

УДК 534.8

## УЛЬТРАЗВУКОВАЯ ВИЗУАЛИЗАЦИЯ ДИНАМИКИ РАЗРУШЕНИЯ АРМИРОВАННЫХ КОМПОЗИТОВ

© 2021 г. Ю. С. Петронюк<sup>1, 2, \*</sup>, С. А. Титов<sup>2</sup>, В. М. Левин<sup>1</sup>, Т. Б. Рыжова<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Федеральное государственное бюджетное учреждение науки  
Институт биохимической физики имени Н.М. Эмануэля Российской академии наук, Москва, Россия

<sup>2</sup>Федеральное государственное бюджетное учреждение науки  
Научно-технологический центр уникального приборостроения Российской академии наук, Москва, Россия

<sup>3</sup>Федеральное государственное унитарное предприятие  
“Центральный аэрогидродинамический институт имени профессора Н.Е. Жуковского”, Жуковский, Россия

\*E-mail: jps7@mail.ru

Поступила в редакцию 09.12.2020 г.

После доработки 25.01.2021 г.

Принята к публикации 26.02.2021 г.

Представлены результаты исследования структуры образцов, выполненного с помощью импульсного акустического микроскопа, совмещенного со специально разработанной миниатюрной испытательной машиной. Рассматриваются особенности проведения таких экспериментов. Показана возможность измерения деформации образца при его механических испытаниях неразрушающими методами акустической микроскопии.

DOI: 10.31857/S0367676521060211

### ВВЕДЕНИЕ

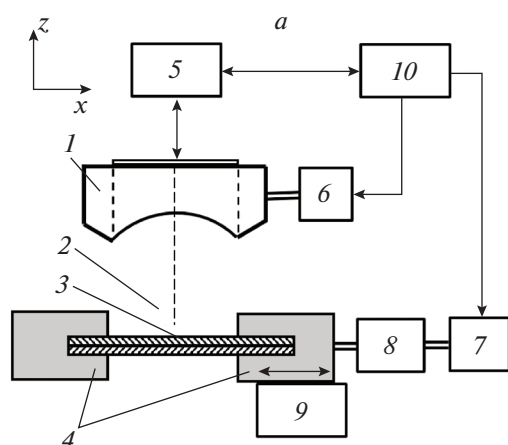
Ультразвук широко используется для визуализации, неразрушающего контроля, оценки структуры и дефектов в объеме армированных композитов [1–7]. Возможности ультразвуковой техники определяются типом зондирующего излучения и диапазоном используемых частот. Ультракороткие импульсы фокусированного ультразвука, длительностью 1.5–2 колебания в диапазоне частот 50–200 МГц обеспечивают акустическую визуализацию элементов внутренней микроструктуры армированных композитов на глубине до 4–5 мм, в зависимости от частоты зондирующего излучения, свойств отдельных компонентов композита и качества их упаковки. На акустических изображениях отчетливо выявляются протяженные области потери сплошности, даже если расстояние между берегами отслоения оказывается минимальным, как в случае закрытой трещины [8, 9]. К числу отображаемых несплошностей принадлежат зоны отслоения полимерного связующего от волокон, трещины в объеме связующего между волокнами, трещины между слоями (межслоевые отслоения).

В данной работе импульсная акустическая микроскопия используется для наблюдения процессов необратимого деформирования и разрушения композитного материала, которые включают в себя совокупность структурных изменений в объеме свя-

зующего, внутри армирующих слоев и на границах между ними [10]. Эта проблема привлекает внимание исследователей с момента появления композитов; их изучение остается актуальным и сегодня, благодаря необходимости вскрыть механизмы необратимого деформирования на уровне микроструктурных изменений [11].

Первоначально, изучение микроструктуры и ее нарушений осуществлялось разрушающими методами – образец разрезался на серию плоских сечений, микроструктура на поверхности наблюдалась и оценивалась стандартной техникой оптической или электронной микроскопии. В последние десятилетия бурно развивается техника неразрушающей визуализации объемной микроструктуры [12]; в рамках такого подхода перспективным оказывается метод импульсной акустической микроскопии – он обладает достаточно высоким разрешением (10–100 мкм) и сохраняет преимущества ультразвуковых методов – простой, безопасный, довольно быстрый, не требующий специальных условий и тщательной подготовки образцов [13].

