



NDT World, 2016, v. 19, no. 4, pp. 16–20
DOI: 10.12737/xxxxx

Submitted 27.10.16
Accepted 17.11.16

Исследование надстройки из композитов пассажирского судна на подводных крыльях акустическими методами НК

Статья подготовлена по результатам выполнения прикладных научных исследований, проводимых МГТУ им. Н. Э. Баумана по Соглашению о предоставлении субсидии № 14.577.21.0103 с Министерством образования и науки РФ. Уникальный идентификатор прикладных научных исследований (проекта) RFMEFI57714X0103) в рамках федеральной целевой программы «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014–2020 годы».

В качестве основного метода поиска внутренних дефектов типа расслоение (непроклей) опытного образца надстройки используется импедансный метод. В качестве вспомогательного метода для поиска зон расположения внутренних дефектов типа расслоение применен локальный метод свободных колебаний. Для первичной настройки на элементы надстройки из композитов использовались образцы с моделируемыми внутренними дефектами типа расслоение. Применялся метод «безэталонных» настроек с помощью анализатора спектра. Исследование производилось в два этапа: точечным контролем с использованием раздельно-совмещенного преобразователя и пороговым контролем с использованием акустического сканера. Составлена карта внутренних дефектов с указанием координат расположения дефектов и их площади.

М. Е. Frantsev¹

The Flaw Detection of Composite Superstructure for Passenger Hydrofoil by the NDT Acoustic Methods

Introduction. Results of examination of a pilot model of hydrofoil passenger craft topside made of polymer composite materials for delamination-type defects are presented. Defects area is measured and compared with the rated values.

Method. To ensure flaw detection, use was made of a two-level test arrangement using an acoustic impedance method, free oscillations acoustic method, and DAMI-C composite materials multipurpose inspection unit. The exact location of the defect was determined by point-to-point testing. Threshold testing using a sonic scanner produces full image of the object defective area to allow subsequent measurement of the defect areas and comparing them with those of the acceptability requirements.

Results. The amount of inspection is 100% of the topside both on the outside and inside, scanning depth - up to the light medium layer. To select optimum operation mode of the inspection unit, use was made of sample pieces with dummy defects.

Conclusions. It was confirmed that using the selected reinforcing and bonding materials was appropriate to create composite material for the hydrofoil passenger craft topside. It was also confirmed that the designed structural layout of the product and its manufacturing technology were correct. No technological defects in the places of possible generation of delamination-type defects during operation have been revealed. The examination also confirmed high efficiency of the DAMI-C inspection unit equipped with RS-1 transmit-receive transducer and a sonic scanner to carry out detection of flaws in composite body shell structures including those made in the form of a sandwich, to ensure their testing for technological internal defects of the delamination [starved spot] type.

Keywords: composite superstructure, impedance method, internal defects, delaminations

Введение

В статье изложены результаты обследования объекта контроля (ОК) опытного образца надстройки из по-

лимерных композиционных материалов (КМ) пассажирского судна на подводных крыльях (СПК) (рис. 1) на наличие дефектов типа расслоение (непроклей) инструментальными ме-

тодами НК по [1]. При этом производится измерение площади дефектов и сравнение её величины с предельно допустимым значением, принятым по нормативам [2] или расчётам.



ФРАНЦЕВ
Михаил Эрнстович

Директор
АО «Нептун-Судомонтаж»,
г. Долгопрудный
Московской обл., к. т. н.

