УДК 653.3

**А.А. Карабутов, Нгуен Суан Мань,
Фам Мань Хао, Е.Б. Черепецкая, И.А. Шибаев**

О ВОЗМОЖНОСТИ КОНТРОЛЯ СТРУКТУРЫ И СВОЙСТВ ФИБРОБЕТОНА МЕТОДОМ ЛАЗЕРНО-УЛЬТРАЗВУКОВОЙ СТРУКТУРОСКОПИИ

Повышение требований к безопасности зданий и сооружений привело к созданию высокопрочных и высококачественных бетонов прочностью на сжатие 100 МПа и выше, водонепроницаемостью W12 и выше; морозостойкостью не менее F400, а также углепластиков, углерод-углеродных композитов, стеклопластиков. Улучшение характеристик данных конструкционных материалов связано с использованием различных упрочняющих волокон. В работе приведен обзор методов неразрушающего контроля для диагностики структуры и свойств гетерогенных сред, описаны их недостатки. Предлагается для оценки локальных модулей упругости, пористости, расслоений и других дефектов метод лазерной ультразвуковой структуроскопии. Для углепластиковых композитов на основе оптико-акустических измерений получены локальные значения скоростей распространения продольных волн, построены 2D изображения их внутренней структуры.
Ключевые слова: фибробетоны, конструкционные материалы, неразрушающий контроль, лазерно-ультразвуковая структуроскопия.

Введение

Ужесточение требований к безопасности зданий и сооружений привело к необходимости улучшения физико-механических свойств и долговечности строительных материалов, применяемых при строительстве, реконструкции и ремонте. Наиболее широко применяемые цементные бетоны, обладая высокой прочностью на сжатие, имеют сравнительно низкие показатели прочности при растяжении и изгибе, трещиностойкости [1]. Задачи получения высокопрочных и высококачественных бетонов прочностью на сжатие 100 МПа и выше, необходимых при строительстве высотных зданий, платформ для нефтедобычи в морях и океанических шельфах и других уникальных сооружений стали очень актуальными в конце XX –

ISSN 0236-1493. Горный информационно-аналитический бюллетень. 2016. № 7. С. 32–41.
© 2016. А.А. Карабутов, Нгуен Суан Мань, Фам Мань Хао, Е.Б. Черепецкая, И.А. Шибаев.

начале XXI в. Достаточно упомянуть 125-этажный небоскреб высотой 610 м в Чикаго, крепь шахтных выработок в крепких породах на глубине 2130 м в Онтарио (Канада), шахты Персивиран в сильно деформируемых грунтах (Западная Австралия), мост через пролив Акаси в Японии с центральным пролетом в 1990 м, туннель под Ла-Маншем и т.п. В это же время был реализован опыт использования фибробетонов в гражданском строительстве и в России [2]. Это первые два тоннеля в метрополитенах Москвы и Санкт-Петербурга. В них использовалась стальная анкерная фибра итальянской компания OFFICINE MACCAFERRI, которая производит стальную фибру под торговой маркой WIRAND®.

Высококачественные бетоны обеспечивают высокие гарантированные параметры эксплуатационной надежности зданий и сооружений в условиях сложных воздействий окружающей среды и нагрузок, значительно сокращают сроки строительства и уменьшают инвестиционные риски. На сегодняшний день отработаны принципиально новые эффективные технологические схемы получения новых видов бетонов с широким диапазоном эксплуатационных характеристик за счет варьирования в широких пределах вида сырьевых материалов (вяжущих и заполнителей), разновидностей, способа и стадии введения химических модификаторов и активных минеральных добавок, оптимизации состава многокомпонентного бетона и целенаправленного управления технологией.