В работе рассматривается подход, при котором импульсный акустический микроскоп объединен с испытательной машиной в единый комплекс, что открывает возможность прямого наблюдения в реальном масштабе времени структурных изме-



**Рис. 1.** Схема экспериментального стенда: 1 – преобразователь; 2 – иммерсионная среда; 3 – образец; 4 – захваты; 5 – электронный блок; 6 – механический сканер; 7 – двигатель; 8 – датчик силы; 9 – энкодер; 10 – компьютер (а); и его общий вид (б).

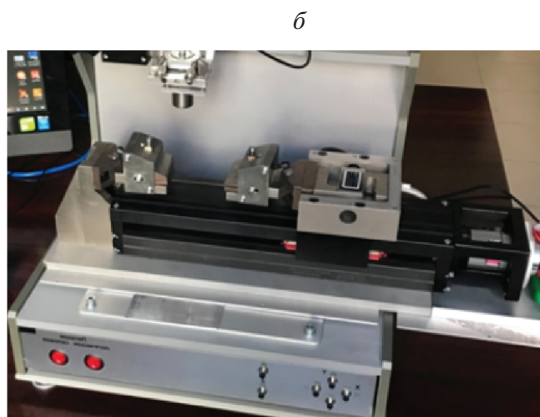
нений в объеме образцов, зарождения и накопления дефектов, процессов релаксации.

## МЕТОДЫ И ОБРАЗЦЫ

В основе метода импульсной акустической микроскопии лежит зондирование образца фокусированным ультразвуковым пучком в иммерсионной капле [14, 15]. Зондирующее излучение представляет собой импульс длительностью 1–2 периода на рабочей частоте от 50 МГц и выше. Объемная визуализация обеспечивается разделением по времени эхоимпульсов, отраженных от границ раздела на разной глубине в объеме объекта.

Для изучения процессов разрушения композитного материала использовался импульсный микроскоп с рабочей частотой акустического объектива 100 МГц. Сканирование образцов осуществлялось за счет прецизионного перемещения акустической линзы с шагом до 15 мкм, при этом обеспечивалось пространственное разрешение акустических изображений порядка 30 мкм на всю глубину образца. Ультразвуковая визуализация выполнялась непосредственно в процессе растягивающего воздействия на образец. Для этого импульсный акустический микроскоп сопрягался с горизонтальной испытательной минимашинной с максимальной нагрузкой 5500 Н, конструкция которой обеспечивает доступ акустической линзы к области растяжения (рис. 1). Растяжение производилось со скоростью 10 мм/мин; параллельно с ультразвуковой визуализацией снималась кривая нагружения образца.

Образцы углепластиков формировались в виде 4-слойных пластин из слоев волокон (препрега) Т800SC-24 К/ER450 с 35% содержанием эпоксидного связующего и чередующейся ориентацией (90/45)<sub>2</sub> волокон. Толщина слоев в образцах



составляла 0.13 мм. Были сформированы пластинки размером 100 × 15 мм. Образцы-пластинки растягивались поэтапно с шагом 200 Н до потери пластиной целостности, в нашем случае до нагрузки 2000 Н. В конце каждого этапа нагружения выполнялась визуализация внутренней структуры образца при постоянной величине нагрузки. В процессе визуализации формируется 3D объемное изображение образца с площадью сечения 15 × 15 мм<sup>2</sup>. Использование электронных ворот по глубине позволяет рассматривать структуру отдельных слоев композита в виде двумерных акустических изображений (С-сканов). Латеральное разрешение определяется, как обычно, длиной волны излучения и угловой апертурой зондирующего пучка. В нашем случае ультразвуковой пучок с рабочей частотой 100 МГц и 22° обеспечивает разрешение порядка 30–60 мкм в углепластиках.

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

На рис. 2. показана динамика микроструктурных изменений в объеме углепластика при возрастании растягивающих усилий – 800, 1200, 1600 и 2000 Н. Структура композита содержит многочисленные границы раздела между армирующими элементами и связующим. При минимальной нагрузке или в ее отсутствие на акустических изображениях слоев наблюдается параллельная укладка углеродных волокон в слоях препрега (рис. 2а).

