

---

Научная статья

УДК 678.8

DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-7-125-133

## ОЦЕНКА ПЛОЩАДИ УДАРНЫХ ПОВРЕЖДЕНИЙ ПКМ РАЗЛИЧНЫМИ МЕТОДАМИ УЛЬТРАЗВУКОВОГО КОНТРОЛЯ

А.С. Бойчук<sup>1</sup>, И.А. Диков<sup>1</sup>, А.С. Генералов<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Национального исследовательского центра «Курчатовский институт», Москва, Россия; admin@viam.ru

**Аннотация.** Статья посвящена оценке площади ударных повреждений в образцах из углепластика после ударных воздействий. Показано, что контроль и оценку размеров повреждений можно проводить ультразвуковыми теневым и эхо-импульсным, а также импедансным методами. Проведен сравнительный анализ оценки площадей ударных повреждений перечисленными методами. Оценку размеров ударных повреждений наибольшей точности можно получить при использовании автоматизированного ультразвукового эхо-импульсного метода с применением фокусированных преобразователей, а также при использовании ультразвуковых фазированных решеток.

**Ключевые слова:** полимерные композиционные материалы (ПКМ), углепластик, ударные повреждения, неразрушающий контроль, ультразвуковые методы, эхо-импульсный метод, теневой метод, импедансный метод

**Для цитирования:** Бойчук А.С., Диков И.А., Генералов А.С. Оценка площади ударных повреждений ПКМ различными методами ультразвукового контроля // Труды ВИАМ. 2022. № 7 (113). Ст. 11. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-7-125-133.

Scientific article

## ESTIMATION OF IMPACT DAMAGES AREA IN FRP BY VARIOUS ULTRASONIC TECHNIQUES

A.S. Boychuk<sup>1</sup>, I.A. Dikov<sup>1</sup>, A.S. Generalov<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Federal State Unitary Enterprise «All-Russian Scientific-Research Institute of Aviation Materials» of National Research Center «Kurchatov Institute», Moscow, Russia; admin@viam.ru

**Abstract.** Estimation of impact damages area in CFRP specimens after impact is described at the article. It is shown that nondestructive testing and damages sizes estimation can be carried out by ultrasonic through transmission, echo and mechanical impedance analysis techniques. A comparative analysis of the estimation of impact damages areas by these techniques was carried out. The best accuracy in estimation of impact damages sizes can be obtained by using an automated ultrasonic echo technique in combination with focused transducers, as well as ultrasonic phased arrays.

**Keywords:** fiber reinforced plastics (FRP), carbon fiber reinforced plastics (CFRP), impact damages, nondestructive testing, ultrasonic techniques, pulse-echo method, through-transmission technique, impedance method

**For citation:** Boychuk A.S., Dikov I.A., Generalov A.S. Estimation of impact damages area in FRP by various ultrasonic techniques. *Trudy VIAM*, 2022, no. 7 (113), paper no. 11. Available at: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-7-125-133.

### Введение

Применение полимерных композиционных материалов (ПКМ) с полимерными матрицами и углеродными и/или стеклянными наполнителями в узлах и конструктивных элементах самолетов, вертолетов, космических аппаратов и другой техники в настоящее время является одной из приоритетных задач во многих отраслях промышленности. Это объясняется тем, что данный класс материалов за счет своих свойств позволяет снизить массу различных конструкций и при этом обеспечить необходимые прочностные характеристики в заданных направлениях. Во всем мире учеными ведутся разработки новых ПКМ и технологических режимов и приемов изготовления из полимерных композитов узлов и конструктивных элементов [1–7]. Как известно, при разработке новых материалов и технологий проводится большое количество различных испытаний, чтобы определить прочностные, химические и другие характеристики, подтверждающие возможность их дальнейшего применения в той или иной конструкции.

В процессе эксплуатации изделий из ПКМ могут появляться дефекты типа ударных повреждений, которые опасны тем, что при их появлении на поверхности изделия визуально может наблюдаться лишь небольшая вмятина от удара, а внутри образовываться огромные расслоения и трещины (рис. 1). Ударные повреждения в изделиях из ПКМ могут появляться как в результате попадания посторонних твердых предметов, так и при воздействии других внешних факторов, например удара молнии.

