

УДК 620.179:678.747.2

А.С. Бойчук¹, А.С. Генералов¹, А.В. Степанов¹

ВЕРОЯТНОСТНАЯ ОЦЕНКА ДОСТОВЕРНОСТИ РЕЗУЛЬТАТОВ УЛЬТРАЗВУКОВОГО НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ МОНОЛИТНЫХ КОНСТРУКЦИЙ ИЗ УГЛЕПЛАСТИКА ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ФАЗИРОВАННЫХ РЕШЕТОК

DOI: 10.18577/2307-6046-2016-0-11-11-11

Приведены результаты исследований и построенные по разработанному математическому алгоритму зависимости вероятности обнаружения дефектов от их размеров, а также проведен сравнительный анализ достоверности результатов контроля при использовании ультразвуковых фазированных решеток и одноэлементных пьезоэлектрических преобразователей. Показано, что вероятность обнаружения дефектов при ультразвуковом контроле монолитных конструкций из углепластика с использованием техники фазированных решеток существенно выше, чем при использовании традиционных пьезоэлектрических преобразователей.

Ключевые слова: углепластик, неразрушающий контроль, ультразвуковой метод, фазированные решетки, вероятность обнаружения.

The research results and curves built on the developed mathematical algorithm of probability detection of defects by their size and also the comparative analysis of testing results reliability by using the ultrasonic phased arrays and single element piezoelectric convertor are shown. It is shown that probability of defect detection for ultrasonic testing of the monolithic CFRP structures by phased array technique is considerably higher than by using traditional piezoelectric transducers.

Keywords: CFRP, non-destructive testing, ultrasonic technique, phased arrays, probability of defect detection.

¹Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Государственный научный центр Российской Федерации [Federal state unitary enterprise «All-Russian scientific research institute of aviation materials» State research center of the Russian Federation]; e-mail: admin@viam.ru

Введение

Освоение полимерных композиционных материалов (ПКМ) [1–4] и технологий их производства [5], широкое их внедрение становится одним из важнейших направлений развития материаловедения. ПКМ с каждым годом все больше используются в конструкциях самолетов, вертолетов, космической техники и многих других изделий, замещая при этом металлические аналоги. Широкое применение ПКМ связано с тем, что эти материалы позволяют существенно снизить массу и повысить прочность конструкции.

В настоящее время для неразрушающего контроля (НК) деталей и конструкций из ПКМ в основном используются акустические методы контроля, из которых наибольшее применение нашли теневой, эхо-импульсный с использованием одноэлементных пьезоэлектрических преобразователей (ПЭП), эхо-импульсный с лазерным возбуждением ультразвуковых колебаний, импедансный, реверберационно-сквозной и эхо-импульсный с использованием ультразвуковых фазированных решеток. Каждый из перечисленных методов контроля имеет как свои преимущества, так и недостатки. В частности, использование теневого, эхо-импульсного с применением одноэлементных

ПЭП, эхо-импульсного с лазерным возбуждением ультразвуковых колебаний, импедансного, реверберационно-сквозного методов в ручном варианте позволяет проводить контроль как при производстве деталей и конструкций из ПКМ, так и в условиях эксплуатации готового изделия. Однако в этом случае вероятность обнаружения наиболее опасных производственных и эксплуатационных дефектов ПКМ очень низкая из-за недостаточной информации о результатах контроля.

Ультразвуковой (УЗ) контроль с использованием техники фазированных решеток является наиболее перспективным направлением в ультразвуковой дефектоскопии при контроле монолитных конструкций из ПКМ, в особенности из углепластика. Использование данной техники позволяет увеличить надежность контроля (увеличить вероятность обнаружения дефектов), обеспечить доступ в труднодоступные места при контроле объектов сложной формы, легче интерпретировать результаты контроля, улучшить энергетические характеристики (отношение «сигнал–шум»), повысить производительность контроля. Во ФГУП «ВИАМ» специалистами лаборатории неразрушающих методов контроля (НМК) разработан ряд методик по применению данной технологии [6–12].