Структурные повреждения, внесенные действием растягивающих нагрузок, являются, в первую очередь, нарушениями сплошности. Обширная трещина, параллельная плоскости сканирования, на акустических изображениях наблюдается в виде яркой области на соответствующей глубине; при этом на изображениях нижерасположенных слоев

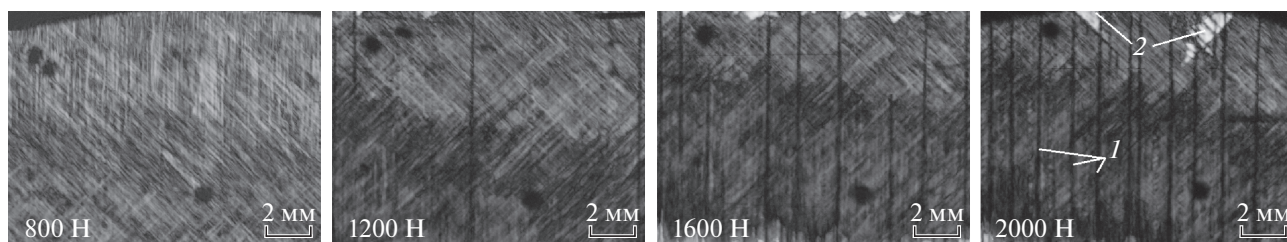


Рис. 2. Акустические изображения поврежденной структуры углепластика  $(90/45)_{2S}$  в процессе растяжения с усилием от 800 до 2000 Н: (1) отслоения волокон с  $90^\circ$  ориентацией; (2) отслоения и разрушение волокон в слоях  $45^\circ$ .

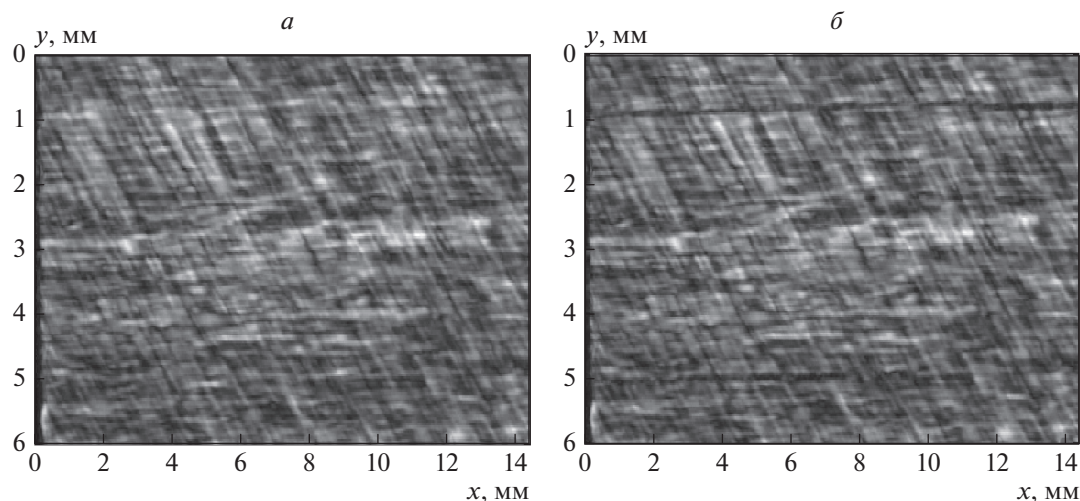


Рис. 3. Изображения  $I_1, I_2$ , полученные при нагрузках 1200 (а) и 1400 Н (б).

наблюдается тень. Тень может также формироваться наклонными или вертикальными трещинами, отражение от которых не попадает в апертуру акустического объектива. Кроме того, низкий уровень принимаемого сигнала может быть обусловлен наличием на пути зондирующего пучка скопления повреждений малого размера – менее разрешающей способности системы визуализации; звук рассеивается на таких дефектах структуры, что препятствует его распространению в нижележащий слой. На рис. 2 показана микроструктура образцов при нагрузках 1200 Н. На изображениях наблюдаются тени – вертикальные линии, количество которых увеличивается с ростом нагрузки (рис. 2б–2г). При таких нагрузках возникают повреждения связанные с отслоением связующего от углеродных нитей в слоях с ориентацией волокон, перпендикулярной направлению нагрузки [16]. При больших нагрузках 1600 и 2000 Н наблюдаются также межслоевые отслоения – яркие треугольные области вверху у кромки образца (рис. 2в, 2г).

