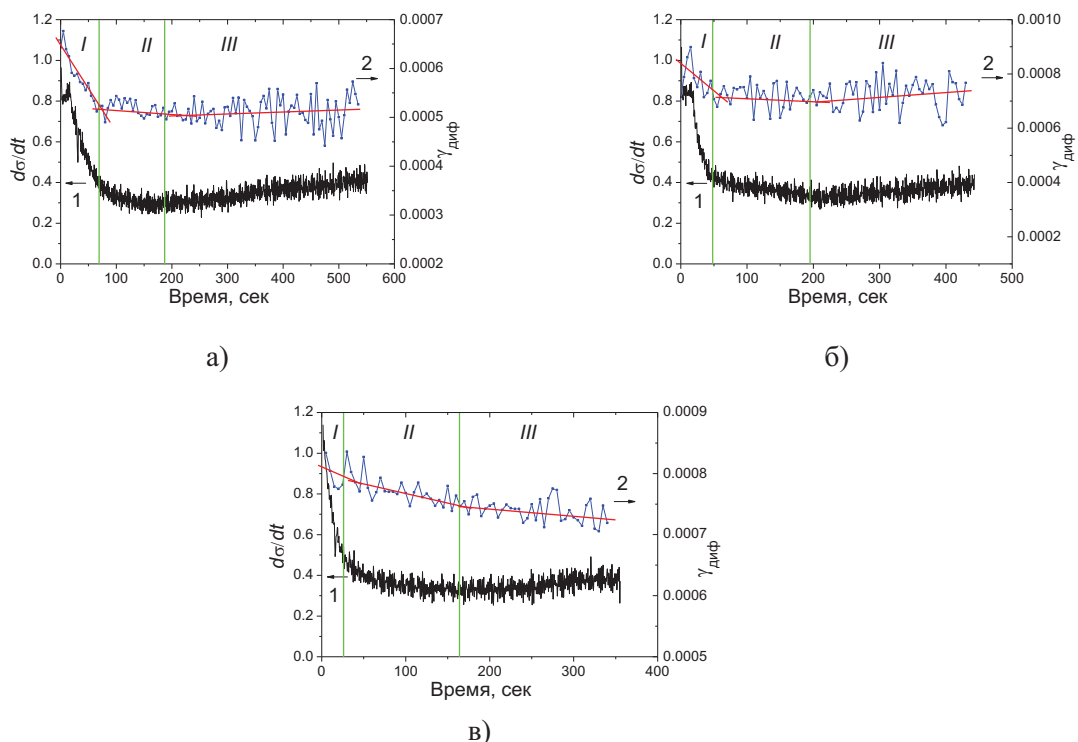


Рис. 5. Графики производной внешнего деформирующего напряжения $d\sigma/dt$ (1) и интенсивности деформации сдвига (2), рассчитанной дифференциальным способом: а) $\varnothing 7$ мм, б) $\varnothing 10$ мм, в) $\varnothing 13$ мм

Видно, что с использованием кусочно-линейной аппроксимации на данных кривых можно также выделить три характерных участка (по аналогии с подходом, примененным при анализе диаграмм нагружения, мы назовем их стадии ДИС_{диф}). Графики для образцов с диаметрами 7 и 10 мм хорошо коррелируют с данными тензометрии, в то время как для образца с диа-

метром 13 мм наблюдается некоторое расхождение. Границы стадий на рис. 5 показаны вертикальными линиями и выделены на основании данных тензометрии.

Характерные картины распределения интенсивности деформации сдвига на различных стадиях деформации визуализированы на рис. 6. Видно, что характерным деформационным дефектом мезо- (макро-) масштабного уровня являются полосы локализованной деформации, распространяющиеся от отверстий в направлении максимальных касательных напряжений. На полях деформаций, особенно полученных перед разрушением, около отверстий в точках максимальных напряжений видны области, от которых зарождаются и распространяются макротрещины.