Численная оценка вероятности обнаружения дефектов при неразрушающем контроле (НК) на завершающем этапе разработки методики является обязательным условием внедрения новых методик НК для ответственных изделий и объектов как за рубежом, так и в России. Данная оценка, в частности, позволяет определить недостатки разработанных методик контроля до их внедрения в производство с целью исключения пропуска дефектов (увеличения выявляемости), представляющих наибольшую опасность при эксплуатации готового изделия, и уменьшения перебраковки. Кроме того, данные о вероятности обнаружения/пропуска дефектов различных размеров необходимы конструкторам для внедрения современных методов расчета ресурса и периодичности технических осмотров изделий авиационной техники. Для того чтобы построить кривую вероятности обнаружения дефекта в зависимости от его размера для конкретной методики контроля, необходимо повторить все действия, описанные в этой методике на специальных образцах с искусственными дефектами. При контроле выходная информация может быть представлена либо в виде численного отклика (анализируется отношение численного отклика от дефекта «а» к размеру дефекта «а»), либо в виде бинарного отклика (анализируется информация об обнаружении или пропуске дефекта). При этом для каждого вида предоставления информации требуется свой математический алгоритм обработки полученных данных.

В лаборатории НМК ФГУП «ВИАМ» в рамках реализации комплексного научного направления 2.3. «Методы неразрушающих исследований и контроля» («Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года») [13] проведена работа, в результате которой предложена методология и математический алгоритм обработки данных результатов НК углепластиков для построения зависимостей вероятности обнаружения дефектов от их размера [14, 15]. В качестве аналога взят зарубежный алгоритм обработки данных в виде численного отклика, который в свою очередь применим исключительно для металлических изделий.

Материалы и методы

Образцы из углепластика для проведения вероятностной оценки достоверности результатов неразрушающего контроля

Для проведения оценки вероятности обнаружения дефектов при неразрушающем контроле необходимо изготовление специальных образцов с искусственными дефектами. Для этого разработаны требования и изготовлены специальные образцы из углепластика с искусственными дефектами разных типов (расслоения, посторонние

включения, ударные повреждения) и размеров (рис. 1). Образцы представляют собой как плоские панели, так и ребристые, с элементами жесткости типа стрингер. Дефекты имитировали путем: сверления плоскодонных отверстий (имитация расслоений); закладки между слоями препрега углепластика фторопластовых пленок толщиной 40 мкм (имитация посторонних включений); закладки в зону жгута предварительно отформованных вкладок из RTV-силикона (имитация посторонних включений); удара металлического клина (с последующим его удалением) в границу раздела монолитной панели и приформованной к ней полки стрингера (имитация отслоений); ударных воздействий с использованием копра (имитация ударных повреждений). Размеры получившихся дефектов оценивали с помощью высокоразрешающего оборудования, растровой микроскопии и капиллярного метода НК. Всего в образцах получено 75 типичных эксплуатационных дефектов и 96 – типичных производственных.