Основным достоинством предложенного в работе подхода *in situ* ультразвуковой визуализации

нагруженных образцов является возможность наблюдать зарождение и развитие повреждений, рост их числа с увеличением нагрузки. Однако часть повреждений предвестников разрушения материала формируют лишь тени и могут остаться необнаруженными на фоне картины исходной естественной структуры композита. Далее авторами предлагается алгоритм цифровой обработки изображений, который позволяет повысить выявляемость таких дефектов и определять деформацию образца.

### ЦИФРОВАЯ ОБРАБОТКА ИЗОБРАЖЕНИЙ

На рис. 3 представлены фрагменты акустических изображений для одного из образцов углепластика. Изображения получены при нагрузках 1200 и 1400 Н в слое толщиной 100 мкм на глубине 300 мкм и позволяют видеть структуру обоих слоев волокон с ориентацией  $45^\circ$  и  $90^\circ$  к направлению нагрузки. При построении и обработке акустических изображений использовались ультразвуковые пространственно-временные сигналы  $s_0(x, y, t)$  и  $s_1(x, y, t)$ , записанные для испытываемого образца

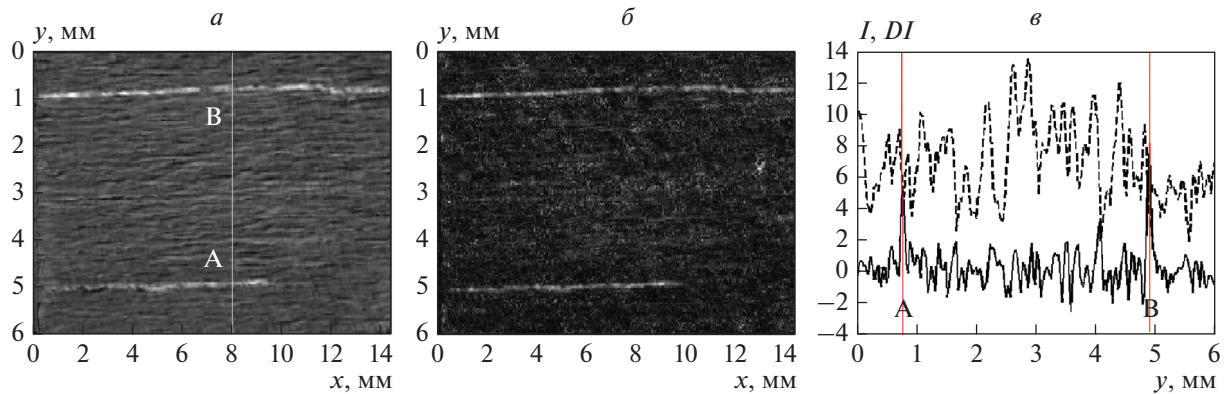


Рис. 4. Изображения  $DI$  (а),  $DI_0$  (б) и зависимости  $I_2(y)$  (пунктир) и  $DI(y)$  при  $x = 8$  мм (в).

при указанных выше нагрузках. Ультразвуковые данные при текущей механической нагрузке, обрабатывались в нескольких этапов.

На первом этапе осуществлялась компенсация кривизны поверхности образца и ее непараллельности по отношению к плоскости сканирования. Для этого измерялись задержки  $\tau_0(x, y)$  и  $\tau_1(x, y)$  эхо-сигналов, отраженных от внешней границы образца, и путем интерполяции по временной переменной формировались сигналы  $s_0(x, y, t - \tau_0(x, y))$  и  $s_1(x, y, t - \tau_1(x, y))$ .

На следующем этапе обработки производилась компенсация общего смещения образца, неизбежно возникающего в экспериментальной установке из-за деформаций элементов конструкции экспериментальной установки с течением времени при изменении механической нагрузки. Величина такого смещения определялась методом корреляции изображений. На изображениях, измеренных для разных нагрузок, выделялись квадратные области, и для них находилась нормированный коэффициент корреляции [17]. Положение максимума рассчитанного коэффициента корреляции показывает величины относительного смещения изображений в направлениях  $x$  и  $y$ . Размер выделенных областей с одной стороны был достаточно большим для получения состоятельной оценки коэффициента корреляции, с другой — он был малым по сравнению с размером всего изображения. Как показывают проведенные исследования, величина такого общего смещения образцов может быть весьма значительной, достигая нескольких десятых долей миллиметра [18].