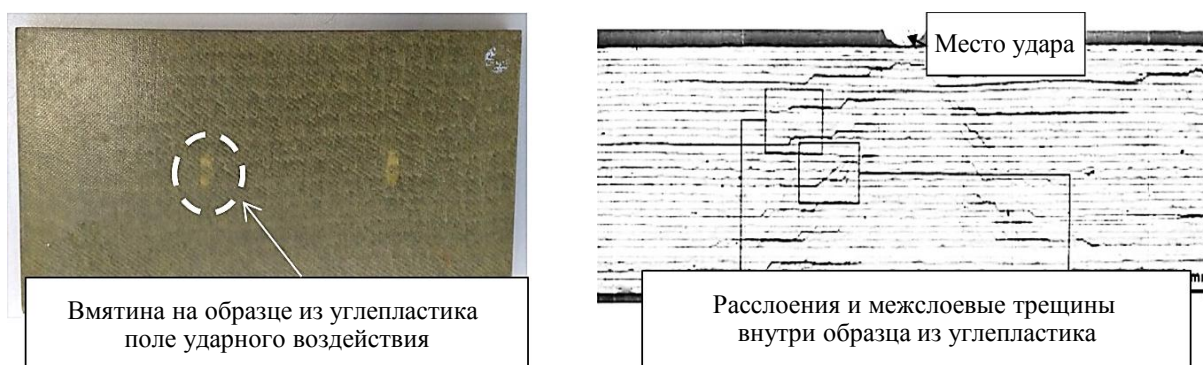


Рис. 1. Вид образца из углепластика после ударного воздействия и металлография ударного повреждения внутри образца

Ударные повреждения под воздействием внешних механических нагрузок и влияния климатических факторов склонны к дальнейшему росту, что в определенный момент может стать причиной разрушения изделия. Поэтому при проведении физико-механических испытаний при разработке новых полимерных композитов немаловажным является определение прочности при сжатии после ударного воздействия. При проведении механических испытаний на сжатие после ударного воздействия в плоских плитах из ПКМ сначала получают ударные повреждения, а затем проводят испытание на сжатие. После ударного воздействия необходимо провести оценку геометрических размеров (площади, ширины и т. д.) получаемого в плите ударного повреждения, которые в дальнейшем могут использоваться для определения расчетной характеристики прочности, а также для понимания того, что получается уже непосредственно после испытаний на сжатие. Размеры ударного повреждения необходимо оценить без разрушения образца, для того чтобы в дальнейшем испытать его на сжатие.

Для обнаружения нарушений сплошности (дефектов) без разрушения материала применяют различные методы неразрушающего контроля. В настоящее время для неразрушающего контроля монолитных плит и изделий из ПКМ широко применяют

акустические методы контроля [8–13]. Наиболее эффективным для решения этой задачи является ультразвуковой эхо-импульсный метод (эхо-метод), суть которого заключается в излучении и приеме отраженных ультразвуковых сигналов от неоднородностей внутри материала и донной поверхности объектов контроля. О наличии дефектов судят по величине амплитуды отраженных ультразвуковых сигналов. Широкое применение метод получил благодаря необходимости обеспечить доступ к объекту контроля только с одной стороны, хорошей чувствительности контроля (можно при благоприятных условиях обеспечить выявление дефектов площадью, эквивалентной площади плоскодонного отражателя диаметром 2 мм) и возможности определения глубины залегания дефектов. Помимо эхо-метода, для контроля монолитных полимерных композиций может использоваться ультразвуковой амплитудный метод прохождения (теневого метод), основанный на излучении и приеме прошедших через объект контроля ультразвуковых сигналов. В данном случае о наличии дефектов внутри материала объекта контроля судят по величине изменения амплитуды прошедшего через материал ультразвукового импульса. Теневой метод применяется в случае контроля тонких (1–2 мм) монолитных изделий, при проведении контроля которых не важна глубина залегания обнаруживаемых дефектов, а также в случаях, когда материал контролируемого изделия обладает достаточно высоким рассеянием (затуханием) ультразвука. Однако, в отличие от эхо-метода, для проведения контроля методом прохождения необходимо обеспечить двусторонний доступ к контролируемому изделию и поддерживать точную соосность излучающего и приемного преобразователей относительно друг друга. Еще одним методом, который может использоваться при проведении контроля монолитных образцов и конструкций из ПКМ, является низкочастотный метод, основанный на оценке изменения механического импеданса (импедансный метод). Основными преимуществами этого метода (как и теневого) являются возможность контроля материала с высоким рассеянием ультразвука в композите и отсутствие необходимости использовать контактную жидкость. К недостаткам можно отнести то, что метод позволяет эффективно выявлять несплошности исключительно до середины толщины материала объекта контроля.