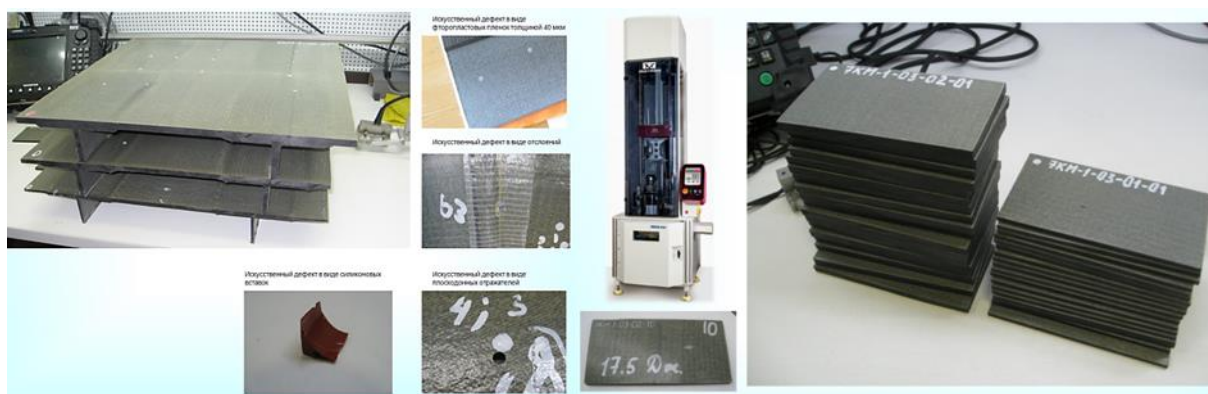


Рис. 1. Комплекты образцов из углепластика с искусственными дефектами

*Методология и математический алгоритм
по проведению численной оценки вероятности обнаружения дефектов ПКМ
при неразрушающем контроле*

Предложенная методология проведения численной оценки вероятности обнаружения дефектов ПКМ при ультразвуковом контроле с использованием техники фазированных решеток заключается в проведении контроля специальных образцов с искусственными дефектами, получении набора данных по результатам контроля и обработке их по специально разработанному математическому алгоритму для построения зависимости вероятности обнаружения дефектов от их размеров. Алгоритм основан на регрессионном анализе данных зависимости максимальных амплитуд эхо-сигналов от площади дефектов и транслировании данных анализа в вероятностную зависимость (рис. 2). Суть алгоритма заключается в следующем:

– для набора данных результатов контроля проводится линейная регрессия, по результатам которой строится линия регрессии вида $y(x)=a \cdot \ln(x)+b$ (где x – площадь дефекта; $y(x)$ – амплитуда эхо-сигнала от дефекта; a и b – параметры линии регрессии) в системе координат с логарифмическим масштабом по оси x . Вычисляется дисперсия линии регрессии по формуле:

$$D = \frac{1}{n-k} \cdot \sum_{i=1}^n (y_i - y(x_i))^2,$$

где k – число коэффициентов, входящих в аналитическое выражение регрессии (для линейной регрессии $k=2$); n – число данных зависимости максимальных амплитуд эхо-сигналов от площадей дефектов;

– транслирование линии регрессии в вероятностную зависимость осуществляется путем использования порога обнаружения и нормальной функции распределения вероятностей вида:

$$P(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \int_{-\infty}^x e^{-\frac{(t-a)^2}{2\sigma^2}} dt,$$

где a и σ – математическое ожидание и среднеквадратическое отклонение (СКО) нормального распределения вероятностей.

