

УДК 389.001

Обоснование выбора параметров ультразвукового контроля углепластиков для обнаружения расслоений и ударных повреждений

Григорьев М. В.¹, Прилуцкий М. А.¹,
Щипаков Н. А.^{1,*}

^{*}shchipak@yandex.ru

¹МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

Особенности технологии производства и эксплуатации углепластиков определяют характерные только им типы дефектов. Кроме того, структура материала углепластика и его свойства существенно отличаются от структуры и свойств металлических материалов. Поэтому, актуальной задачей является проведение исследований для обоснования выбора параметров ультразвукового контроля таких материалов. Авторами проведены экспериментальные исследования на образцах из углепластика с выполненными искусственными дефектами, имитирующими расслоения различного размера и ударные повреждения, и приведены конкретные рекомендации по контролю качества таких материалов, включая схемы и параметры контроля.

Ключевые слова: углепластик, ультразвуковой контроль, ударное повреждение, расслоение

Введение

Применение полимерных композиционных материалов, и в частности углепластиков, требует проведения неразрушающего контроля конструкций из них, существенно отличающегося от технологий и процедур контроля металлических материалов и полуфабрикатов [1]. Различия в структуре углепластика и металла, их акустических и других свойств, наличия в углепластике характерных только им типов дефектов требуют проведения исследований для обоснования выбора параметров ультразвукового контроля таких материалов.

В отечественных и зарубежных изданиях имеется большое количество статей, в которых описаны методы контроля углепластиков, в том числе пористости, структуры, прочностных характеристик. Так, например, в [2] говорится о способе оценки содержа-

ния армирующих волокон в углепластике, в [3] и [4] авторы приводят способы оценки прочностных характеристик монолитных углепластиков при помощи ультразвукового метода. В статье [5] и др. описана возможность использования лазерного возбуждения импульсов упругих колебаний для определения пористости углепластиков в авиаконструкциях. Способам обнаружения макродефектов, таких как ударные повреждения, расслоения, непрочности и др., посвящены статьи [6] – [7] и многие другие, однако в них подробно описаны возможные методы акустического контроля, подходящие для той или иной конструкции или для обнаружения того или иного дефекта, или подробно описано различное оборудование, которое возможно применить для решения таких задач, однако в данных работах отсутствует обоснование выбора конкретных параметров ультразвукового контроля углепластиков.

Целью исследования было дать рекомендации для контроля качества углепластиков на предмет наличия в нем расслоений и ударных повреждений. В результате экспериментальных исследований на образцах из углепластика с выполненными искусственными дефектами даны конкретные обоснованные рекомендации по контролю качества таких материалов, включая схемы и параметры контроля.

Основная часть

Постановка задачи: Экспериментальные исследования на образцах с искусственными дефектами влияния частоты ультразвуковых колебаний на параметры контроля: чувствительность, коэффициент затухания.

Для проведения экспериментальных исследований были изготовлены плоские монолитные образцы толщиной 4 мм. Образцы были выполнены из углеродной ткани УТР1000-12-400П на основе нити Т700GC-12к и эпоксидного связующего Т-31. В образцах были выполнены искусственных дефекты, имитирующие расслоения и ударные повреждения.

Для имитации расслоений в середину толщины образцов были заложены фторопластовые пленки толщиной 0,4 мм различного диаметра – 4, 8 и 12 мм.

Ударные повреждения выполнялись методом, предполагающим свободное падение груза сферической формы с определенной высоты. Энергия удара составила 50 Дж.

Поскольку ориентация расслоений и ударных повреждений в углепластиках параллельна поверхности исследования [9] проводились стандартными серийными прямыми совмещенными преобразователями (угол ввода 0°) на частоту 2,5, 5 и 10 МГц. Измерялась амплитуда принятых эхо-сигналов на бездефектных участках и на участках с искусственными дефектами, рассчитывалось отношение сигнал шум и коэффициент затухания.

Влияние частоты на затухание ультразвука в материале образцов показано на рисунке 1. На рисунке 2 показано отношение сигнал-шум на искусственных дефектах (фторопластовых пленках) различного диаметра d при контроле на различных частотах.

Исследования показывают, что при увеличении частоты ультразвуковых колебаний увеличивается их затухание, т.е. обнаружение дефектов на большой глубине будет за-

труднено. С другой стороны, из рисунка 2 видно, что при увеличении частоты ультразвуковых колебаний увеличивается отношение сигнал-шум на дефектах различного размера, т.е. при увеличении частоты увеличивается и чувствительность контроля. Контроль может считаться достоверным, когда отношение сигнал-шум превышает 6дБ. Однако, повторяемость результатов, представленных на рисунке 2, для частоты 5 МГц составила 100%, а для частоты 10 МГц 80%, т.е. дефекты диаметром 4 и 8 мм на частоте 10 МГц были обнаружены лишь четырех случаях из пяти.