Получены бетоны с классами по прочности на сжатие от B40 и выше до B90 в высокими темпами твердения (их прочность в возрасте суток естественного твердения 25–30 МПа), водонепроницаемостью W12 и выше; морозостойкостью не менее F400 [2]. При столь высокой прочности на сжатие плотность данных бетонов значительно меньше. Это связано в первую очередь с тем, при изготовлении стандартного бетона вес арматуры составляет 150 кг/м^3, а фибры колеблется от 5 кг/м^3 до 40 кг/м^3. В последнее время возрастают требования к разработкам экологически чистых и энергосберегающих материалов. В этом случае в качестве альтернативы для стали используются мононити целлюлозных волокон [3], включающие лен, коноплю, гибискус, геополимеры [4, 5], полимерные композиты, углерод-углеродные композиты, стеклопластики и др., что приводит к еще большему уменьшению веса конструкций при значительном увеличении их прочности. Однако на сегодняшний день при многообразии типов новых конструкционных

материалов они применяются в основном в Европейских странах, США и Японии [2]. Более того, не до конца изучены их физико-механические свойства. Так, например, не существует методов изучения реологических свойств фибробетонов в процессе их естественного твердения, нет эффективных методов неразрушающего контроля, позволяющих определять пористость материала и локальные модули упругости, измерять нарушенность конструкционных материалов в виде расслоений, трещин, которые возникают в результате циклических нагрузок и термоупругих напряжений. Несмотря на большое число публикаций в зарубежной литературе (см., например обзор [3], посвященных фибробетонам и другим композиционным материалам, используемым в современном строительстве, основное внимание в них уделено лишь синтезу новых материалов [5–7], теоретическому расчету их модулей упругости [6], моделированию методом конечных элементов их поведения при одноосном сжатии [7] и разрушающим или полуразрушающим механическим испытаниям [8]. Такие неразрушающие методы контроля как рентгеновская и нейтронная томография фибробетонов (см., например, [9]), дающие информацию о внутренней структуре образцов, требуют высококвалифицированного персонала, а исследование с необходимым разрешением возможно проводить лишь на малых образцах в течение длительного времени и в лабораторных условиях. Традиционные ультразвуковые методы, использующие для возбуждения и приема упругих волн, пьезопреобразователи оказываются неэффективными при исследовании гетерогенных сред из-за сильного поглощения ими акустических колебаний [10]. Применение акусто-лазерной виброметрии [10], термографии [11] не позволяют локализовать дефекты конструкционных материалов, определять поврежденность их внутренней структуры.

В связи с этом оказывается перспективным разработка нового метода диагностики структуры и свойств современных конструкционных материалов, используемых в гражданском строительстве, на основе контактной лазерно-ультразвуковой структуроскопии. Созданный в США метод бесконтактной лазерно-ультразвуковой спектроскопии [12] позволяет исследоватьструктурууглерод-полимерныхкомпозитовтолщинойлишь менее 5 мм. Применение контактного метода [12, 13] с использованием уникальных научных установок «ГЕОСКАН-02М» и «ГЕОСКАН-02МУ», разработанных в рамках ФЦП, и лазерно-ультразвукового дефектоскопа УДЛ-2М, созданного также

в России, показало возможность исследования структуры и свойств образцов горных пород с толщиной до 2 см [12] и металломатричных композитов с толщиной до 15 мм [13].

В настоящей работе на примере углерод-эпоксидных композитов показана возможность проведения неразрушающего контроля композиционных материалов, определения их пористости, расслоения, возникновения микротрещин на основе контактной лазерно-ультразвуковой структуроскопии.

Метод и аппаратура

Для измерений используется лазерно-ультразвуковой дефектоскоп (модель УДЛ 2М), который состоит из оптоэлектронного блока, оптоволоконного кабеля, широкополосного оптико-акустического преобразователя, информационно-измерительного комплекса, персонального компьютера, соединительного кабеля связи портов 2.0, исследуемого образца.

В оптоэлектронный блок входят импульсный Nd:YAG лазер LCM-DTL-324QT с диодной накачкой и модуляцией добротности. Длина волны 1064 нм, максимальная энергия импульса 300 мкДж, максимальная мощность 1,5 Вт, длительность импульса менее 10 нс. Данный лазер служит для термооптического возбуждения широкополосных ультразвуковых сигналов. Также в блок входит аналого-цифровой преобразователь. Широкополосный оптико-акустический преобразователь предназначен для ультразвукового облучения контролируемого образца и пьезоэлектрической регистрации рассеянных акустических сигналов. С помощью оптоволоконного кабеля лазерное излучение доставляется в оптико-акустический преобразователь. Информационно-измерительный комплекс включает в себя систему цифровой записи и накопления информации на базе персонального компьютера. Комплекс предназначен для организации автоматизированного сбора, математической обработки сигналов и отображения результатов измерений на мониторе компьютера. Соединительный кабель используется для связи аналого-цифрового преобразователя с информационно-измерительным комплексом.