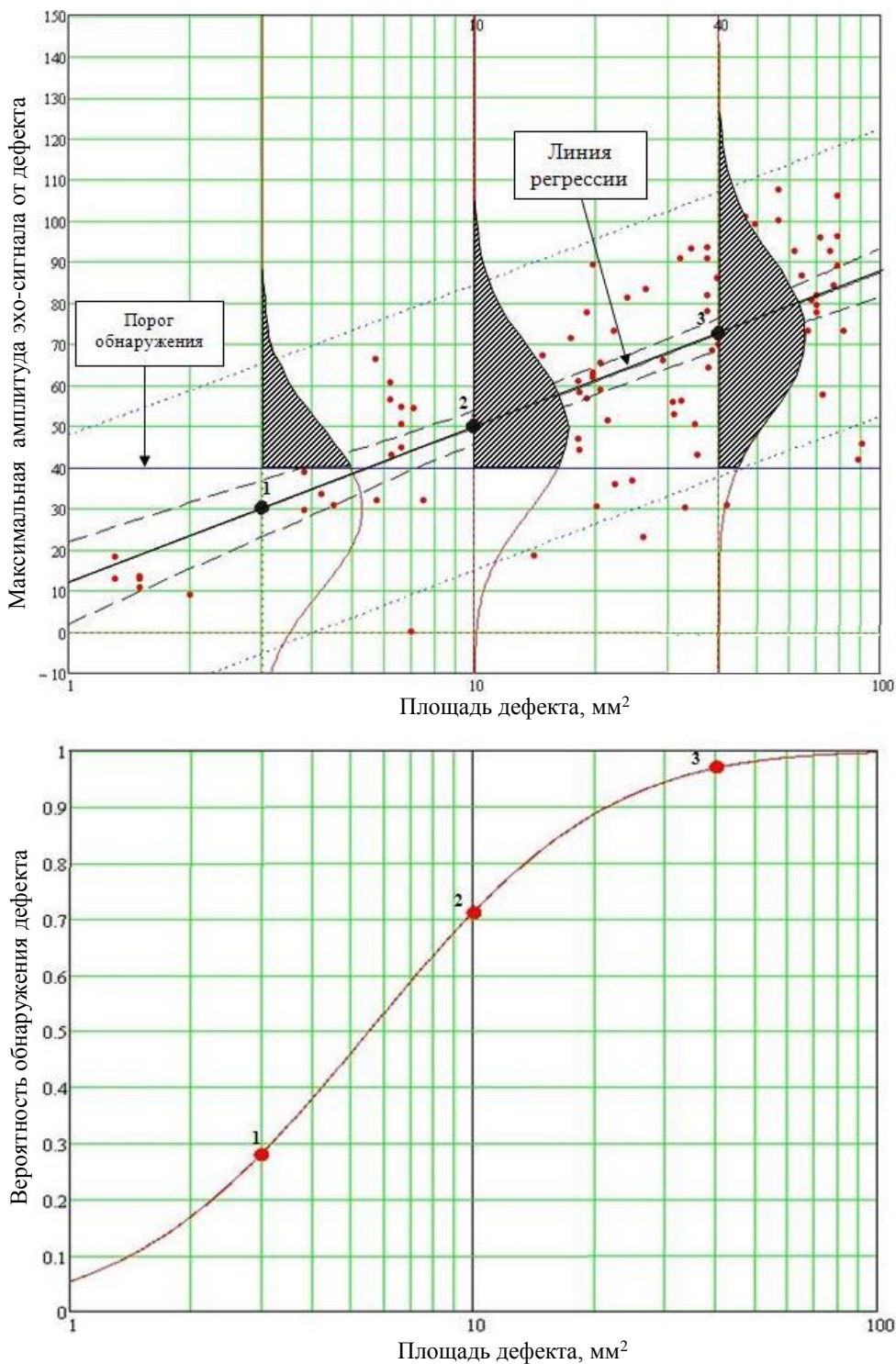


Рис. 2. Принцип транслирования данных регрессионного анализа в вероятностную зависимость

В качестве математического ожидания берется значение функции $y(x)$ в точке x_i , а в качестве СКО – корень квадратный из дисперсии линии регрессии. При обнаружении дефектов в зависимости от их размеров строятся границы доверительного интервала для регрессионной модели по формуле:

$$y_P(x) = y(x) \pm t_{P, n-2} \cdot \sqrt{D} \cdot \sqrt{\frac{1}{n} + \frac{(\ln x - \bar{x})^2}{\sum_{i=1}^n (\ln x_i - \bar{x})^2}},$$

где $t_{P, n-2}$ – коэффициент Стьюдента для доверительной вероятности 95% и $(n-2)$ степеней свободы; $\bar{x} = \sum_{i=1}^n \frac{\ln x_i}{n}$.

После чего эти границы транслируются в вероятностную зависимость путем использования порога обнаружения и нормальной функции распределения вероятностей.

На основе разработанного алгоритма математической обработки статистических данных разработан специальный методический материал (ММ), который является руководством при проведении вероятностной оценки достоверности результатов УЗ контроля конструкций из углепластика. Разработанный ММ является первым нормативным документом в России, позволяющим проводить вероятностную оценку достоверности результатов НК при УЗ контроле конструкций из углепластика по методикам эхо-импульсного НК с использованием техники ультразвуковых фазированных решеток, а также – одноэлементных пьезоэлектрических преобразователей. В основу разработанного ММ положен принципиально новый подход к построению зависимости вероятности обнаружения дефектов от их размеров. Согласно разработанному ММ можно определить величину параметра $a_{90/95}$, представляющую собой значение размера дефекта ПКМ, выявляющегося при НК в 90% случаев с доверительной вероятностью 95%. Этот параметр необходим конструкторам для расчета ресурса и периодичности технических осмотров изделий авиационной техники, содержащих детали и конструкции из ПКМ.

