

УДК 620.179.1

doi: 10.18698/0536-1044-2023-3-46-54

Ультразвуковой контроль качества пропитки стеклопластиковых элементов конструкций летательных аппаратов органическими смолами

Д.И. Чулков¹, А.В. Терехин¹, М.Ю. Русин^{1,2},
М.Е. Типикин¹, А.М. Думанский^{1,2}

¹ ГНЦ РФ АО «ОНПП «Технология» им. А.Г. Ромашина»

² МГТУ им. Н.Э. Баумана

Ultrasonic Quality Control of the Aerial Vehicle Fiberglass Structural Elements Impregnation with the Organic Resins

D.I. Chulkov¹, A.V. Terekhin¹, M.Yu. Rusin^{1,2},
M.E. Tipikin¹, A.M. Dumansky^{1,2}

¹ Obninsk Research and Production Enterprise Technologiya named after A.G. Romashin JSC

² Bauman Moscow State Technical University

Для повышения термостойкости изделия из стеклопластика после формования и термообработки пропитывают кремнийорганической смолой с последующей полимеризацией путем термообработки. Предложен способ неразрушающего контроля качества пропитки сложнопрофильных изделий из стеклопластиков кремнийорганической смолой. Приведены результаты экспериментальных работ по исследованию изменения скорости продольных ультразвуковых волн в элементах конструкций летательных аппаратов из стеклопластика до и после пропитки кремнийорганической смолой — продуктом МФСС-8, а также по изменению скорости продольных ультразвуковых волн в образцах из стеклопластика при нарушении технологии пропитки.

Ключевые слова: ультразвуковой контроль, качество пропитки, термостойкость стеклопластика

Fiberglass products after molding and heat treatment are impregnated with the organosilicon resin to increase heat resistance followed by polymerization by heat treatment. A method for non-destructive quality control of the composite-profile products impregnation made of fiberglass plastics with the organosilicon resin is proposed. Results of experimental work are presented on the study of alteration in the longitudinal ultrasonic waves speed in structural elements of the aerial vehicles made of fiberglass before and after impregnation with the organosilicon resin, i.e. the MFSS-8 product. Besides, alteration in the longitudinal ultrasonic waves speed in the fiberglass samples violating the impregnation technology are demonstrated.

Keywords: ultrasonic control, impregnation quality, fiberglass heat resistance

Современные летательные аппараты (ЛА) развивают высокие скорости полета, что приводит к интенсивному аэродинамическому односто-

ронному нагреву элементов их конструкции до 800 °С. Одним из важнейших и наиболее термонагруженных элементов конструкции ЛА

является головной антенный обтекатель, состоящий из металлического шпангоута и радиопрозрачной оболочки. В качестве материала последней широко применяют термостойкие стеклопластики на основе полиимидных и фенолоформальдегиднофурфуроловых связующих [1–4].

В целях повышения термостойкости стеклопластика с сохранением высоких прочностных свойств без изменения диэлектрических характеристик после пропитки многослойной стеклоткани органическим связующим, формования и отверждения связующего оболочки из стеклопластика дополнительно пропитывают кремнийорганической смолой и полимеризуют путем термообработки по заданному режиму. Для пропитки стеклопластиков используют высокотермостойкие кремнийорганические смолы, например, МФСС-8 (метилфенилспиросилоксан) или продукт ТМФТ (тетракс (метилфенилсилоксангидрокси) — титан) [5, 6].

Ввиду сложности технологии повышения термостойкости стеклопластика возможна недостаточная или неравномерная пропитка отформованных и термообработанных стеклопластиковых изделий кремнийорганической смолой. Это приведет к снижению термостойкости и эксплуатационных характеристик изделий в режиме одностороннего интенсивного нагрева или к разрушению изделия и выходу ЛА из строя при внешнем теплосиловом воздействии в пределах эксплуатационных нагрузок.

Цель исследования — разработка способа неразрушающего контроля (НК) качества пропитки кремнийорганическими смолами для повышения термостойкости отформованных сложнопрофильных элементов конструкций ЛА из стеклопластиков.

Способы контроля качества пропитки. Качество пропитки стеклопластиковых элементов конструкции ЛА (после формования и отверждения связующего) кремнийорганической смолой можно контролировать путем определения привеса изделия или по изменению объема пропитываемого состава до и после пропитки. Однако контроль такими способами характеризуется низкой точностью.

Это обусловлено невозможностью учета потери массы терморезистивных связующих в процессе термической обработки и точного определения потерь пропитываемого состава кремнийорганической смолы, оставшейся в ка-

налах системы пропитки и удаляемой с поверхности изделия вместе с излишками при протирке. Кроме того, локальный контроль качества пропитки в рассматриваемом случае невозможен.

В работе [7] описан способ контроля качества пропитки неметаллического материала путем определения привеса по изменению частот генератора, расположенного над движущимся пропитанным материалом, под которым закреплен металлический лист, отражающий радиоволны и создающий на входе приемника режим стоячей волны. Однако этот способ имеет низкую чувствительность при контроле качества пропитки разнотолщинных конструкций и крайне сложно реализуем при контроле качества пропитки сложнопрофильных изделий.

Для решения данной задачи перспективным представляется ультразвуковой метод НК, что обусловлено наличием взаимосвязи между акустическими и физико-механическими параметрами материала [8, 9]. При распространении акустических колебаний частотой 10 МГц длина продольных волн в стеклопластике ФНнк+МФСС-8, широко используемом для изготовления элементов конструкции ЛА, составляет 0,23...0,29 мм, что многократно больше диаметра (0,006...0,011 мм) нитей стеклоткани.