После компенсации общего смещения определялось распределение смещений локальных участков образца — дальнейшей деформацией образца при возрастании нагрузки. Для этого на опорном и текущем изображениях выделялись пары областей небольшого размера, которые были равномерно расположены в узлах квадратной

сетки. Для каждой пары выбранных окон рассчитывался коэффициент корреляции, и определялось поле смещений в продольном и поперечном направлениях.

Предложенный метод обработки ультразвуковых данных был опробован при испытаниях образцов четырехслойного углепластика (45/90)<sub>S</sub> при возрастающей от 0 до 1400 Н нагрузке. Эксперименты [18] показывают, что величины продольных и поперечных деформаций растут приблизительно линейно и достигают значений +1.2 и -0.3%, соответственно. Полученные значения максимальных деформаций находятся в соответствии со значениями других авторов [16].

Вместе с тем компенсация поля относительной деформации образца, приобретаемой при изменении нагрузки, позволяет привести получаемые изображения к единому пространственному масштабу и корректно вычлест стационарную часть изображений. В качестве примера на рис. 3 приведены изображения  $I_1(x, y)$ ,  $I_2(x, y)$ , полученные при нагрузках 1200 и 1400 Н, соответственно. Изображения были получены при установке электронных ворот по времени задержки так, чтобы визуализировать границу первого и второго слоев. На изображениях наблюдается сильный структурный шум, характерный для ультразвуковых изображений углепластиков на данной частоте. Изображения выглядят практически идентичными и образование дефектов, вызванных увеличением нагрузки, зафиксировать на фоне шума представляется затруднительным.

Для выявления дефектов, образующихся при нарастании нагрузки, получаем разностное изображение  $DI(x, y)$  (рис. 4а):

$$DI(x, y) = I_1(x, y) - I_2(x, y). \quad (1)$$

Видно, что исходная структура на изображении  $DI(x, y)$  существенно менее выражена по сравнению

с исходными изображениями  $I_1(x, y)$  и  $I_2(x, y)$ ; однако отчетливо выделяются два протяженных дефекта А и В, ориентированных перпендикулярно приложенной нагрузке вдоль нитей в верхнем слое  $90^\circ$ . Эффективность подавления структурного шума демонстрирует сравнение графиков зависимостей  $I_2(y)$  и  $DI(y)$ , отнесенных к координате  $x = 8$  мм (рис. 4б). В результирующей зависимости  $DI(y)$  уверенно обнаруживаются пики А и В, образованные соответствующими повреждениями структуры. В исходной же зависимости  $I_2$  (пунктир) отклики от дефектов скрыты структурным шумом, и их обнаружение представляется затруднительным. Следует отметить, что дальнейшее испытание образца и оптическое наблюдение его состояния после разрушения подтверждает тот факт, что в указанных местах присутствует протяженные трещины, выходящие на поверхность.

Вариантом отображения обработанных данных является формирование в виде акустического изображения разности принятых сигналов  $s_0$  и  $s_1$  в соответствии с выражением:

$$DI_0(x, y) = \max\{|s_0(x, y, t) - s_1(x, y, t)|\}. \quad (2)$$

Результат такой обработки показан на рис. 4б. Как видно, на этом изображении также присутствуют отчетливые отклики повреждений. Нужно отметить, что в настоящий момент затруднительно сказать, какой из вариантов разностной обработки является более предпочтительным. Предварительные оценки показывают, что расчет по формуле (1) дает более устойчивые результаты при расположении дефектов в верхних слоях, а расчет по формуле (2) – наоборот, для глубоко расположенных. Для объяснения наблюдаемой особенности необходимы дальнейшие исследования.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Ультразвуковая визуализация высокого разрешения является эффективным методом для изучения изменений в структуре композита под действием внешней механической нагрузки. Метод позволяет выявлять производственные дефекты и повреждения, полученные в процессе внешнего воздействия. Контраст акустических изображений определяется соотношением импедансов компонентов композита, связан с размерами и геометрической формой структурных элементов. Для повышения выявляемости структурных изменений и исследования их взаимного влияния разработан уникальный стенд для ультразвуковой визуализации *in situ*. Разработана методика оценки акустических изображений, позволяющая путем корреляционной обработки количественно характеризовать смещение структурных элементов композитной среды при разных нагрузках. Показано, что обработка изображений

позволяет определять деформацию образца, неточности в измерениях которой неизбежно возникают непосредственно в процессе нагружения из-за смещения элементов конструкции.