Данная работа по оценке размеров ударных повреждений ультразвуковыми методами неразрушающего контроля выполнена в рамках реализации комплексной научной проблемы 2.3. «Методы неразрушающих исследований и контроля» («Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года») [14].

Работа выполнена с использованием оборудования ЦКП «Климатические испытания» НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ.

### Материалы и методы

С целью проведения работ по исследованию и оценке размеров повреждений, полученных вследствие удара, различными ультразвуковыми методами неразрушающего контроля, способом формования в автоклаве из препрега углепластика получены плоские монолитные образцы размером 100×150 мм толщиной 5 мм. Ударные испытания осуществляли на специальной испытательной машине (копер).

Исследования ультразвуковыми методами осуществляли:

- ультразвуковым эхо-методом – ручным с применением одноэлементного несфокусированного пьезоэлектрического преобразователя (ПЭП) автоматизированным с применением сфокусированного ПЭП и ручным с применением линейной фазированной решетки;
- теневым методом – автоматизированным с применением сфокусированных ПЭП;
- импедансным методом в ручном режиме.

Для проведения ультразвуковых исследований и оценки размеров повреждений использовалось следующее оборудование:

– для эхо-метода в ручном режиме с применением одноэлементных нефокусированных ПЭП – ультразвуковой дефектоскоп Epoch 1000, одноэлементный ПЭП с центральной частотой 5 МГц, призма из полистирола;

– для автоматизированного эхо-метода с применением одноэлементных сфокусированных ПЭП – автоматизированная установка ScanMaster LS-500LP, ультразвуковой сфокусированный ПЭП с фокусным расстоянием 1,5 дюйма и центральной частотой 5 МГц;

– для эхо-метода в ручном режиме с применением линейных фазированных решеток – ультразвуковой дефектоскоп OmniScan MX, 64-элементная линейная фазированная решетка с центральной частотой 5 МГц, призма из полистирола, двухкоординатный сканер;

– для теневого автоматизированного метода с применением одноэлементных сфокусированных ПЭП – автоматизированная установка ScanMaster LS-500LP, два сфокусированных ПЭП с фокусным расстоянием 1,5 дюйма и центральной частотой 2,25 МГц, оправка для соосного позиционирования преобразователей;

– для импедансного метода – акустический импедансный дефектоскоп ДАМИ-С, а также совмещенный преобразователь ПАДИ8-С.

### Результаты

Исследования эхо-методом с использованием автоматизированной установки и сфокусированных ПЭП проводили при полном погружении образцов в ванну с водой (иммерсионный контакт). Манипулятор с преобразователем перемещали по всей площади образца с сохранением результатов сканирования в виде *S*-сканов – цветных изображений результатов исследований на виде сверху, где определенному цвету изображения соответствует определенное значение величины амплитуды ультразвукового сигнала (*S*-скан образца 1 после ударного воздействия изображен на рис. 2, *a*). Оценку размеров ударного повреждения проводили по величине амплитуды ультразвукового эхо-сигнала, отраженного от донной поверхности.