В работе был использован широкополосный оптико-акустический преобразователь с прямым вводом акустического пучка. Схема данного преобразователя показана на рис. 1, а внешний вид – на рис. 2. В таком преобразователе лазерный импульс падает через прозрачную призму под углом на лицевую поверхность специального оптико-акустического источника, представ-

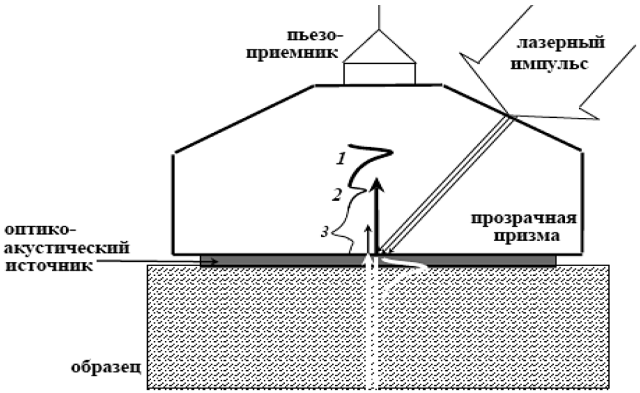

Рис. 1. Схема широкополосного прямого оптико-акустического преобразователя

ляющего собой плоскопараллельную пластину из поглощающего свет пластика. Прозрачная призма находится в акустическом контакте с оптико-акустическим источником и является одновременно звукопроводом широкополосного пьезоэлектрического приемника. Односторонний доступ к исследуемому образцу обеспечивается при ручном прижиме преобразователя к лицевой поверхности образца через тонкий слой дистиллированной воды или другой жидкости. При поглощении лазерного импульса в приповерхностном слое оптико-акустического источника происходит термооптическое возбуждение ультразвукового импульса продольных акустических волн известной временной формы, которая определяется коэффициентом поглощения света в оптико-акустическом источнике и граничными условиями возбуждения. Этот ультразвуковой импульс распространяется как в источнике (а затем в образец), так и в прозрачную призму-звукопровод. Импульс *1*, возбуждаемый в приповерхностном

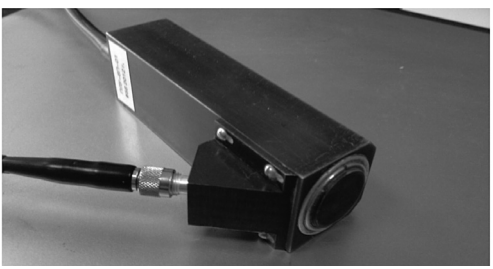

Рис. 2. Внешний вид широкополосного прямого оптико-акустического преобразователя

слое оптико-акустического источника, прошедший звукопровод и зарегистрированный пьезоприемником, является зондирующим или опорным в данном преобразователе. Такой же ультразвуковой импульс *2*, изображенный на рисунке белым цветом, проходит в оптико-акустический источник и частично отражается на границе раздела источника и лицевой (облучаемой) поверхности образца из-за рассогласования их акустических импедансов. Этот отраженный импульс *2* проходит в звукопровод с временной задержкой относительно импульса *1*, которая равна времени двойного пробега импульса *1* по толщине пластины оптико-акустического источника. Оставшаяся часть зондирующего импульса проходит в образец и отражается от его тыльной поверхности. Сигнал *3* зондирующего импульса проходит в образец и отражается от его тыльной поверхности, попадает в призму-звукопровод и тоже регистрируется пьезоприемником с некоторой временной задержкой относительно прихода сигнала *2*.

Скорость продольных ультразвуковых волн в исследуемом образце определяется по разности времен прихода на пьезоприемник минимума ультразвукового импульса *3*, отраженного от тыльной поверхности образца, и экстремума импульса *2*, отраженного от границы раздела оптико-акустический источник – образец (максимума – в случае, когда акустический импеданс исследуемой среды больше импеданса источника, и минимума – в противоположном случае).