Результаты

Исследование образцов с искусственными дефектами и построение зависимости вероятности обнаружения дефектов от их размеров

Исследования специальных образцов с искусственными дефектами разных типов и размеров проводили с помощью дефектоскопа Omniscan PA128-16 (Olympus NDT), фазированных решеток Olympus NDT 5L-64-NW1 и 5CC10.2-16-R1 с рабочей частотой 5 МГц, датчика пути и двухкоординатного X–Y сканера по разработанной технологической рекомендации. Контроль проводили пять независимых дефектоскопистов путем сканирования образцов с применением фазированных решеток и сохранения результатов контроля в виде C-скана с последующим его анализом с помощью специального программного обеспечения TomoView. Для получения статистических данных измеряли максимальную амплитуду от каждого искусственного дефекта в образце. В итоге получили 5 наборов статистических данных по обнаружению производственных и эксплуатационных дефектов в образцах из углепластика при УЗ контроле с использованием фазированных антенных решеток.

С целью сравнения вероятности обнаружения дефектов при УЗ контроле монолитных конструкций из углепластика с использованием фазированных решеток и традиционных методов УЗ контроля с помощью ультразвукового дефектоскопа Epoch 1000 (Olympus NDT) и одноэлементного пьезоэлектрического преобразователя (ПЭП)

Olympus V609 (Panamatrix-NDT) с рабочей частотой 5 МГц (по существующей технологической рекомендации) проведен УЗ контроль специальных образцов эхоимпульсным методом с использованием одноэлементных пьезоэлектрических преобразователей. Получено два набора статистических данных по обнаружению производственных и эксплуатационных дефектов в образцах из углепластика при УЗ контроле с использованием одноэлементных преобразователей.

Полученные наборы статистических данных ультразвукового неразрушающего контроля при использовании фазированных решеток и одноэлементных пьезоэлектрических преобразователей обработали по разработанному математическому алгоритму, реализованному в программе MathCad, и построили зависимости вероятности обнаружения дефектов от их размеров (рис. 3). На практике особый интерес вызывает величина $a_{90/95}$ (рис. 4). По проведенной оценке вероятности обнаружения дефектов от их размеров определили значения этой величины (см. таблицу).