¹ Neptun-Sudomontazh, Dolgoprudny, Moscow Region, Russia; gepard629@yandex.ru

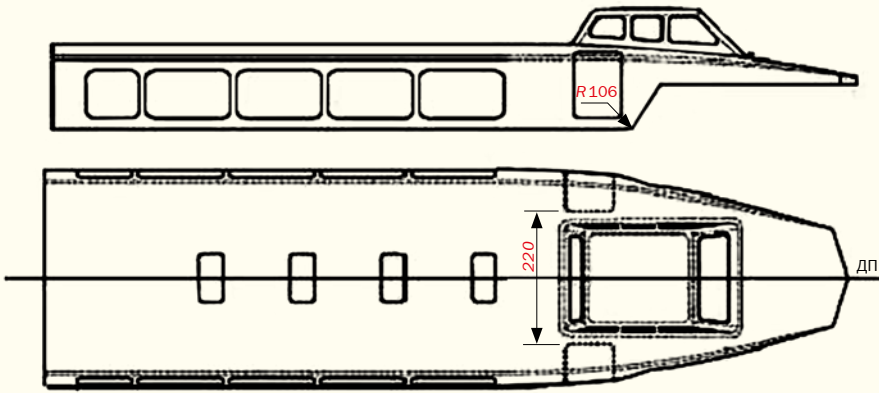


Рис. 1. Объект контроля — опытный образец надстройки СПК из композитов

Дефектоскопия ОК методами НК производится со следующими целями:

- определение качества проектирования и изготовления конструкции, а также адекватности применения технологий и исходных материалов для формования композита;
- выявление мест расположения внутренних дефектов типа расслоение технологической природы для последующего определения степени влияния этих дефектов на прочностные характеристики элементов конструкции;
- соотнесение этих мест с известными из анализа опыта эксплуатации СПК местами вероятного возникновения внутренних дефектов типа расслоение для последующей оценки возможности объединения и дальнейшего развития дефектов в процессе эксплуатации.

Подробнее этот круг вопросов рассмотрен в [3].

Методы и инструменты НК

Все конструктивные элементы ОК отнесены к двум основным группам:

I. Наружная обшивка надстройки в виде сэндвича с армированным средним слоем;

II. Элементы оконных ниш, люковых и дверных вырезов, а также присоединительные фланцы надстройки (рис. 2).

Расслоения в элементах первой группы оказывают наибольшее влияние на изменение общей и местной прочности ОК. Для элементов второй группы расслоения не оказывают существенного влияния на прочностные характеристики ОК, а свидетельствуют об отклонениях от технологических регламентов при изготовлении изделия. Поэтому НК элементов первой группы включает полный цикл обследования: выявление дефекта, измерение его площади и координат, второй группы — только выявление дефекта.

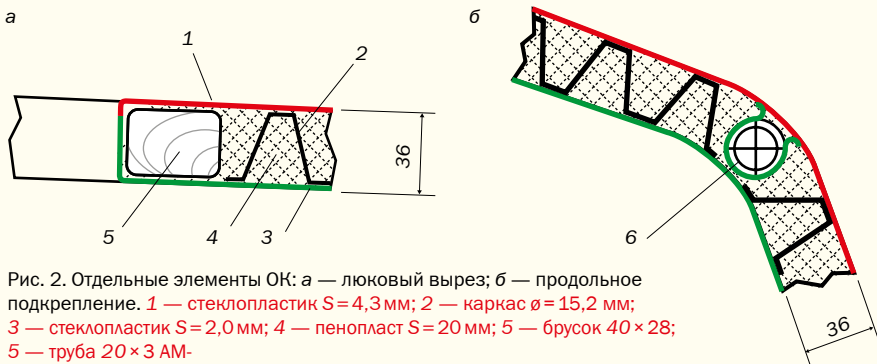


Рис. 2. Отдельные элементы ОК: а — люковый вырез; б — продольное подкрепление. 1 — стеклопластик S=4,3 мм; 2 — каркас $\varnothing=15,2$ мм; 3 — стеклопластик S=2,0 мм; 4 — пенопласт S=20 мм; 5 — брусок 40×28; 6 — труба 20×3 АМ

Табл. 1. Диапазоны применения методов НК для выявления непроклеев в ОК: S_{min} — минимальная площадь обнаруживаемого дефекта, см²; h_{min} и h_{max} — минимальная и максимальная глубины, на которых обнаруживается дефект, мм [4]