Для определения скорости звука в образце при измерении прямым оптико-акустическим преобразователем использовалась специальная программа DSV Первый положительный пик, зарегистрированный в момент около 4 мкс, является опорным импульсом, возбуждаемым в оптико-акустическом источнике преобразователя. Второй пик, зарегистрированный через ~0,22 мкс, соответствует части опорного импульса, прошедшего в оптико-акустический источник и отраженного на границе раздела оптико-акустического источника и исследуемого объекта из-за рассогласования их акустических импедансов. Этот импульс может приходить как в фазе с опорным импульсом (если импеданс объекта контроля больше импеданса пластика оптико-акустического генератора), так и в противофазе – при обратном соотношении импедансов. Первый отрицательный пик (в противофазе с опорным пиком), следующий за этими сигналами, соответствует ультразвуковому импульсу, отраженному от свободной тыльной поверхности объекта контроля.

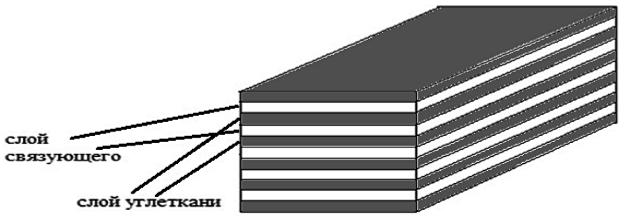

Рис. 3. Схематическое изображение исследуемых образцов

Материал

Исследовались образцы однонаправленных углепластиковых композитов двух типов. Первые из них состояли из 6 слоев углеродных волокон и 5 слоев эпоксидного связующего (схематически данные образцы изображены на рис. 3), вторые – из 10 слоев волокон и 9 слоев связующего со специально заложенными дефектами с поперечными размерами порядка 0,1 мм и продольными порядка 3 мм.

Толщина углеродных волокон составляла 0,09 мм.

Результаты

Были измерены также скорости распространения продольных волн в 100 точках каждого образца с точностью 0,1%. Разброс значений скоростей от точки к точке составил 6%, а сама скорость изменялась от 2520 м/с до 2680 м/с. Это свидетельствовало о наличии пор, расслоений и избытке связующего в различных точках образца. В результате обработки полученных акустических треков было построено 2D изображение внутренней структуры образцов (рис. 4) с заложенными дефектами.

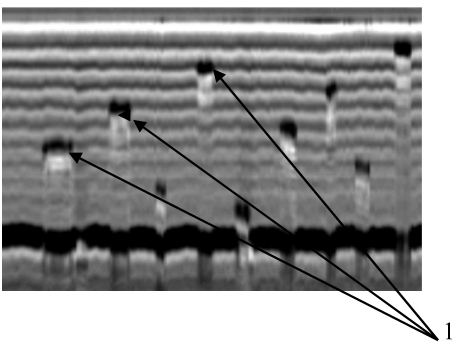

Рис. 4. 2D изображение внутренней структуры композита из 10 углеродных слоев с заложенными дефектами (1)

Заключение

Таким образом, проведенные исследования углепластиков показали перспективность применения лазерно-ультразвукового метода для контроля структуры и свойств композиционных материалов, включая фибробетоны.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Zielinski A. J., Reinhardt H. W.* Stress-strain behaviour of concrete and mortar at high rates of tensile loading. Original Research Article Cement and Concrete Research, Vol. 12 (1982), 3, pp. 309–319.

2. СТО НОСТРОЙ 2.6.54-2011.

3. *LiboYan, Bhumil Kasal, Liang Huang.* Areviewofrecent research on the use of cellulosic fibres, their fibre fabric reinforced cementitious, geopolymer and polymer composites in civil engineering // Composite Part B, 92(2016), pp. 94–132.

4. *Obinna Onuaguluchi, Nemkumar Banthia.* Plant-based natural fibre reinforced cement composites: A review // Cement and Concrete Composites, 68, (2016), pp. 96–10.

5. *Eik M., Puttonen J., Herrmann H.* An orthotropic material model for steel fibre reinforced concrete based on the orientation distribution of fibres // Composite Structures, 121 (2015), pp. 324–336.

