

**В.Н. Аксенов, Л.В. Афанасьев, Е.Б. Черепецкая**

## **ВИЗУАЛИЗАЦИЯ ВНУТРЕННЕЙ СТРУКТУРЫ УГЛЕРОДНЫХ КОМПОЗИТОВ МЕТОДОМ ЛАЗЕРНОЙ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ СПЕКТРОСКОПИИ**

Проведенная в режиме эхоскопии на лазерно-ультразвуковом структуроископе «ГЕОСКАН-02МУ» неразрушающая диагностика внутренней структуры углеродных композитов позволила построить изображения их слоев, демонстрирующие наличие дефектов в виде расслоений.

Ключевые слова: визуализация, углеродные композиты, лазерный ультразвук.

---

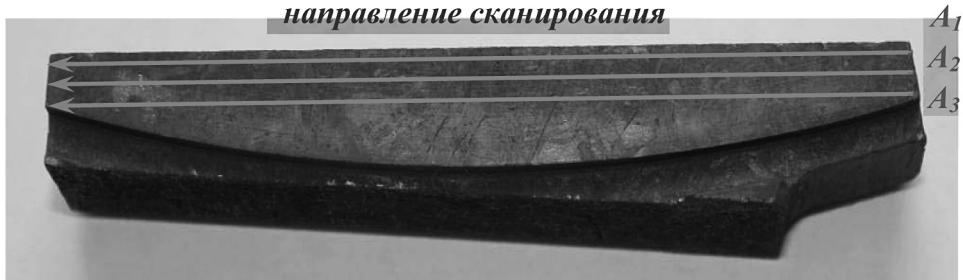
### **Введение**

**К**омпозиционные материалы системы углерод-углерод были созданы в начале шестидесятых годов прошлого столетия одновременно с появлением высокопрочных углеродных волокон. Эти материалы содержат углеродный армирующий элемент в виде дискретных волокон, непрерывных нитей или жгутов, войлоков, лент, тканей с плоским и объемным плетением, а также объемных каркасных структур. Углеродная матрица объединяет в одно целое армирующие элементы в композите, что приводит к наилучшему восприятию различных внешних нагрузок. Определяющими факторами при выборе материала матрицы являются состав, структура и свойства кокса [1, 2]. Композиционные углеграфитовые материалы (углепластики), созданные на основе углеродных волокон и углеродной матрицы, наиболее термостойки. Они способны долго выдерживать в инертных или восстановительных средах температуру до 3000 °C. Плотность таких материалов полтора раза превосходит плотность графита, при этом прочность значительно выше. Из углепластиков делают используемые в ракето- и самолетостроении высокотемпературные узлы, а также электротермическое оборудование.

Неразрушающий контроль структуры и свойств таких материалов, определение модулей их упругости, обнаружение изменений внутренней структуры под действием различных нагрузок сталкиваются с рядом трудностей, т.к. оптическая микроскопия не дает информации о внутренней структуре образцов, а классические методы ультразвуковой диагностики оказываются неприменимыми из-за сильного затухания упругим волн в углепластиках. Часто о возникающих изменениях судят лишь по активности акустической эмиссии [1, 2]. Наиболее перспективным методом для визуализации внутренней структуры в этом случае является лазерная ультразвуковая спектроскопия [3, 4].

### **Описание экспериментальной установки**

Для проведения экспериментов нами использовался лазерно-ультразвуковой структуроископ «ГЕОСКАН-02МУ», предназначенный для измерений скорости продольных ультразвуковых волн и визуализации внутренней структуры образцов не только геоматериалов, но и различных конструкционных материалов (металлов, сплавов, керамик, пластмасс, композитных материалов) при одностороннем доступе к объекту контроля в режиме эхоско-



**Рис. 1. Образец со стороны плоскости, перпендикулярной направлению расположения волокон. Стрелками обозначены направления сканирования**