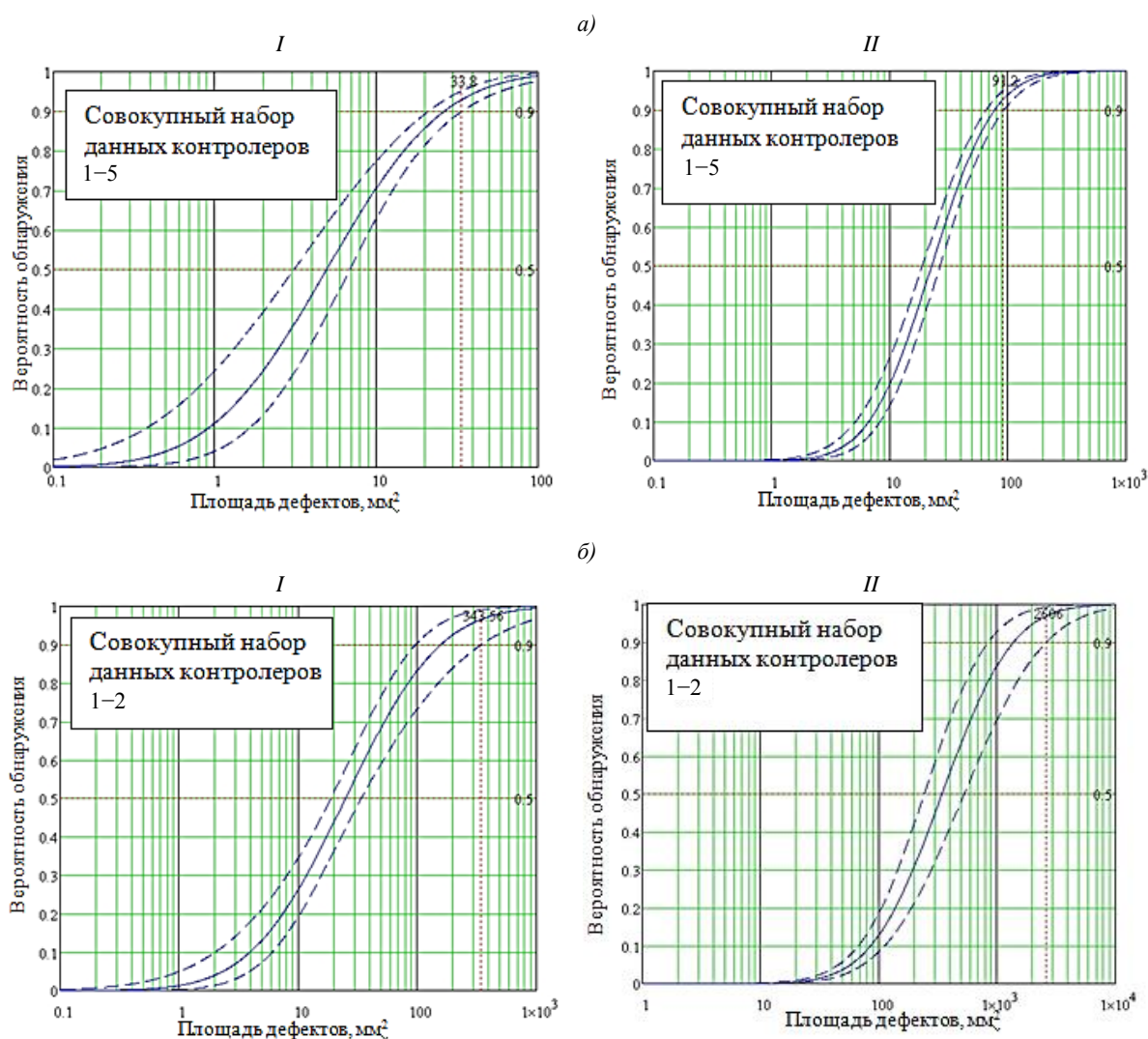


Рис. 3. Зависимости вероятности обнаружения дефектов от их размеров при УЗ контроле с использованием фазированных решеток (а) и одноэлементных пьезоэлектрических преобразователей (б) при контроле образцов с искусственными дефектами, имитирующими типичные производственные (I) и эксплуатационные дефекты (II)

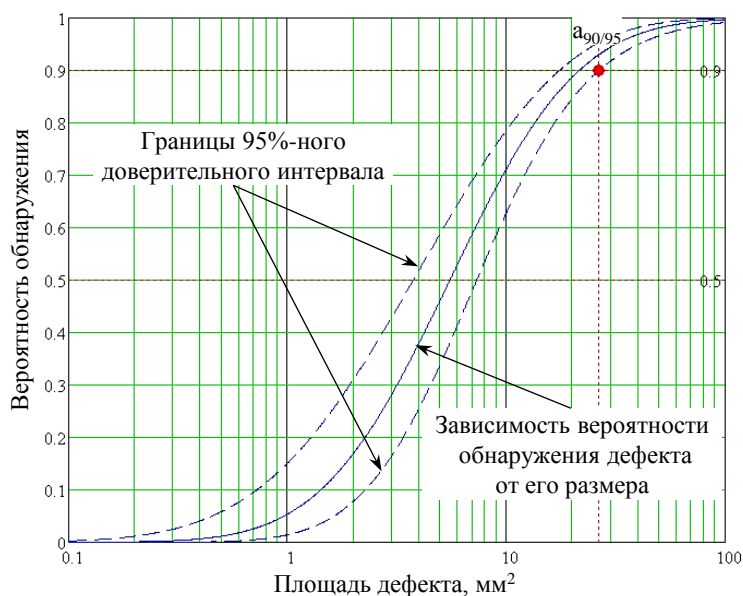


Рис. 4. Пояснение значения параметра $a_{90/95}$ на зависимости вероятности обнаружения дефектов от их размеров