6. *Yao Y., Silva F. A., Butler M., Mechtcherine V., Mobasher B.* Tension stiffening in textile-reinforced concrete under high speed tensile loads // Cement and Concrete Composites, 64 (2015), pp. 49–61.

7. *Dimas Alan Strauss Rambo, Flávio de Andrade Silva, Romildo Dias Toledo Filho, NevenUkrainczyk, Eddie Koenders.* Tensile strength of a calcium-aluminate cementitious composite reinforced with basalt textile in a high-temperature environment // Cement and Concrete Composites, 70(2016) pp. 183–193.

8. *Hyun-Do Yun, Won-Chang Choi, Soo-Yeon Seo.* Acoustic emission activities and damage evaluation of reinforced concrete beams strengthened with CFRP sheet s// NDT & E International, 43, 7(2010), pp. 615–628.

9. *Ponikiewski T., Katzer J.* X-ray computed tomography of fibre reinforced selfcompacting concrete as a tool of assessing its flexural behaviour // Materials and Structures (2015) DOI 10.1617/s11527–015-0638-y.

10. *Chen J. G., Haupt R. W., Buyukozturk O.* Operational and defect parameters concerning the acoustic-laser vibrometry method for FRP-reinforced concrete // NDT & E International, 71(2015), pp. 43–53.

11. Palumbo D., Tamborrino R., Galietti U., Aversa P., Tatì A., Luprano V. A. M. Ultrasonic analysis and lock-in thermography for debonding evaluation of composite adhesive joints // NDT&EInternational, 78, (2016), pp. 1–9.

12. *Ivan Pelivanov, Takashi Buma, Jinjun Xia, Chen-Wei Wei, Matthew O'Donnell.* A new fiber-optic non-contact compact laser-ultrasound scanner for fast non-destructive testing and evaluation of aircraft composites // J. Appl. Phys. 115, 113105 (2014); http://dx.doi.org/10.1063/1.4868463

13. *Karabutov A. A., Cherepetskaya E. B., Sokolovskaya Y. G., Morozov D. V., Vinnikov V. A.* Study of Effects of Weathering Factors on Internal

Structure of Rocks by Laser Ultrasonic Spectroscopy. Applied Mechanics and Materials, vol.843(2016), pp. 51–58, http://www.scientific.net. ГИАБ

КОРОТКО ОБ АВТОРАХ

Карабутов А.А.[1] – доктор физико-математических наук,
зав. лабораторией, профессор МЛЦ МГУ им. М.В. Ломоносова,
Нгуен Суан Мань – доктор технических наук,
директор института прикладной механики и информатики
Вьетнамской Академии наук,
Фам Мань Хао – доктор технических наук,
помошник директора Центра по развитию высоких технологий
Вьетнамской Академии наук,
Черепецкая Е.Б.[1] – доктор технических наук, профессор,
e-mail: echerepetskaya@mail.ru,
Шибаев И.А.[1] – студент,
[1] НИТУ «МИСиС»

Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'. 2016. No. 7, pp. 32–41.

UDC 653.3

A.A. Karabutov, Nguen Xuan Man, Pham Manh Hao, E.B. Cherepetskaya, I.A. Shibaev

THE POSSIBILITY OF CONTROLLING THE STRUCTURE AND PROPERTIES OF FIBER-REINFORCED CONCRETE METHOD OF LASER-ULTRASONIC STRUCTUROSCOPY

The possibility of controlling the structure and properties of fiber-reinforced concrete method of laser-ultrasonic testing. Increased safety requirements for buildings and structures has led to the creation of high-strength and high-grade concrete with compressive strength of 100 MPa and higher, water resistance W12 and higher, frost resistance not less than the F400, as well as carbon fiber reinforced, carbon-carbon composites, fiberglass. Improved structural characteristics of these materials is associated with various reinforcing fibers. The paper provides an overview of non-destructive testing methods for the diagnosis of the structure and properties of heterogeneous media, described their shortcomings. It is proposed to assess the local modulus of elasticity, porosity, bundles, and other defects using laser ultrasonic structuroscopy. For carbon fiber reinforced composites based on optico-acoustic measurements obtained local values of the velocity of longitudinal waves, built 2D images of their internal structure.