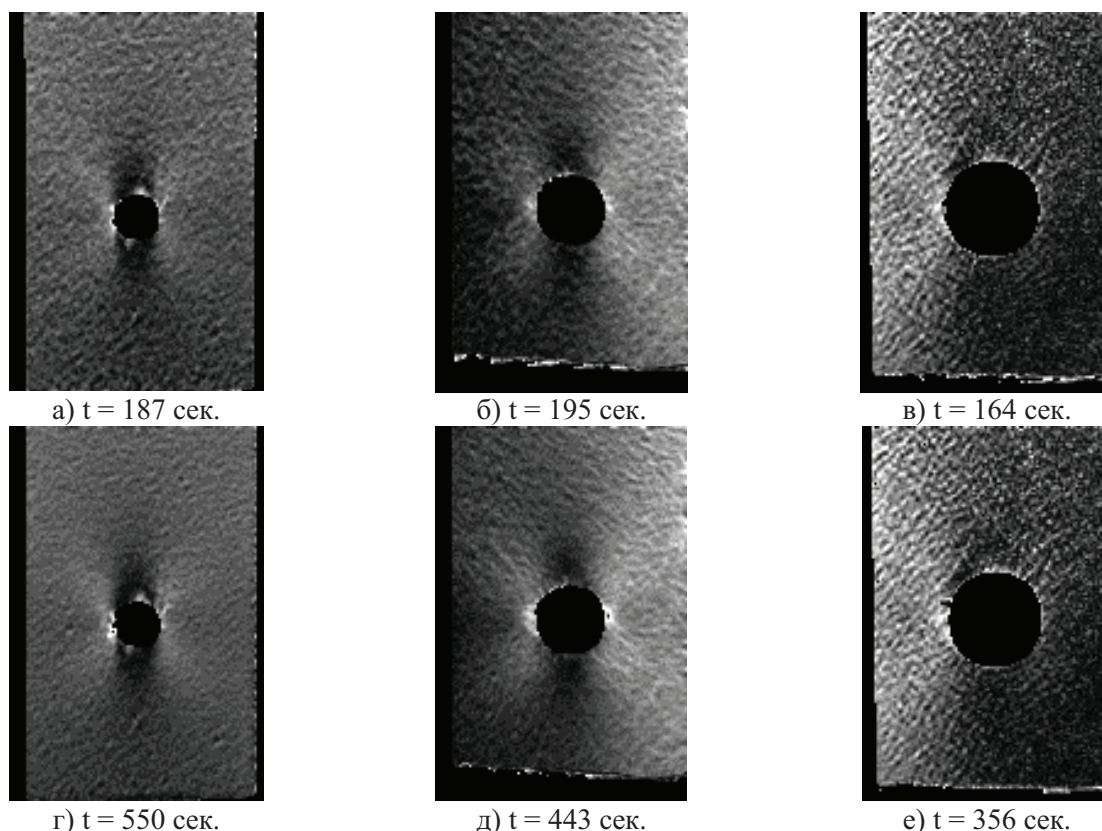


Рис. 6. Распределение интенсивности деформации сдвига, рассчитанное интегральным способом для образцов с отверстием: а, г) $\varnothing 7$ мм; б, д) $\varnothing 10$ мм; в, е) $\varnothing 13$ мм. Указано время после начала нагружения

3.3. Активность событий АЭ

В полном соответствии с методиками анализа данных тензометрии и корреляции цифровых изображений были обработаны данные регистрации акустической эмиссии (рис. 7). Выделение стадий с использованием процедуры кусочно-линейной аппроксимации в данном случае не всегда представлялось математически корректным, поэтому данные были аппроксимированы гладкой кривой.