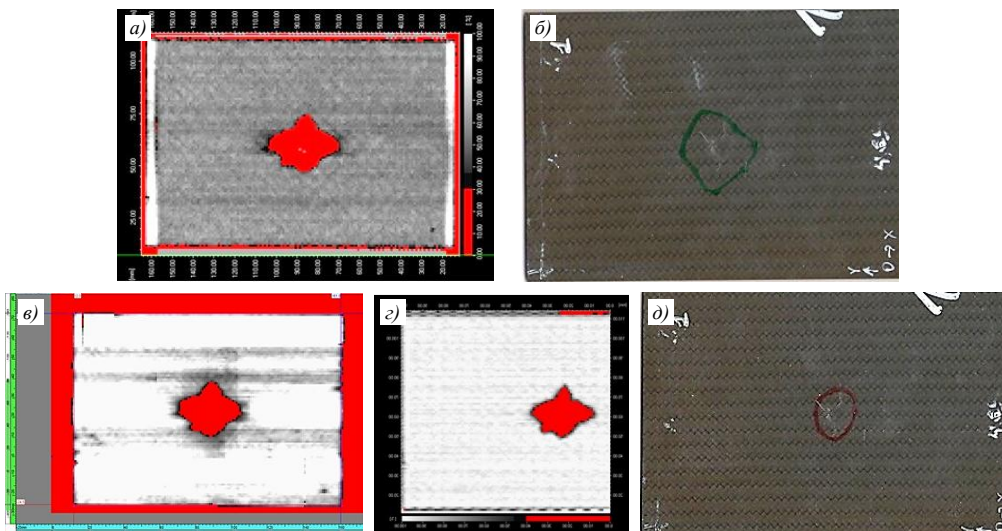


Рис. 2. Дефектограммы образца 1 с ударным повреждением, полученные эхо-методом на автоматизированной установке (*a*) и в ручном режиме (*b*), а также с применением линейной фазированной решетки (*c*); теньевым методом на автоматизированной установке (*c*) и импедансным методом в ручном режиме (*d*)

При проведении сканирования образца эхо-методом, а также низкочастотным импедансным методом в ручном режиме перемещение преобразователя по плите и дальнейшая разметка условных границ дефектов маркером на поверхности образца при срабатывании автоматической сигнализации дефекта осуществлялись дефектоскопистом (рис. 2, б и д). Оценку размера площади осуществляли путем переноса дефектограммы на компьютер и проведения подсчета этого размера в графической программе.

Оценка размеров ультразвуковым эхо-методом с применением линейной фазированной решетки осуществлялась также вручную дефектоскопистом, но с применением механизированного сканера, позволяющего сохранять результаты контроля в виде С-скана (рис. 2, в). В процессе настройки дефектоскопа использовали фокусировку ультразвукового луча решетки в середину толщины образца. Оценку площади проводили с применением персонального компьютера и специализированного программного обеспечения TomoView LiteAnalysis.

При исследовании теньевым методом для обеспечения соосности преобразователей применяли специальную оправку типа скобы, а для создания контакта между преобразователями и исследуемыми образцами с помощью специальных баблеров формировали струю воды диаметром 4,7 мм. В автоматическом режиме манипулятор с закрепленной на нем оправкой с преобразователями перемещался по всей площади образца с сохранением результатов сканирования в виде С-сканов (рис. 2, з).

Результаты подсчета условных размеров повреждений всеми используемыми ультразвуковыми методами приведены в табл. 1.

Таблица 1

**Результаты оценки размеров ударных повреждений в образцах из углепластика различными ультразвуковыми методами**

Условный номер образца	Площадь повреждения, мм <sup>2</sup>	Ширина в плоскости X, мм	Ширина в плоскости Y, мм
Эхо-импульсный автоматизированный метод с одноэлементными сфокусированными ПЭП*			
1	506	27	33
2	470	26	36
Теньевой автоматизированный метод с одноэлементными сфокусированными ПЭП			
1	374	25	28
2	334	24	28
Эхо-импульсный ручной метод с одноэлементными ПЭП			
1	561	30	29
2	548	24	33
Эхо-импульсный метод с использованием линейных фазированных решеток			
1	552	27	34
2	528	26	37
Импедансный метод			
1	259	21	16
2	221	17	16

\* Пьезоэлектрический преобразователь.

Анализируя результаты, представленные в табл. 1, можно отметить, что площадь ударных повреждений при применении разных методов контроля отличается в значительной степени, что, в свою очередь, объясняется как человеческим фактором, так и особенностями каждого из применяемых методов. В работе [15] показано, что наиболее точными (близкими к истинным размерам) являются результаты оценки площади ударного повреждения с использованием высокоразрешающего автоматизированного

эхо-метода с применением сфокусированных ПЭП. В работе [15] проведена сравнительная оценка размеров ударного повреждения, полученных с помощью автоматизированного ультразвукового контроля с высоким разрешением и растровой электронной микроскопии (разрушающим методом).

В табл. 2 приведены результаты расчета относительной погрешности измерения размеров ударных повреждений относительно данных, полученных высокоразрешающим автоматизированным ультразвуковым эхо-методом с применением одноэлементных сфокусированных ПЭП.

Таблица 2

**Результаты расчета относительной погрешности измерения размеров ударных повреждений в сравнении с результатами автоматизированного эхо-импульсного метода**

Условный номер образца	Относительная погрешность определения площади, %	Относительная погрешность определения ширины в плоскости X, %	Относительная погрешность определения ширины в плоскости Y, %
Теневой автоматизированный метод с одноэлементными сфокусированными ПЭП*			
1	26	7,4	15,2
2	28	7,7	22,2
Эхо-импульсный ручной метод с одноэлементными ПЭП			
1	10	11,1	12,1
2	16	7,7	8,3
Эхо-импульсный метод с использованием линейных фазированных решеток			
1	9	0	3
2	12	0	2,8
Импедансный метод			
1	48	22,2	51,5
2	52	34,6	41,7

\* Пьезоэлектрический преобразователь.