Экспериментальная часть работ выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 18-29-17039), а теоретическое рассмотрение при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Guillaud N., Froustey C., Dau F. et al.* // Compos. Struct. 2015. V. 121. P. 172.
2. *Andreades C., Mahmoodi P., Ciampa F.* // Compos. Struct. 2018. V. 206. P. 456.
3. *Петрониюк Ю.С., Мороков Е.С., Левин В.М. и др.* // Изв. РАН. Сер. физ. 2018. Т. 82. № 5. С. 560; *Petrynyuk Y.S., Morokov E.S., Levin V.M. et al.* // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2018. V. 82. No. 5. P. 491.
4. *Wang X., Yao L., Huang Z.* // Compos. Struct. 2019. V. 222. Art. No. 110913.
5. *Mardanshahia A., Shokrieha M.M., Kazemirad S.* // Compos. Struct. 2020. V. 235. Art. No. 111790.
6. *Petrynyuk Y.S., Levin V.M., Ryzhova T.B. et al.* // J. Phys. Conf. Ser. 2020. V. 1636. Art. No. 012005.
7. *Morokov E., Levin V., Chernov A. et al.* // Compos. Struct. 2021. V. 256. Art. No. 113102.
8. *Левин В.М., Мороков Е.С., Петрониюк Ю.С.* // Изв. РАН. Сер. физ. 2017. Т. 81. № 8. С. 1053; *Levin V.M., Morokov E.S., Petronyuk Y.S.* // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2017. V. 81. No. 8. P. 950.
9. *Ahmed S.R., Saka M.* // NDT E Int. 2000. V. 33. P. 261.
10. *Браутман Л., Крок П.* Композиционные материалы. Т. 5. Разрушение и усталость. М.: Мир, 1978. 488 с.
11. *Wright P., Moffat A.J., Renault A. et al.* // JCST. 2010. V. 70. No. 10. P. 1444.
12. *Levin V., Petronyuk Y., Morokov E. et al.* // Polym. Eng. Sci. 2019. P. 2508.
13. *Закутайлов К.В., Левин В.М., Петрониюк Ю.С.* // Завод. лаб. 2009. № 8. С. 28.
14. *Tittmann B., Miyasaka C., Guers M. et al.* Non-destructive evaluation (NDE) of aerospace composites: acoustic microscopy. Cambridge: Woodhead Publishing Ltd., 2013. P. 423.
15. *Maslov K., Kim R.Y., Kinra V.K. et al.* // Compos. Sci. Technol. 2000. V. 60. P. 2185.
16. *Naderi M., Iyyer N.* // Compos. Struct. 2020. V. 234. Art. No. 111659.
17. *Gonzalez R.C., Woods R.E.* Digital image processing. New Jersey: Prentice Hall, 2002. 793 p.
18. *Titov S.A., Levin V.M., Petronyuk Y.S. et al.* // J. Phys. Conf. Ser. 2020. V. 1636. Art. No. 012025.

**Ultrasonic visualization of the fracture dynamics for reinforced composites****Yu. S. Petronyuk<sup>a, b, \*</sup>, S. A. Titov<sup>b</sup>, V. M. Levin<sup>a</sup>, T. B. Ryzhova<sup>c</sup>**<sup>a</sup>*Emanuel Institute of Biochemical Physics of the Russian Academy of Sciences, Moscow, 119334 Russia*<sup>b</sup>*Scientific and Technological Center of Unique Instrument Engineering of the Russian Academy of Sciences, Moscow, 117342 Russia*<sup>c</sup>*Central Aerohydrodynamic Institute, Zhukovsky, 140180 Russia**\*e-mail: jps7@mail.ru*

The structure of the samples was studied using a pulsed acoustic microscope combined with a specially designed miniature testing machine. The features of such experiments realizing are considered. It is shown the possibility to measure the deformation of a sample during mechanical tests using non-destructive acoustic microscopy methods.