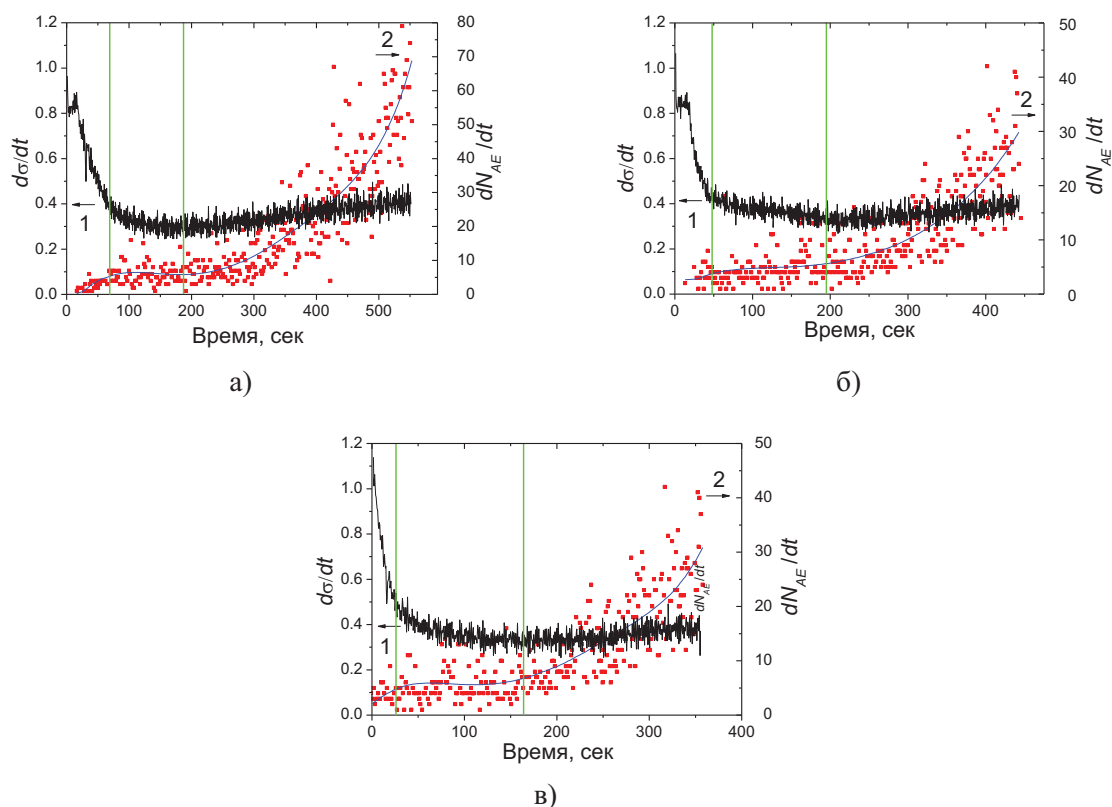


Рис. 7. Совмещенные графики производной внешнего деформирующего напряжения $d\sigma/dt$ (1) и зависимости активности АЭ dN_{AE}/dt (2) от времени нагружения: а) $\varnothing 7$ мм; б) $\varnothing 10$ мм; в) $\varnothing 13$ мм

Видно, что протяженность стадии $акт\ АЭ\ 1$ достаточно хорошо согласуется с результатами выделения стадий по данным тензометрии, поскольку обе стадии соответствуют развитию упругой и начальной пластической деформации в образце. Есть некоторое различие, которое может быть связано как с чувствительностью аппаратуры регистрации АЭ, так и с использованными методами математической обработки для сглаживания зависимостей $\dot{N}_{\Sigma} = dN_{\Sigma}/dt$. Особенно хорошо заметно, что начало роста активности акусто-эмиссии соответствует точке перегиба кривой $d\sigma/dt$.

В целом выявленная стадийность деформационных процессов по данным, полученным методами тензометрии и АЭ, достаточно хорошо согласуется между собой.

Обсуждение результатов

Данная работа представляет первую попытку авторов применить комбинированный способ исследования деформации и разрушения (тензометрия–DIC–АЭ) для анализа деформационного поведения нагруженных образцов УУКМ. Ранее этот способ применяли для исследования деформации алюминиевого сплава Д16АТ, поэтому обсуждение следует начать со сравнения результатов настоящего исследования с полученными ранее в работе [6].

Согласно результатам, полученным при растяжении образцов Д16АТ с отверстиями, не наблюдалось четкого соответствия стадий деформации по данным, полученным методами DIC и АЭ в сравнении с данными тензометрии. В первую очередь это связано с самими свойствами материалов и их реакцией на приложение нагрузки: Д16АТ обладает хорошей пластичностью, а УУКМ, наоборот, преимущественно деформируется упруго. Тем не менее, подобно результатам [6] на графике производной $d\sigma/dt$ для УУКМ также достаточно четко выделяются 3 характерные, хорошо разделимые между собой, стадии.