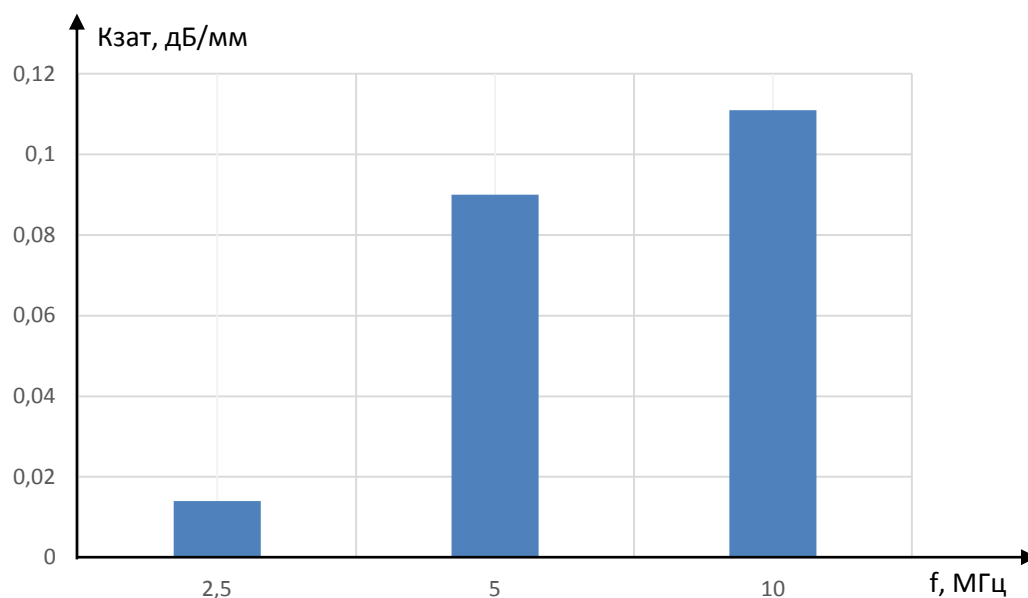


Рис. 1. Влияние частоты на затухание ультразвуковых колебаний в материале образцов

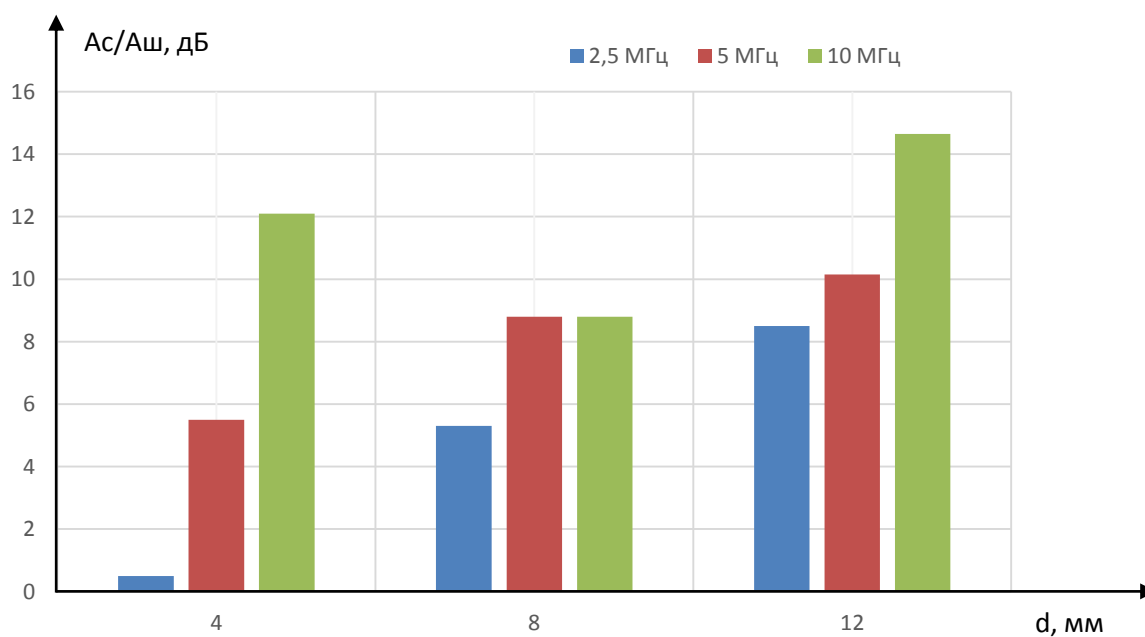


Рис. 2. Отношение сигнал-шум на искусственных дефектах различного диаметра

Исходя из выше указанного, наиболее оптимальными частотами для ультразвукового контроля углепластиков являются частоты в районе 5 МГц.