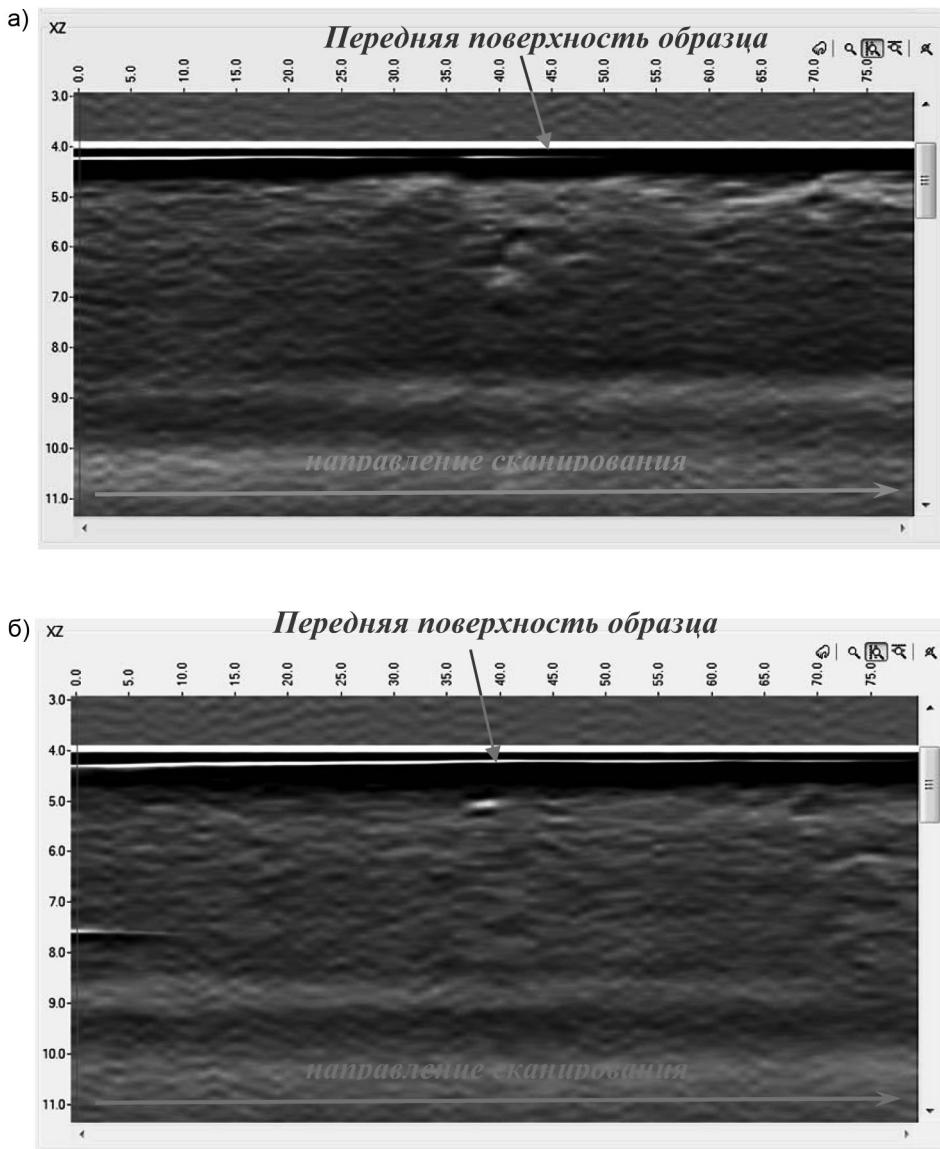
ии [3, 4]. Принцип работы прибора основан на лазерном термооптическом возбуждении ультразвуковых импульсов продольных акустических волн длительностью в сотни наносекунд и амплитудой в несколько мегапаскалей в специальном широкополосном оптико-акустическом преобразователе и измерении скорости распространения этих импульсов в исследуемом образце геоматериала при одностороннем доступе преобразователя к образцу. По известной толщине образца и измеряемой разности времен прихода на пьезоприемник преобразователя зондирующего ультразвукового импульса и сигнала, отраженного от тыльной поверхности образца, рассчитывается скорость продольных ультразвуковых волн в образце. Методика обработки сигналов основана на спектральном анализе и обратной фильтрации (деконволюции) ультразвукового сигнала, прошедшего в образец и отраженного от его тыльной поверхности, с зондирующим (опорным) сигналом оптико-акустического преобразователя [3, 4].