Key words: fibro concrete, construction materials, non-destructive testing, laser-ultrasound structuroscopy.

AUTHORS

Karabutov A.A.[1], Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Head of Laboratory, Professor, International Educational and Scientific Laser Center,
Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia,
Nguen Xuan Man, Doctor of Technical Sciences, Director,
Institute of Applied Mechanics and Informatics Vietnamese Academy of Science,

Pham Manh Hao, Doctor of Technical Sciences, Deputy Director,
Centre for High Technology Development, Vietnam Academy of Science,
Cherepetskaya E.B.[1], Doctor of Technical Sciences, Professor,
e-mail: echerepetskaya@mail.ru,
Shibaev I.A.[1], Student,
[1] National University of Science and Technology «MISiS»,
119049, Moscow, Russia.

REFERENCES

1. Zielinski A.J., Reinhardt H.W. Stress-strain behaviour of concrete and mortar at high rates of tensile loading. *Original Research Article Cement and Concrete Research*, Vol. 12 (1982), 3, pp. 309–319.

2. STO NOSTROY 2.6.54-2011.

3. LiboYan, Bhumil Kasal, Liang Huang. Areviewofrecent research on the use of cellulosic fibres, their fibre fabric reinforced cementitious, geo-polymer and polymer composites in civil engineering. *Composite Part B*, 92(2016), pp. 94–132.

4. Obinna Onuaguluchi, Nemkumar Banthia. Plant-based natural fibre reinforced cement composites: A review. *Cement and Concrete Composites*, 68, (2016), pp. 96–10.

5. Eik M., Puttonen J., Herrmann H. An orthotropic material model for steel fibre reinforced concrete based on the orientation distribution of fibres. *Composite Structures*, 121 (2015), pp. 324–336.

6. Yao Y., Silva F.A., Butler M., Mechtcherine V., Mobasher B. Tension stiffening in textile-reinforced concrete under high speed tensile loads. *Cement and Concrete Composites*, 64 (2015), pp. 49–61.

7. Dimas Alan Strauss Rambo, Flávio de Andrade Silva, Romildo Dias Toledo Filho, NevenUkrainczyk, Eddie Koenders. Tensile strength of a calcium-aluminate cementitious composite reinforced with basalt textile in a high-temperature environment. *Cement and Concrete Composites*, 70(2016) pp. 183–193.

8. Hyun-Do Yun, Won-Chang Choi, Soo-Yeon Seo. Acoustic emission activities and damage evaluation of reinforced concrete beams strengthened with CFRP sheets. *NDT & E International*, 43, 7(2010), pp. 615–628.

9. Ponikiewski T., Katzer J. X-ray computed tomography of fibre reinforced selfcompacting concrete as a tool of assessing its flexural behaviour. *Materials and Structures* (2015) DOI 10.1617/s11527–015-0638-y.

10. Chen J.G., Haupt R.W., Buyukozturk O. Operational and defect parameters concerning the acoustic-laser vibrometry method for FRP-reinforced concrete. *NDT & E International*, 71(2015), pp. 43–53.

11. Palumbo D., Tamborrino R., Galietti U., Aversa P., Tatì A., Luprano V.A.M. Ultrasonic analysis and lock-in thermography for debonding evaluation of composite adhesive joints. *NDT & E International*, 78, (2016), pp. 1–9.

12. Ivan Pelivanov, Takashi Buma, Jinjun Xia, Chen-Wei Wei, Matthew O'Donnell. A new fiber-optic non-contact compact laser-ultrasound scanner for fast non-destructive testing and evaluation of aircraft composites. *J. Appl. Phys.* 115, 113105 (2014); http://dx.doi.org/10.1063/1.4868463

13. Karabutov A.A., Cherepetskaya E.B., Sokolovskaya Y.G., Morozov D.V., Vinnikov V.A. Study of Effects of Weathering Factors on Internal Structure of Rocks by Laser Ultrasonic Spectroscopy. *Applied Mechanics and Materials*, vol. 843(2016), pp. 51–58, http://www.scientific.net.