Кроме того, из рисунка 2 видно, что на частоте 5 МГц отношение сигнал-шум на дефекте диаметром 4 мм не превышает 6 дБ, поэтому для обнаружения дефектов малых размеров рекомендуется использовать фокусировку ультразвукового пучка, которую можно добиться при использовании фазированных антенных решеток. На рисунке 3 представлены результаты эксперимента на дефектоскопе Isonic 2009 [10] с использованием 16-ти элементной решетки, работающей в эхо-импульсном режиме на частоте 4 МГц с апертурой 4 элемента.

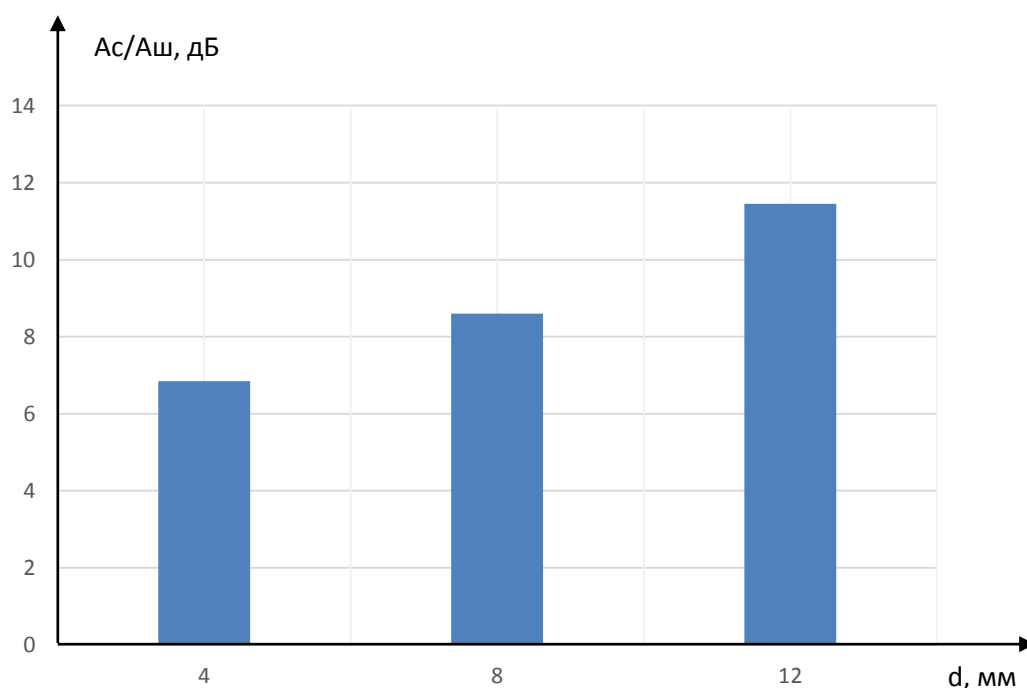


Рис. 3. Отношение сигнал-шум на дефектах различного размера при контроле фазированной решеткой на частоте 4 МГц

Обнаружение же ударных повреждений эхо-импульсным методом ультразвукового контроля не возможен из-за того, что отсутствует эхо-сигнал от такого типа дефектов. Ударное повреждение вызывает межслоевое растрескивание материала на значительной глубине или даже по всей его толщине. Наиболее оптимальным методом ультразвукового контроля для поиска такого типа дефектов является зеркально-теневой метод, который основан на измерении амплитуды донного сигнала. Амплитуда ультразвуковых колебаний, проходящих через зону ударного повреждения, в значительной степени уменьшается. Результаты исследований амплитуды донных эхо-сигналов в бездефектных зонах образцов и в зонах с ударными повреждениями представлены на рисунке 4. Амплитуда донного сигнала в бездефектной зоне в среднем на 14 дБ выше, чем в зоне с ударными повреждениями.