Как видно из данных табл. 2, наименьшую относительную погрешность оценки размеров ударных повреждений обеспечивает применение линейной фазированной решетки. Это можно объяснить тем, что при использовании линейной фазированной решетки применяется фокусировка ультразвукового пучка, аналогично фокусировке при использовании сфокусированных одноэлементных ПЭП. Единственным отличием от использования сфокусированного ПЭП в данном случае является то, что фокусировка при использовании линейной фазированной решетки осуществляется только в одной плоскости (плоскости расположения элементов решетки), в то время как в другой взаимно перпендикулярной плоскости ультразвуковой пучок расфокусирован. Это обстоятельство и дает увеличение размера ударного повреждения в плоскости, где луч не сфокусирован.

Чуть бóльшую погрешность оценки размеров повреждения дает применение ручного ультразвукового эхо-метода. Погрешность в данном случае в первую очередь определяется двумя факторами: применением несфокусированного ПЭП и человеческим фактором, который можно уменьшить путем использования механизированного сканера, как в случае с использованием линейной фазированной решетки.

Наибольшие погрешности оценки размеров ударных повреждений дают теневой и импедансный методы. При теневом методе на краях ударного повреждения снижение амплитуды прошедшего через образец сигнала не достигает уровня фиксации, а соответственно, эти участки не фиксируются на C-скане как дефектные. При импедансном методе бóльшая погрешность обуславливается особенностями метода, позволяющими

эффективно обнаруживать дефекты только до середины толщины объекта контроля. Поскольку ударное повреждение распространилось практически на всю толщину образца, а максимальную площадь ударное повреждение имеет на максимальной глубине, в данном случае площадь, оцененная импедансным методом, оказалась существенно меньше истинной.

### Обсуждение и заключения

Результаты ультразвуковых исследований монолитных образцов из углепластика с ударными повреждениями, полученные различными ультразвуковыми методами (эхо-импульсным методом с применением одноэлементных ПЭП, эхо-импульсным с применением линейной фазированной решетки, теневым и импедансным методами), показывают, что оцененные размеры повреждений могут быть существенно различны. Различие может быть связано как с человеческим фактором, так и с особенностями каждого из применяемых методов контроля. Наилучшие результаты по точности определения размеров ударных повреждений (наиболее близкие к истинным размерам) благодаря своей высокой разрешающей способности дает автоматизированный ультразвуковой эхо-импульсный метод с применением сфокусированных ПЭП. При применении линейных фазированных решеток с механизированным сканером также удается получить довольно точные результаты оценки площади ударного повреждения, а погрешность вызвана тем, что фокусировка ультразвукового пучка осуществляется только в одной плоскости, в то время как во второй взаимно перпендикулярной плоскости луч расфокусирован. Данную проблему можно устранить, если использовать фазированные решетки матричного типа. Применение ручного эхо-импульсного метода с одноэлементным несфокусированным ПЭП дает большую площадь дефекта по причине широкого ультразвукового пучка и человеческого фактора, который можно уменьшить путем применения механизированного сканера. При теневом методе из-за огибания краев ударного повреждения ультразвуковыми волнами снижение амплитуды ультразвукового сигнала на краях не достигает уровня фиксации, что приводит к уменьшению оцененной площади относительно реальной. Импедансный метод эффективен лишь до середины толщины объекта контроля. Поэтому если повреждение по глубине прошло дальше середины объекта контроля, то импедансным методом дефектные участки, залегающие глубже середины объекта контроля, можно не обнаружить.

Следует отметить, что при использовании всех приведенных методов проводилась оценка не реальных размеров дефектов, а условных, т. е. полученных при определенных условиях, которые зависят от конкретной методики контроля: параметров применяемых ПЭП, уровня чувствительности контроля, схемы сканирования и т. п. Поэтому уменьшения погрешности оценки размеров ударных повреждений возможно добиться методологическим путем.