Метод	Преобразователь	S_{min}	h_{max}	h_{min}	Недостатки
Импедансный	РС-1 раздельно-совмещенный	0,8	15,0	0,2	—
Свободных колебаний	ИПУ-1 свободных колебаний	1–15	30	0,5	Шум при контроле

В соответствии с действующими нормативными документами [2] внутренними дефектами ОК, выявляемыми методами НК, являются расслоения (непроклеи) в следующих элементах конструкции:

- заполненные газом пустоты между слоями армирующего стекломатериала;
- участки непропитанного или недостаточно пропитанного связующим армирующего материала;
- расслоения между декоративным, наружным, средним и последующими слоями;
- расслоения в узлах соединений.

Доступ осуществляется со стороны декоративного слоя и с внутренней стороны конструкции. Контроль выполняется до лёгкого среднего слоя.

Для дефектоскопии ОК применялись акустический импедансный метод и акустический метод свободных колебаний. Диапазоны применения методов приведены в табл. 1. Следует отметить, что последний обеспечивает возможность контроля изделий с низким модулем Юнга и большим затуханием упругих колебаний. Учитывая многообразие сочетаний конструктивных элементов, схем армирования и расположения подкреплений в ОК, выбор версии метода контроля и типа преобразователя (ПЭП) определялся экспериментально для каждого элемента конструкции.

В качестве инструмента НК использовался универсальный дефектоскоп композиционных материалов ДАМИ-С, в котором как основной метод НК реализован импедансный амплитудно-фазовый метод УЗК в диапазоне 1–40 кГц с применением сухого точечного контакта при одностороннем доступе и метод свободных колебаний (рис. 3).



Рис. 3. Дефектоскоп ДАМИ-С, сканер, преобразователи



Рис. 4. Пороговый контроль ДАМИ-С с использованием сканера

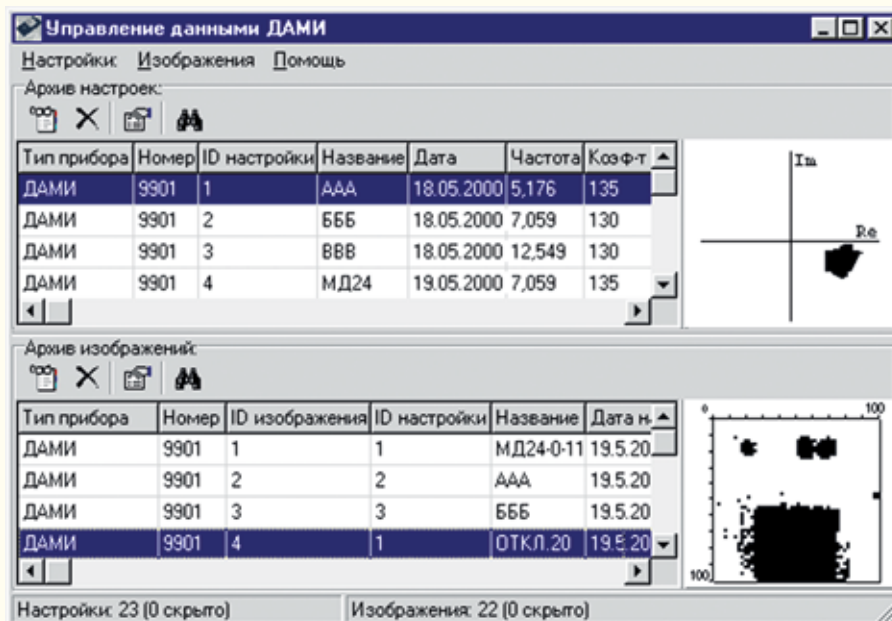


Рис. 5. Интерфейс «АРМ дефектоскописта ДАМИ-С»

Дефектоскоп позволяет контролировать следующие типы материалов:

- слоистые конструкции из неметаллических материалов (углепластиков, стеклопластиков, текстолитов);
- сотовые структуры с неметаллическими обшивками и сотами из полиамидной бумаги и других материалов;
- трёхслойные конструкции с различными заполнителями;
- слоистые клееные конструкции (2-х, 3-х, 4-х-слойные);
- грубые сотовые и иные структуры с регулярно меняющимся импедансом поверхности и (или) переменной толщиной.