Первая стадия, по мнению авторов, связана с упругой деформацией углеродной матрицы, обладающей высоким модулем упругости, но низким пределом прочности при растяжении. Время окончания стадии $t_{тенз I}$ должно быть связано с тем, что матрица перестает оказывать преимущественное сопротивление внешнему нагружению, и основная нагрузка перераспределяется между углеродными волокнами.

Вторая стадия характеризуется небольшим падением величины $d\sigma/dt$, что, наиболее вероятно [11], связано с натяжением продольно-ориентированных волокон.

Третья стадия характеризуется возрастающей жесткостью материала, благодаря «натяжению» всех волокон в композите с активизацией процессов нарушения адгезионной связи и разрушения волокон (что подтверждается активным ростом АЭ).

Сравнение данных тензометрии и акустической эмиссии показывает достаточно хорошее соответствие трех стадий, выделенных по данным этих методов. Однако, рассматривая стадию 3, можно сказать, что тензометрия обладает меньшей чувствительностью к процессам деформации и разрушения, происходящим на данной стадии, поскольку в течение всей данной стадии значение информативного параметра $d\sigma/dt$ остается примерно постоянным либо незначительно возрастает. В то же время, величина активности АЭ практически непрерывно возрастает, что связано с натяжением волокон, нарушением адгезионной связи «волоконно-связующее» и разрушением самих волокон.

Для метода корреляции цифровых изображений, помимо ограничений, связанных с низким разрешением оптической системы и использованием процедуры интерполяции при построении векторов перемещений с субпиксельной точностью, основным лимитирующим фактором остается наблюдение лишь одного верхнего слоя волокнистого КМ. В связи с тем, что при изготовлении образцов использовался метод, при котором распил плиток проводился вдоль слоев композита, в качестве наружного слоя могли оказаться слои с разным направлением армирования. Результат, полученный с помощью метода DIC для образца с диаметром 13 мм (непрерывное снижение параметра ИДС на 3-й стадии), наиболее вероятно, связан именно с этим. В этом образце фотографируемая поверхность представляла собой слои с направлением армирования 90° и -45° , которые не являются основными в восприятии растягивающей нагрузки.

Заметное влияние на распределение НДС в образце оказывает отверстие: вследствие вязко-упругого поведения композита напряжения в вершине отверстия заметно повышаются, что определяется коэффициентом концентрации напряжений. Разрушающее напряжение для гладкого образца (без отверстия) должны быть примерно в 2,3...2,7 раз выше (в зависимости от диаметра отверстия), чем у образца с КН.

На распределениях интенсивности деформации сдвига (рис. 6) видно, что для образца с диаметром отверстия 7 мм полосы макролокализации деформации представляют 4 «лепестка», ориентированные в направлении $\sim \pm 45^\circ$ относительно оси нагружения. Для отверстия с диаметром 10 мм два «лепестка» с одной из сторон начинают объединяться в единую область, в то время как в образце с диаметром отверстия 13 мм формируется единая область макролокализации деформации, в пределах которой сложно выделить отдельные «лепестки» локализованной деформации.

Заключение

С использованием комбинированного метода исследования деформации и разрушения «тензометрия–DIC–АЭ» проведено изучение деформационного поведения образцов УУКМ с отверстием при одноосном статическом растяжении. Показано, что:

1. Изменение всех трех информативных параметров ($d\sigma/dt$, интенсивность деформации сдвига, активность АЭ) имеет трехстадийный характер независимо от диаметра отверстия в образце. При этом третья стадия связана с активным вовлечением в деформирование углеродных волокон, что сопровождается возрастанием информативных параметров тензометрии и АЭ.
2. Увеличение диаметра центрального отверстия сопровождается снижением предела прочности и относительного удлинения образцов в момент разрушения.