### Список источников

1. Каблов Е.Н. Материалы нового поколения – основа инноваций, технологического лидерства и национальной безопасности России // Интеллект и технологии. 2016. № 2 (14). С. 16–21.
2. Каблов Е.Н. Из чего сделать будущее? Материалы нового поколения, технологии их создания и переработки – основа инноваций // Крылья Родины. 2016. № 5. С. 8–18.
3. Раскутин А.Е. Российские полимерные композиционные материалы нового поколения, их освоение и внедрение в перспективных разрабатываемых конструкциях // Авиационные материалы и технологии. 2017. № S. С. 349–367. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-349-367.
4. Каблов Е.Н., Гуняев Г.М., Ильченко С.И., Кривонос В.В. и др. Конструкционные углепластики с повышенной проводимостью // Авиационные материалы и технологии, 2004. № 2. С. 25–36.

5. Сидорина А.И. Мультиаксиальные углеродные ткани в изделиях авиационной техники (обзор) // *Авиационные материалы и технологии*. 2021. № 3 (64). Ст. 10. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 16.03.2022). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-3-105-116.
6. Железина Г.Ф., Соловьева Н.А., Макрушин К.В., Рысин Л.С. Полимерные композиционные материалы для изготовления пылезащитного устройства перспективного вертолетного двигателя // *Авиационные материалы и технологии*. 2018. № 1 (50). С. 58–63. DOI: 10.18577/2071-9140-2018-0-1-58-63.
7. Ткачук А.И., Донецкий К.И., Терехов И.В., Караваев Р.Ю. Применение терморезактивных связующих для изготовления полимерных композиционных материалов методами безавтоклавного формования // *Авиационные материалы и технологии*. 2021. № 1 (62). Ст. 03. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 16.03.2022). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-1-22-33.
8. *Не разрушающий контроль: справочник в 7 т. / под общ. ред. В.В. Клюева. М.: Машиностроение, 2004. Т. 3: Ультразвуковой контроль / И.Н. Ермолов, Ю.В. Ланге. 864 с.*
9. Бойчук А.С., Генералов А.С., Далин М.А., Диков И.А. Контроль монолитных деталей и конструкций авиационной техники, изготавливаемых из ПКМ, ультразвуковым методом неразрушающего контроля с использованием фазированных решеток // Сб. тр. X Всеросс. конф. ТестМат «Основные тенденции, направления и перспективы развития методов неразрушающего контроля в аэрокосмической отрасли». М.: ВИАМ, 2018. С. 18–31. URL: <https://conf.viam.ru/sites/default/files/uploads/proceedings/1063.pdf> (дата обращения: 08.02.2022).
10. Papa I., Lopresto V., Langella A. Ultrasonic inspection of composites materials: Application to detect impact damage // *International Journal of Lightweight Materials and Manufacture*. 2021. Vol. 4. Is. 1. P. 37–42. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2588840420300342> (дата обращения: 10.02.2022).
11. Стариковский Г.П., Карабутов А.А., Курятин А.А. Неразрушающий контроль интегральных конструкций из полимерных композиционных материалов // *В мире неразрушающего контроля*. 2011. № 4 (54). С. 61–65.
12. Taheri H., Hassen A.A. Nondestructive Ultrasonic Inspection of Composite Materials: A Comparative Advantage of Phased Array Ultrasonic // *Applied Sciences*. 2019. Vol. 9 (8). DOI: 10.3390/app9081628.
13. Троицкий В.А., Карманов М.Н., Троицкая Н.В. Неразрушающий контроль качества композиционных материалов // *Техническая диагностика и неразрушающий контроль*. 2014. № 3. С. 29–33.
14. Каблов Е.Н. Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года // *Авиационные материалы и технологии*. 2012. № S. С. 7–17.
15. Бойчук А.С. Разработка технологий неразрушающего контроля монолитных конструкций из углепластика с использованием ультразвуковых антенных решеток: дис. ... канд. техн. наук. М., 2016. 203 с.

### References

1. Kablov E.N. Materials of a new generation – the basis of innovation, technological leadership and national security of Russia. *Intellekt i tekhnologii*, 2016, no. 2 (14). pp. 16–21.
2. Kablov E.N. What is the future to be made of? Materials of a new generation, technologies for their creation and processing - the basis of innovation. *Krylya Rodiny*, 2016, no. 5, pp. 8–18.
3. Raskutin A.E. Russian polymer composite materials of new generation, their exploitation and implementation in advanced developed constructions. *Aviacionnye materialy i tekhnologii*, 2017, no. S, pp. 349–367. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-349-367.
4. Kablov E.N., Gunyaev G.M., Ilchenko S.I., Krivonos V.V. Structural carbon plastics with increased conductivity. *Aviacionnye materialy i tekhnologii*, 2004, no. 2, pp. 25–36.
5. Sidorina A.I. Multiaxial carbon fabrics in the products of aviation technology (review). *Aviation materials and technologies*, 2021, no. 3 (64), paper no. 10. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: March 13, 2022). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-3-105-116.