Для работы с ДАМИ-С используются различные датчики, позволяющие контролировать большое количество классов материалов. Используется новый метод «безэтальной» настройки, разработанный ГосНИИ ГА для контроля конструкций летательных аппаратов. Технические характеристики дефектоскопа приведены в [5], его важными конструктивными особенностями являются:

- автоматизированный режим настройки с учётом плотности и структуры материалов по амплитуде или фазе сигнала с использованием анализатора спектра, который существенно упрощает процесс настройки;
- одновременная работа с тремя разными настройками, что обеспечивает параллельное исследование трёх различных слоев композита;

- получение С-скана изображений исследуемой области с помощью штатного акустического сканера, визуализация, измерение площадей выявленных дефектов (рис. 4);
- слежение за траекторией движения ПЭП в процессе исследования, что позволяет объективно оценить качество проведенного контроля;
- перенос данных по RS232 в ПК, документирование результатов контроля с использованием ПО «АРМ ДЕФЕКТОСКОПИСТА» (рис. 5).

Проектная модификация старого прибора — дефектоскоп ДАМИ-С09 [6] — позволяет проводить контроль импедансным, вихретоковым и ударным методами и предназначена для обнаружения дефектов типа расслоений, непроклеев, нарушений целостности композитных материалов, клеенных конструкций и сотовых структур, а также для выявления коррозии в неферромагнитных материалах. Несмотря на ряд технических новшеств (цветной дисплей), в целом ДАМИ-С09 как дефектоскоп для контроля композитов оказался менее удобен, чем его предшественник. В ДАМИ-С09 оказались утрачены такие важные приложения, как автоматизированные настройки, режим порогового контроля с акустическим сканером, обеспечивающий визуализацию и измерение дефектов, и ряд других. В результате операция, которая у дефектоскописта, работающего с ДАМИ-С, занимает 2–3 мин, у квалифицированного специалиста с ДАМИ-С09 занимает око-

ло получаса. Кроме того, новый прибор имеет вес, более чем в полтора раза превышающий вес ДАМИ-С.

Настройка ДАМИ-С производится как в ручном, так и автоматизированном режиме, который позволяет быстро сформировать оптимальную настройку для эффективного контроля. Выбор типа ПЭП осуществляется для каждого конкретного участка контроля, реализуемого метода и вида операции контроля непосредственно оператором.

Крупные участки поверхности надстройки СПК первично исследуются с использованием локального метода свободных колебаний. Преобразователем ИПУ-1 производятся равномерные нормированные удары на поверхности контроля и снимается ответный сигнал. Это позволяет быстро проверить обширные участки ОК с разрешением в одно измерение на 1 см². До начала операции предварительно выбранный прямоугольный участок ОК линуется с шагом 10 мм по всей длине (рис. 6а). Начальной линией сканирования считается крайняя слева линия, а крайняя справа линия — конечной. Сканирование ведется от себя, вдоль каждой отмеченной линии. Данный способ позволяет осуществлять построчное сканирование больших площадей, выявляя при этом дефекты размером от 1 см², и путём интерполяции строить их изображение на экране прибора (рис. 6б).

Преобразователь ИПУ-1 эффективен также для контроля изделий из поли-

меров с низкими модулями упругости, к числу его недостатков можно отнести чувствительность к внешнему шуму и создаваемый им при работе значительный шум [4].

По чувствительности к мелким, неглубоко залегающим дефектам, преобразователь РС-1 несколько уступает штатному совмещенному преобразователю ПАДИ-8С. Это связано с невозможностью выявления дефектов, протяжённость которых меньше базы преобразователя (расстояния между излучателем и приёмником сигнала). В то же время преобразователь РС-1 позволяет обнаруживать расслоения, находящиеся на существенно большей глубине, чем ПАДИ-8С, который нами почти совсем не применяется. В последнее время практически во всех современных отечественных дефектоскопах композиционных материалов наметилась тенденция отказа от совмещённых преобразователей в пользу раздельно-совмещённых.