Значения величины $a_{90/95}$ при УЗ контроле образцов из углепластика ВКУ-17КЭ0,1

Условный номер набора данных контролера	Значения $a_{90/95}$, мм ² (диаметр плоскодонного отражателя, мм), при УЗ контроле образцов с дефектами	
	производственными	эксплуатационными
Данные при УЗ контроле по технологической рекомендации с использованием техники фазированных решеток		
1	26,36 (5,80)	69,50 (9,41)
2	24,95 (5,64)	61,38 (8,84)
3	26,73 (5,83)	119,9 (12,36)
4	21,00 (5,17)	100,33 (11,30)
5	61,60 (8,86)	36,98 (6,86)
Набор совокупных данных контролеров 1–5	33,80 (6,56)	91,2 (10,78)
Данные при УЗ контроле по технологической рекомендации с использованием одноэлементных пьезоэлектрических преобразователей		
1	319,15 (20,16)	3221,10 (64,04)
2	369,80 (21,70)	1778,30 (47,58)
Набор совокупных данных контролеров 1–2	343,56 (20,92)	2606,00 (57,60)

Из результатов, приведенных в таблице, видно, что вероятность обнаружения эксплуатационных дефектов при УЗ контроле монолитных конструкций из углепластика ниже, чем вероятность обнаружения производственных дефектов. Сравнительный анализ результатов по вероятности обнаружения, представленных на рис. 4 и в таблице, показывает, что применение фазированных решеток при УЗ контроле монолитных конструкций из углепластика существенно увеличивает вероятность обнаружения более мелких дефектов по сравнению с применением одноэлементных пьезоэлектрических преобразователей.

Обсуждение и заключения

Для вероятностной оценки достоверности УЗ контроля монолитных конструкций из углепластиков предложена методология и разработан математический алгоритм

обработки данных результатов НК. На основе разработанного алгоритма математической обработки статистических данных разработан специальный методический материал, который является первым нормативным документом в России, позволяющим проводить вероятностную оценку достоверности результатов НК при УЗ контроле конструкций из углепластика по методикам эхо-импульсного НК с использованием техники ультразвуковых фазированных решеток, а также с использованием одноэлементных пьезоэлектрических преобразователей.

С использованием разработанного методического материала, разработанных и существующих технологий контроля проведены исследования специальных монолитных образцов из углепластика с искусственными дефектами ультразвуковым эхо-импульсным методом с использованием фазированных решеток и одноэлементных ПЭП и построены зависимости вероятности обнаружения дефектов от их размеров. Результаты исследований показали, что применение фазированных решеток при УЗ контроле монолитных конструкций из углепластика позволяет повысить вероятность обнаружения более мелких дефектов по сравнению с применением одноэлементных ПЭП.

Следует отметить, что разработанный математический алгоритм обработки данных результатов контроля позволяет более полно использовать информацию о дефектах (по сравнению с подходом «обнаружил/пропустил»), а также использовать меньшее количество образцов для построения зависимости вероятности обнаружения дефектов от их размеров при приемлемой ширине доверительного интервала.