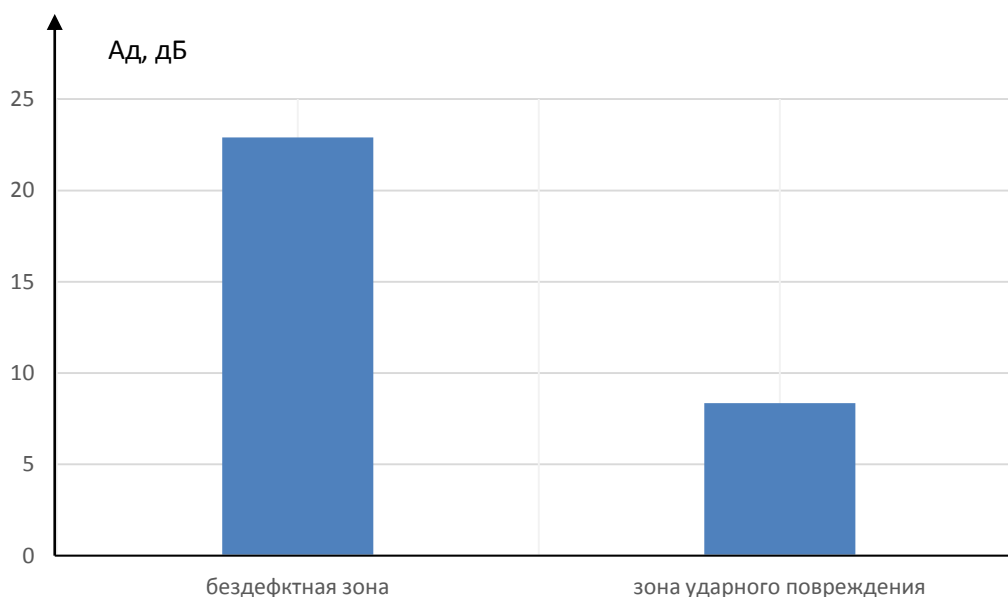


Рис. 4. Амплитуда донного сигнала в образце в бездефектной зоне и в зоне с ударными повреждениями

Заключение

Таким образом, экспериментальные исследования показали, что для контроля углепластиков на предмет наличия в нем расслоений и ударных повреждений следует применять комбинацию эхо-импульсного и зеркально-теневого методов ультразвукового контроля. Наибольшей чувствительности и достоверности контроля можно добиться при использовании фазированных антенных решеток на частоте 4-5 МГц. Результаты получены в рамках проекта, поддержанного РФФИ.

Список литературы

1. Алешин Н.П., Григорьев М.В., Щипаков Н.А. Современное оборудование и технологии неразрушающего контроля ПКМ // Инженерный вестник. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электрон. журн. 2015. №1. С. 533-538. Режим доступа: <http://engbul.bmstu.ru/doc/754392.html> (дата обращения 28.05.2015).
2. Wrobel G., Wierzbicki L., Pawlak S. A method for ultrasonic quality evaluation of glass/polyester composites // Archives of Materials Science and Engineering. vol. 28. iss.12. pp. 729-734.
3. Мурашов В.В., Мишуrow К.С., Сорокин К.В. Оценка прочности углепластиков в монолитных конструкциях при сдвиге и сжатии методами неразрушающего контроля // Контроль. Диагностика. 2011. №10.
4. Мурашов В.В., Генералов А.С., Мишуrow К.С. Определение прочностных характеристик полимерных композиционных материалов в монолитных конструкциях ультразвуковым методом // Все материалы. Энциклопедический справочник. 2012. №10.

5. Мурашов В.В. Определение пористости углепластиков в авиаконструкциях лазерно-акустическим методом // Авиационная промышленность. 2011. №3.
6. Shen Q., Omar M., Dongri S. Ultrasonic NDE Techniques for Impact Damage Inspection on CFRP Laminates // Journal of Materials Science Research. 2012. vol. 1. №1. DOI: [10.5539/jmsr.v1n1p2](https://doi.org/10.5539/jmsr.v1n1p2)
7. Мурашов В.В., Манаева З.И. Акустические методы и средства неразрушающего контроля изделий из полимерных композиционных материалов и многослойных клеевых конструкций // Авиационная промышленность. 1982. №8.
8. Мурашов В.В., Румянцев А.Ф. Дефекты монолитных деталей и многослойных конструкций из полимерных композиционных материалов и методы их выявления. Часть 2. Методы выявления дефектов монолитных деталей и многослойных конструкций из полимерных композиционных материалов // Контроль. Диагностика, 2007, №5.
9. Алёшин Н.П. Физические методы неразрушающего контроля сварных соединений: учебное пособие. 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 2013. 576 с.
10. Olympus NDT. Introduction to Phased Array Ultrasonic Detection. USA, Waltham, 2004.