Уровни сигналов с движущегося и неподвижного преобразователей при импедансном методе несколько отличаются вследствие наличия фрикционных шумов, обусловленных взаимодействием преобразователя с неровностями поверхности ОК. При контроле изделий по гладкой поверхности влияние фрикционных шумов невелико, и скорость сканирования может составлять до 4–5 м/мин. С ростом шероховатости фрикционные шумы усиливаются, и скорость сканирования приходится снижать. Она определяется в каждом случае экспериментально. Функциями дефектоскопа ДАМИ-С предусмотрена дополнительная отстройка, позволяющая учитывать фрикционные шумы, поэтому она неукоснительно выполняется при настройке на ОК [4].

При контроле изделия перпендикулярность осей вибраторов к поверхности обеспечивается конструкцией преобразователя. При заметной кривизне поверхности при сканировании преобразователь ориентируется так, чтобы отклонение оси преобразователя от нормали к поверхности изделия в точке контроля не превышало 3–5°. Шаг сканирования по [2] не превышает 500 мм для конструкций и 250 мм для узлов соединений. Попытки проведения контроля ДАМИ-С при отрицательных температурах приводили к некорректной работе оборудования.

Последовательность операций дефектоскопии

Для выбора оптимальных режимов работы, определения чувствительности к дефектам и настройки дефектоскопа использовались специально изготовленные настроечные образцы с моделями дефектов различных размеров, воспроизводящие различные элементы ОК. Эти образцы имели те же основные параметры (толщины, материалы слоёв, схемы армирования и т.п.), что и контролируемое изделие (рис. 7). Длина и ширина образцов выбирались произвольно. Модели дефектов в возможно близкой степени воспроизводили вероятные естественные дефекты. В частности, эти модели имели раскрытие в виде заполненного газом зазора толщиной около 0,3 мм, т.к. дефекты без раскрытия не обнаруживаются. Размеры моделей дефектов были выбраны, исходя из нормируемых величин дефектов.

Определённые трудности возникают при использовании предварительной настройки дефектоскопа по контрольным образцам той же конструкции, что и контролируемые зоны ОК. Наличие на одном объекте контроля большого



Рис. 7. Работа с настроечными образцами

набора толщин материалов, схем армирования и подкреплений обуславливает необходимость изготовления и использования при контроле большого количества эталонных образцов, что долго и дорого.

Принцип действия импедансного дефектоскопа основан на регистрации изменения механического импеданса конструкции в месте наличия дефекта. При этом изменение толщины конструкции временами также приводит к такому же изменению механического импеданса, что и дефект. Поэтому необходимо перестраивать режим работы дефектоскопа при контроле участков с различной толщиной обшивки. Ввиду высокой неоднородности многослойных судовых корпусных конструкций из композитов, наличия складок, натёков связующего или повышенной шероховатости поверхности раздела слоёв разброс показаний дефектоскопа при настройке по образцу и проведении контроля может существенно различаться [4]. Применение при этом специальных контрольных образцов конструкций для настройки дефектоскопа на каждый участок изделия практически исключено, поскольку их общее количество может достигать несколько сотен штук на один объект. Наиболее эффективным, с точки зрения практического применения, является метод «безэталонных» настроек, который позволяет отказаться от большого количества контрольных образцов.