ЛИТЕРАТУРА

1. Каблов Е.Н. Авиационное материаловедение в XXI веке. Перспективы и задачи // Авиационные материалы. Избранные труды «ВИАМ» 1932–2002. М., 2002. С. 23–47.
2. Каблов Е.Н. Конструкционные и функциональные материалы – основа экономического и научно-технического развития России // Вопросы материаловедения. 2006. №1. С. 64–67.
3. Меркулова Ю.И., Мухаметов Р.Р. Низковязкое эпоксидное связующее для переработки методом вакуумной инфузии // Авиационные материалы и технологии. 2014. №1. С. 39–41.
4. Мухаметов Р.Р., Ахмадиева К.Р., Чурсова Л.В., Коган Д.И. Новые полимерные связующие для перспективных методов изготовления конструкционных волокнистых ПКМ // Авиационные материалы и технологии. 2011. №2. С. 38–42.
5. Душин М.И., Хрульков А.В., Платонов А.А., Ахмадиева К.Р. Безавтоклавное формование углепластиков на основе препрегов, полученных по растворной технологии // Авиационные материалы и технологии. 2012. №2. С. 43–48.
6. Бойчук А.С. Неразрушающий контроль деталей и конструкций авиационной техники из полимерных композиционных материалов при использовании ультразвуковых фазированных решеток // Тез. докл. 19-й Всерос. науч.-технич. конф. по неразрушающему контролю и технической диагностике. Самара, 2011. С. 289–291.
7. Бойчук А.С., Генералов А.С., Далин М.А., Степанов А.В. Контроль технологических и эксплуатационных нарушений сплошности плоских панелей из полимерных композиционных материалов при использовании ультразвуковых фазированных решеток // Тез. докл. Всерос. конференции по испытаниям и исследованиям материалов «ТестМат-2012». М.: ВИАМ, 2012. С. 6.
8. Бойчук А.С., Генералов А.С., Далин М.А., Степанов А.В. Неразрушающий контроль технологических нарушений сплошности Т-образной зоны интегральной конструкции из ПКМ с использованием ультразвуковых фазированных решеток // Все материалы. Энциклопедический справочник. 2012. №10. С. 38–44.
9. Бойчук А.С., Генералов А.С., Ложкова Д.С., Степанов А.В. Контроль Т-образных зон стрингера из ПКМ с использованием ультразвуковых фазированных решеток // Радиотехника, электротехника и энергетика: тез. докл. 18-й Междунар. науч.-технич. конф. студентов и аспирантов. М., 2012. Т. 2. С. 127–128.

10. Бойчук А.С., Генералов А.С., Степанов А.В. Юхацкова О.В. Неразрушающий контроль ПКМ с использованием ультразвуковых фазированных решеток // Промышленные АСУ и контроллеры. 2013. №2. С. 54–58.
11. Бойчук А.С., Степанов А.В., Косарина Е.И., Генералов А.С. Применение технологии ультразвуковых фазированных решеток в неразрушающем контроле деталей и конструкций авиационной техники, изготавливаемых из ПКМ // Авиационные материалы и технологии. 2013. №2. С. 41–46.
12. Boychuk A.S., Generalov A.S., Stepanov A.V. Nondestructive testing of FRP by using phased array ultrasonic technology // Application of Contemporary Non-Destructive Testing in Engineering: abstracts of the 12th International Conference of the Slovenian Society for Non-Destructive Testing. Portorož, Slovenia. September 4–6, 2013.
13. Каблов Е.Н. Инновационные разработки ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ по реализации «Стратегических направлений развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года» // Авиационные материалы и технологии. 2015. №1 (34). С. 3–33. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33.
14. Бойчук А.С., Генералов А.С., Ложкова Д.С., Степанов А.В. Оценка вероятности обнаружения дефектов в углепластиках при ультразвуковой дефектоскопии с использованием фазированных решеток // Радиоэлектроника, электротехника и энергетика: тез. докл. 19-й Международный науч.-технич. конф. студентов и аспирантов. М.: МЭИ, 2013. Т. 2. С. 106.
15. Бойчук А.С., Генералов А.С., Далин М.А., Степанов А.В. Вероятностная оценка достоверности результатов ультразвукового неразрушающего контроля конструкций из ПКМ, применяемых в авиационной промышленности // Ремонт. Восстановление. Модернизация. 2013. №9. С. 36–40.