6. Zhelezina G.F., Solovyeva N.A., Makrushin K.V., Rysin L.S. Polymer composite materials for manufacturing engine air particle separation of advanced helicopter engine. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2018, no. 1 (50), pp. 58–63. DOI: 10.18577/2071-9140-2018-0-1-58-63.
7. Tkachuk A.I., Donetsky K.I., Terekhov I.V., Karavaev R.Yu. The use of thermosetting matrices for the manufacture of polymer composite materials by the non-autoclave molding methods. *Aviation materials and technology*, 2021, no. 1 (62), paper no. 03. Available at: <https://journal.viam.ru> (accessed: March 13, 2022). DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-1-22-23.
8. *Non-destructive testing*: reference in 7 vols. Ed. V.V. Klyuev. Moscow: Mashinostroenie, 2004, vol. 3: Ultrasonic testing. Eds. I.N. Ermolov, Yu.V. Lange, 864 p.
9. Boychuk A.S., Generalov A.S., Dalin M.A., Dikov I.A. Inspection of monolithic parts and structures of aviation equipment made from PCM by ultrasonic non-destructive testing using phased arrays. tr. X All-Russian. conf. TestMat "Main trends, directions and prospects for the development of non-destructive testing methods in the aerospace industry". Moscow: VIAM, 2018, pp. 18–31. Available at: <https://conf.viam.ru/sites/default/files/uploads/proceedings/1063.pdf> (дата обращения: 08.02.2022).
10. Papa I., Lopresto V., Langella A. Ultrasonic inspection of composites materials: Application to detect impact damage. *International Journal of Lightweight Materials and Manufacture*, 2021, vol. 4, is. 1, pp. 37–42. Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2588840420300342> (accessed: February 10, 2022).
11. Starikovskiy G.P., Karabutov A.A., Kuryatin A.A. Non-destructive testing of integral structures made of polymer composite materials. *V mire nerazrushayushchego kontrolya*, 2011, no. 4 (54), pp. 61–65.
12. Taheri H., Hassen A.A. Nondestructive Ultrasonic Inspection of Composite Materials: A Comparative Advantage of Phased Array Ultrasonic. *Applied Sciences*, 2019, vol. 9 (8). DOI: 10.3390/app9081628.
13. Troitskiy V.A., Karmanov M.N., Troitskaya N.V. Non-destructive quality control of composite materials. *Tekhnicheskaya diagnostika i nerazrushayushchiy kontrol*, 2014, no. 3, pp. 29–33.
14. Kablov E.N. The strategic directions of development of materials and technologies of their processing for the period to 2030. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2012, no. S, pp. 7–17.
15. Boychuk A.S. *Development of technologies for non-destructive testing of monolithic structures made of carbon fiber using ultrasonic antenna arrays*: thesis, Cand. Sc. (Tech.). Moscow, 2016, 203 p.

#### Информация об авторах

**Бойчук Александр Сергеевич**, старший научный сотрудник, к.т.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, [admin@viam.ru](mailto:admin@viam.ru)

**Диков Иван Алексеевич**, ведущий инженер, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, [admin@viam.ru](mailto:admin@viam.ru)

**Генералов Александр Сергеевич**, начальник лаборатории, к.т.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, [admin@viam.ru](mailto:admin@viam.ru)

#### Information about the authors

**Aleksandr S. Boychuk**, Senior Researcher, Candidate of Sciences (Tech.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, [admin@viam.ru](mailto:admin@viam.ru)

**Ivan A. Dikov**, Leading Engineer, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, [admin@viam.ru](mailto:admin@viam.ru)

**Aleksandr S. Generalov**, Head of Laboratory, Candidate of Sciences (Tech.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, [admin@viam.ru](mailto:admin@viam.ru)

Статья поступила в редакцию 13.05.2022; одобрена и принята к публикации после рецензирования 17.05.2022.

The article was submitted 13.05.2022; approved and accepted for publication after reviewing 17.05.2022.