Первичный поиск дефектных зон при импедансном контроле осуществляется с помощью функции дефектоскопа ДАМИ-С в виде анализатора спектра. Используя эту функцию, получают графики амплитудно-частотных характеристик дефектных и бездефектных участков и сравнивают их между собой. При этом в качестве оптимальной частоты контроля данного образца используется частота, соответствующая максимальному значению разности амплитуд. Полученные значения параметров

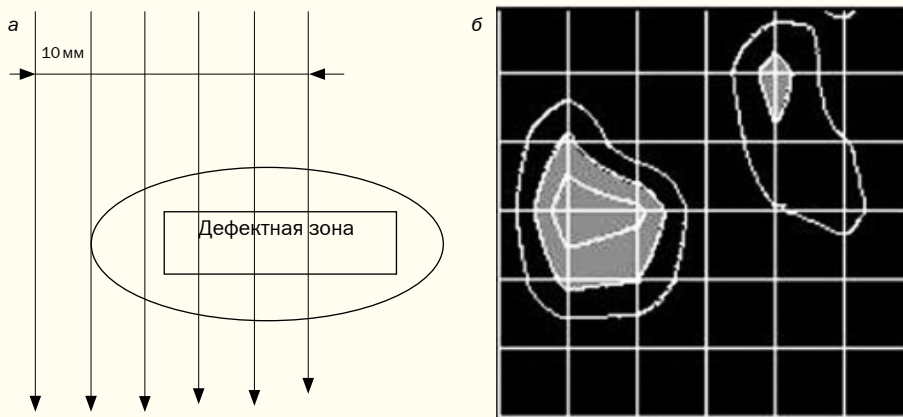


Рис. 6. Траектория движения ПЭП (а) и изображение дефектной зоны (б) при контроле методом свободных колебаний

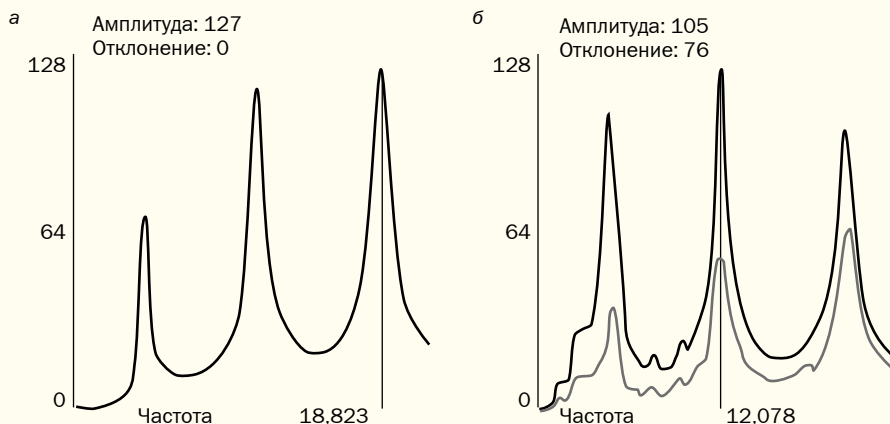


Рис. 8. Анализатор спектра бездефектного (а) и дефектного (б) участков

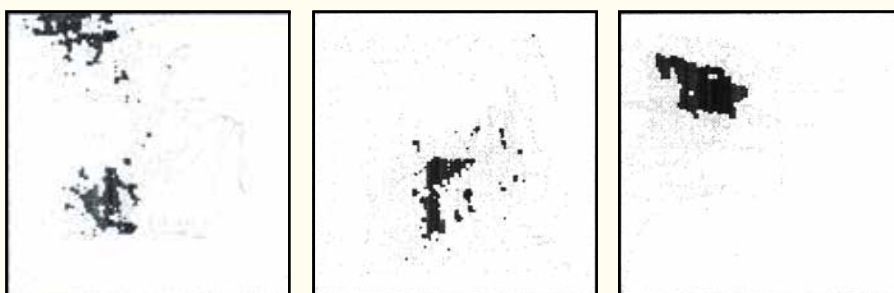


Рис. 9. Изображения дефектов, полученные в режиме порогового контроля

считаются приемлемыми, если наблюдается достаточно хорошо различимое изменение текущего значения импеданса при передвижении преобразователя от бездефектного участка к дефектному участку (рис. 8).