Justification of Selecting Ultrasonic Testing Parameters for Bundle and Impact Damage Detection in Carbon-Fiber Constructions

M.V. Grigoriev¹, M.A. Prilutskiy¹,
N.A. Shchipakov^{1,*}

[*shchipak@yandex.ru](mailto:shchipak@yandex.ru)

¹Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

Keywords: carbon-fiber, ultrasonic testing, impact damage, bundle

Features of manufacturing process and use of carbon fibre-reinforced plastics (CFRP) define specific types of only their defects. Furthermore, the CFRP structure material and its properties considerably differ from those of the metal materials. Therefore, a relevant task is to conduct research to justify the selection of the ultrasonic testing parameters of these materials.

Optimal parameters and recommendations on quality control of such materials were grounded in the course of experimental studies on samples made from the UTR1000-12-400P carbon fabric, based on the T700GC-12K yarn and the T-31 epoxy binder, filled with artificial defects to imitate the bundles of different size and the impact damage.

It is shown that with increasing frequency of the ultrasonic oscillation propagating in the samples there is an increase both in damping and in SNR for artificial defects. In other words, on the one hand, the lower is the oscillation frequency, the less is a damping effect, but, on the other one, the higher is the frequency, the higher is the sensitivity control. It was found that the optimum frequencies for the ultrasonic test of CFRP are those in the vicinity of 5 MHz.

Furthermore, to detect the small-sized defects it is advised to use an ultrasonic beam focus, which can be achieved using phased arrays.

The most optimal method of ultrasonic testing to search for impact damage is a mirror-shadow method, which is based on the measurement of the amplitude of the bottom echo signal. It is shown that the amplitude of the bottom echo signal in defect-free zone is, in average, 14 dB higher than in the area with shock damage.

References

1. Aleshin N.P., Grigor'ev M.V., Shchipakov N.A. Modern equipment and technologies of nondestructive testing PCM. *Inzhenernyi vestnik MGTU im. N.E. Baumana = Engineering Herald of the Bauman MSTU*, 2015, no.1, pp.533-538. Available at: <http://engbul.bmstu.ru/doc/754392.html>, accessed 28.05.2015 (in Russian).

2. Wrobel G., Wierzbicki L., Pawlak S. A method for ultrasonic quality evaluation of glass/polyester composites. *Archives of Materials Science and Engineering*, vol. 28, iss.12, pp. 729-734. (in Russian).
3. Murashov V.V., Mishurov K.S., Sorokin K.V. Shear and compression strength evaluation of carbon-fiber reinforced plastics in solid constructions by non-destructive inspection techniques. *Kontrol'. Diagnostika = Testing. Diagnostics*, 2011, no.10. (in Russian).
4. Murashov V.V., Generalov A.S., Mishurov K.S. Determining the strength characteristics of polymer composites in monolithic structures by ultrasonic method. *Vse Materialy. Entsiklopedicheskii Spravochnik = All of the materials. Encyclopedic reference*, 2012, no. 10. (in Russian).
5. Murashov V.V. Determination of the porosity of carbon plastics in aircraft construction using the laser-acoustic method. *Aviatsionnaya promyshlennost' = Aviation Industry*, 2011, no.3. (in Russian).
6. Shen Q., Omar M., Dongri S. Ultrasonic NDE Techniques for Impact Damage Inspection on CFRP Laminates. *Journal of Materials Science Research*, 2012, vol. 1, no.1. DOI: [10.5539/jmsr.v1n1p2](https://doi.org/10.5539/jmsr.v1n1p2)
7. Murashov V.V., Manaeva Z.I. Acoustic methods and means of nondestructive testing of products made from polymeric composite materials and multilayer adhesive constructions. *Aviatsionnaya promyshlennost' = Aviation Industry*, 1982, no.8. (in Russian).
8. Murashov V.V., Rumyantsev A.F. Defects of solid parts and multi-layer constructions made from polymer composite materials and methods for their detection. Part 2. Methods of detection of defects of solid parts and multi-layer constructions made from polymer composite materials. *Kontrol'. Diagnostika = Testing. Diagnostics*, 2011, no.10. (in Russian).
9. Aleshin N.P. *Fizicheskie metody nerazrushayushchego kontrolya svarnykh soedinenii* [Physical methods of nondestructive control of welded joints]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2013, 576 p. (in Russian).
10. Olympus NDT. *Introduction to Phased Array Ultrasonic Detection*. USA, Waltham, 2004.