Основными элементами установки являлись: оптоэлектронный блок с импульсным Nd:YAG-лазером LCM-DTL-324QT с диодной накачкой и модуляцией добротности, адаптер оптического волокна SMA205 с частотой повторения импульсов не менее 0,01 кГц и аналогово-цифровой преоб-

разователь. Лазер использовался для термооптического возбуждения широкополосных ультразвуковых сигналов. Широкополосный оптико-акустический преобразователь обеспечивал ультразвуковое облучение контролируемого образца и пьезоэлектрическую регистрацию рассеянных акустических сигналов. Односторонний доступ к образцу достигался ручным или автоматическим прижимом преобразователя к его лицевой поверхности через тонкий слой дистиллированной воды или другой жидкости. Исследования проводились с образцами из углерод-углеродных композитных материалов. На рис. 1 представлена фотография одного из них со стороны среза, перпендикулярного направлению волокон в образце. Сканирование проводилось вдоль линий A1, A2, A3.

## Результаты

На рис. 2 представлены типичные результаты сканирования вдоль линий A1(а) и A2 (б) в автоматическом режиме работы преобразователя. На изображениях указано положение передней поверхности образца, направление сканирования и слабо (из-за большого затухания ультразвукового импульса) просматривается его тыльная сторона. На них виден сложный характер строения приповерхностного слоя, а также наличие областей



**Рис. 2. Сканирование вдоль линий А1(а) и А2(б) в автоматическом режиме**

незначительных дефектов (более светлые области рис. 2, а) и сильные расслоения (светлые области, рис. 2, б). Таким образом, лазерно-ультразвуково-

вая дефектоскопия дает возможность визуализировать внутреннюю структуру композита и локализовать области ее нарушений.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Углеродные волокна и углекомпозиты / Под. ред. Э. Фитцера. – М.: Мир, 1988.
2. Лысенко А.А., Грибанов А.В., Асташкина О.В., Тарасенко А.А. Композиционные материалы системы углерод-углерод. – СПб., 2006.
3. Карабутов А.А., Макаров В.А., Черепецкая Е.Б., Шкуратник В.Л. Лазерно-ультразвуковая спектроскопия горных пород. – М.: Горная книга, 2008.
4. Карабутов А.А., Лысенко П.Ю., Панасьян Л.П., Подымова Н.Б., Черепецкая Е.Б., Афанасьев Л.В., Пашкин А.И. Исследование анизотропии серпентинов методом лазерной ультразвуковой спектроскопии // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2013. – № 3. – С. 232–236. ГИАБ

## КОРОТКО ОБ АВТОРАХ

Аксенов Владимир Николаевич – доцент, МГУ им. М.В. Ломоносова  
Афанасьев Лев Владимирович – аспирант, ИБО НИТУ «МИСиС»  
Черепецкая Елена Борисовна – доктор технических наук, профессор, МГИ НИТУ «МИСиС».

UDC 622.611:620.179.16

## VISUALIZATION OF THE INTERNAL STRUCTURE OF THE CARBON COMPOSITES BY LASER ULTRASONIC SPECTROSCOPY

Aksenov V.N., Assistant Professor, Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia,  
Afanasyev L.V., Graduate Student, Institute of Basic Education,  
National University of Science and Technology «MISiS», 119049, Moscow, Russia,  
Cherepetskaya E.B., Doctor of Technical Sciences, Professor, Moscow Mining Institute,  
National University of Science and Technology «MISiS», 119049, Moscow, Russia.

*The non-destructive diagnostics of the internal structure of carbon composites made with laser-ultrasonic structurescope GEOSCAN-02MU, working in echoscopy regime make it possible to characterize inter layers of composites with defects in the form of breaking.*

*Key words:* visualization, carbon composites, laser ultrasound.

## REFERENCES

1. *Uglerodnye volokna i uglekompozity*. Pod. red. E. Fittsera (Hydrocarbon fibers and coal composites. E. Fittser (Ed.)), Moscow, Mir, 1988.
2. Lysenko A.A., Gribanov A.V., Astashkina O.V., Tarasenko A.A. *Kompozitsionnye materialy sistemy uglerod-uglerod* (Hydrocarbon-hydrocarbon composites), Saint-Petersburg, 2006.
3. Karabutov A.A., Makarov V.A., Cherepetskaya E.B., Shkuratnik V.L. *Lazerno-ul'trazvukovaya spektroskopiya gornykh porod* (Laser-and-ultrasonic spectroscopy of rocks), Moscow, Gornaya kniga, 2008.
4. Karabutov A.A., Lysenko P.Yu., Panas'yan L.L., Podymova N.B., Cherepetskaya E.B., Afanas'ev L.V., Pashkin A.I. *Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten'*. 2013, no 3, pp. 232–236.



**Нет смысла доверять разрекламированным авторитетам, логичнее оценивать инженерные проекты, публикации, стратегические идеи.**