3. Данные о характерных стадиях деформирования, полученные методом корреляции цифровых изображений, являются наименее информативными, что связано с наблюдением лишь за верхним (внешним) слоем образца УУКМ, а также их крайне низкой пластичностью.
4. С точки зрения одновременного использования данных, получаемых всеми тремя методами, можно заключить, что: а) метод акустической эмиссии обладает высокой чувствительностью и способностью характеризовать процессы, происходящие в объеме материала; б) тензометрия обладает меньшей, чем АЭ чувствительностью, но интегрально характеризует макроотклик образца и наглядно позволяет определить переход от одной стадии деформирования к последующей; в) метод корреляции цифровых изображений требует использования большего разрешения оптической системы и позволяет визуализировать деформационные процессы, развивающиеся во внешнем слое с получением численной оценки локальной деформации.

Таким образом, использование предложенного комбинированного подхода является перспективным и взаимодополняющим методом исследования УУКМ. Дальнейшее развитие этого способа НК связано с применением его для усталостных испытаний волокнистых КМ.
Работа выполнена в рамках Комплексного проекта г/б исследований СО РАН III.20.1.3.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Серьезнов А.Н., Степанова Л.Н., Тихонравов А.Б. и др. Использование метода акустической эмиссии и тензометрии при проверке остаточной прочности самолета // Дефектоскопия. – 2008. – № 2. – С. 28–35.
2. Степанова Л.Н., Лебедев Е.Ю., Кабанов С.И. и др. Исследование разрушения образцов из стеклопластиков с использованием методов акустической эмиссии и тензометрии // Дефектоскопия. – 2009. – № 2. – С. 39–47.
3. Любутин П.С., Панин С.В. Измерение деформации на мезоуровне путем анализа оптических изображений поверхности нагруженных твердых тел // Прикладная механика и техническая физика. – 2006. – Т. 47. – № 6. – С. 158–164.
4. Ключниченко А.Б., Панин С.В., Старцев О.В. Исследование деформации и разрушения на мезо и макромасштабном уровнях армированных пластиков при статическом и циклическом растяжении // Физическая мезомеханика. – 2002. – Т. 5. – № 3. – С. 101–116.
5. Панин С.В., Бяков А.В., Гренке В.В. и др. Многомасштабное исследование стадийности локализованной пластической деформации при растяжении образцов сплава Д16АТ надрезами акустико-эмиссионным и оптико-телевизионным методами // Физическая мезомеханика. – 2009. – Т. 12. – № 6. – С. 63–72.
6. Панин С.В., Бяков А.В., Любутин П.С., Башков О.В. Стадийность локализованной пластической деформации при растяжении образцов сплава Д16АТ по данным акусто-эмиссии, картирования деформации на поверхности и тензометрии. Ч. 1. Образцы с отверстиями различного диаметра // Дефектоскопия. – 2011. – № 9. – С. 47–61.
7. Панин С.В., Бяков А.В., Любутин П.С., Башков О.В. Стадийность локализованной пластической деформации при растяжении образцов сплава Д16АТ по данным акусто-эмиссии, картирования деформации на поверхности и тензометрии. Ч. 2. Образцы с надпилами различной глубины // Дефектоскопия. – 2011. – № 12. – С. 43–54.
8. Panin S.V., Byakov A.V., Kuzovlev M.S. et al. Testing of automatic system for registration, processing and analysis of acoustic emission data by model signals // Proceedings IFOST'2009. – Ho Chi Ming City, 2009 21–23 October. – V. 3. – P. 202–206.
9. Панин С.В., Бяков А.В., Гренке В.В., Шакиров И.В., Башков О.В. Разработка и испытание лабораторного стенда регистрации и анализа данных акустической эмиссии // Автотметрия. – 2011. – Т. 47. – № 1. – С. 115–128.
10. Панин С.В., Любутин П.С., Буякова С.П. и др. Исследование поведения пористой керамики при одноосном сжатии путем расчета мезоскопических деформационных характеристик // Физическая мезомеханика. – 2008. – Т. 11. – № 6. – С. 77–86.
11. Chamis C.C., Mital S.K. Mesomechanics applied to composites – a matter of scale // Mesomechanics 2000: Proc. of the IIIrd Int. Conf. for Mesomechanics. – Xi'an, 2000. – V. 2. – P. 623–630.

Поступила 16.07.2012 г.