НК надстройки СПК из композитов имеет двухуровневую структуру: точечный и пороговый контроль. В режиме точечного контроля выявляется дефект и на поверхности ОК отмечается его местонахождение, а в режиме порогового — формируется полное изображение дефектного участка (рис. 9) в виде квадрата 200×200 или 250×250 мм для последующего измерения площадей дефектов и сравнения их с нормативами годности.

Надстройка СПК при исследовании находилась на полу производственного помещения и была закреплена по нижнему контуру технологическими стяжками для обеспечения исходной геометрии (рис. 10). Контролировалось 100% площади поверхности надстройки снаружи и изнутри.

Крупные участки поверхности первично исследовались с помощью локального метода свободных колебаний. В дальнейшем точные места расположения дефектов определялись с помощью точечного контроля. А завершающей стадией был пороговый контроль с использованием акустического сканера.

Размер дефекта определялся путем измерения дефектоскопом с использованием ультразвукового сканера. Координаты каждого дефекта относительно базовых осей и поверхностей ОК определялись путём измерения рулеткой по обводу надстройки.

При записи результатов дефектоскопии указывалась площадь дефектов, координаты их месторасположения, метод дефектоскопии, марка и номер дефектоскопа, марка и номер преобразователя, размеры выявляемого дефекта, а также нормируемая предельно допускаемая площадь дефекта.

Полученные настройки и результаты контроля сохранялись в архиве дефектоскопа. В дальнейшем с помо-



Рис. 10. Дефектоскопия надстройки СПК из композитов

щью специализированного ПО «АРМ Дефектоскописта» осуществлялся перенос накопленных данных в компьютер для последующего анализа, хранения и формирования протоколов контроля.

Выводы

В результате исследования установлено, что наружный и внутренние слои надстройки содержат дефекты типа непроклей площадью менее 40 мм², что является допустимым по [2]. Поэтому дальнейшие расчеты не требуются. Тем самым был подтвержден выбор армирующих и связующих материалов для создания композита надстройки СПК, конструктивных схем изделия и технологий его изготовления. В местах, где в процессе эксплуатации СПК возможно возникновение внутренних дефектов типа расслоение, технологических дефектов не выявлено.

Выполненное обследование также подтвердило высокую эффективность дефектоскопа ДАМИ-С, оснащённого раздельно-совмещенным преобразователем РС-1 и акустическим сканером для дефектоскопии судовых корпусных конструкций из композитов, в том числе, выполненных в виде сэндвича, для целей поиска в них внутренних дефектов типа расслоение (непроклей) технологической природы.

Литература

1. Францев М.Э. Сорокин А.К. Способ определения технического состояния корпуса судна, изготовленного из композиционных материалов, находящегося в эксплуатации, использующий результаты неразрушающего контроля по обнаружению дефектов типа расслоение. Патент на изобретение № 2354964 от 16.10.2007.
2. ОСТ 5.9102–87. Стеклопластики конструкционные для судостроения. Методы неразрушающего контроля. — Л.: ЦНИИТС, 1987. — 36 с.
3. Францев М.Э. Определение степени потери прочностных свойств и оценка возможности разрушения судовой корпусной конструкции из композиционного материала в зоне развития эксплуатационного дефекта типа расслоение. — Конструкции из композиционных материалов. 2016. № 1. С. 67–73.
4. Францев М.Э. Дефектоскопия корпусов судов из композиционных материалов, находящихся в эксплуатации, акустическими методами неразрушающего контроля. — Дефектоскопия. 2013. № 1. С. 3–11.
5. ДАМИ-С. Дефектоскоп композитных материалов. Доступно по ссылке <http://ndtpribor.ru/product/dami-s-defektoskop-klmpozitnyh-materialov-impedansnyj-kontrol/>
6. Многофункциональный дефектоскоп ДАМИ-С09/Руководство по эксплуатации ВЛНГ 990109 РЭ. Доступно по ссылке <http://www.expertnk.ru/docs/dami-c09.pdf> — 83 с.

Статья получена 27 октября 2016 г., в окончательной редакции — 17 ноября