Это позволяет рассматривать стеклопластик как сплошную однородную ортотропную упругую среду. Распространение механических волн вдоль осей упругой симметрии приближенно можно описать дифференциальным уравнением второго порядка [10–13]

$$\Delta \xi = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \xi}{\partial t^2},$$

где Δ — оператор Лапласа,

$$\Delta = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}$$

(x, y, z — направления осей упругой симметрии); ξ — смещение частиц из положения равновесия; c — скорость распространения волны; t — время.

Из волнового уравнения следует [13, 14], что в среде существуют два независимых типа волн: сжатия–растяжения (продольные) и сдвиговые (поперечные), скорость распространения которых связана с физико-механическими характеристиками стеклопластика соотношениями [13–16]

$$c_l^\alpha = \sqrt{\frac{E^\alpha (1 - \nu^\alpha)}{\rho(1 + \nu^\alpha)(1 - 2\nu^\alpha)}};$$

$$c_t^\alpha = \sqrt{\frac{E^\alpha}{2\rho(1 - \nu^\alpha)}} = \sqrt{\frac{G^\alpha}{\rho}},$$

где c_l и c_t — скорость продольных и поперечных ультразвуковых волн (УЗВ); α — направление распространения УЗВ в стеклопластике; E — модуль упругости; ν — коэффициент Пуассона; ρ — плотность материала; G — модуль сдвига.

Приведенные соотношения обосновывают правомерность использования скорости распространения акустических колебаний для оценки изменения физико-механических характеристик стеклопластиков после пропитки кремнийорганическими смолами и, соответственно, для контроля качества пропитки.

Достоинствами ультразвукового метода НК являются высокая чувствительность, оперативность, хорошая повторяемость результатов, универсальность применяемого оборудования и отсутствие вредных факторов для человека [13], что является актуальным при проведении НК элементов конструкции ЛА из стеклопластика в условиях серийного производства.

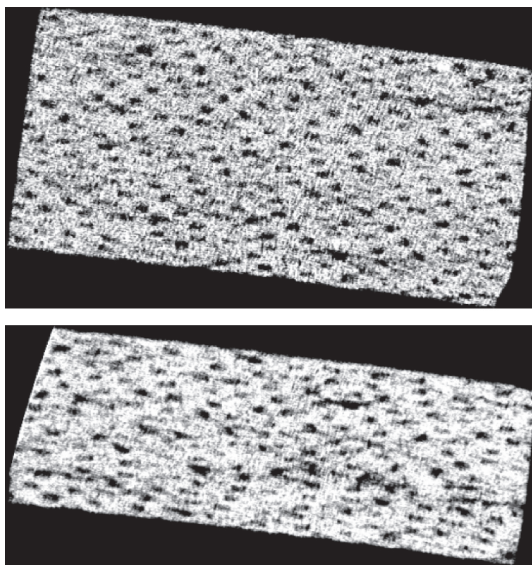
Материалы и методы проведения исследований. Объектом исследования являлись элемен-

ты конструкций ЛА толщиной 1...8 мм, изготовленные из слоистого стеклопластика на основе фенолоформальдегиднофурфуролового связующего с косоугольным армированием кварцевой тканью ТС 8/3-К-ТО с переменным числом армирующих слоев, имеющие оживальную форму.

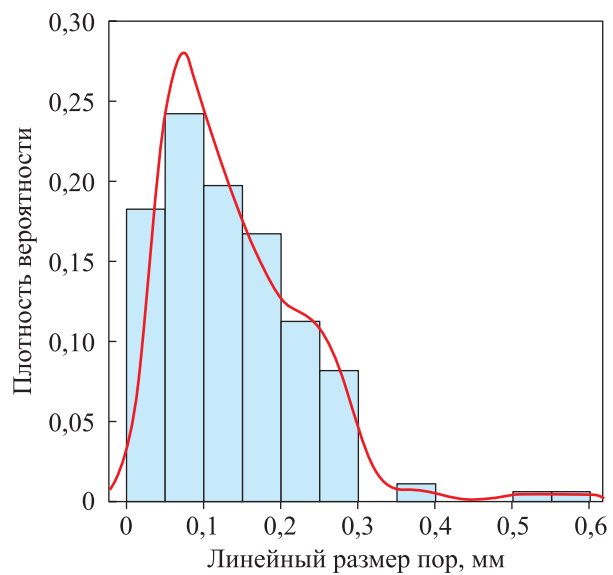
Чтобы обеспечить высокую чувствительность контроля и точность определения скорости УЗВ, важно правильно выбрать частоту ультразвука f , связанную с длиной волны λ соотношением $f = c/\lambda$. Увеличение частоты УЗВ приводит к уменьшению длины волны, что повышает чувствительность контроля и точность определения скорости УЗВ вследствие сокращения длительности ультразвукового импульса.

Однако с ростом частоты ультразвука повышается коэффициент затухания УЗВ в материале, что связано с увеличением интенсивности отражений от структурных неоднородностей стеклопластика, потерь на гистерезис и теплопроводность, а также с ухудшением условий прохождения УЗВ через поверхность ввода [13].

Для оценки размера структурных неоднородностей в элементах ЛА из стеклопластика выполнена рентгеновская компьютерная томография образцов, изготовленных из исследуемых конструкций с разрешающей способностью около 0,018 мм. По томограммам образцов



а



б

Рис. 1. Результаты оценки размера структурных неоднородностей в элементах ЛА из стеклопластика: а — увеличенные томограммы образцов из исследуемой конструкции; б — гистограмма (■) и кривая (—) плотности вероятности распределения максимальных линейных размеров пор

(рис. 1, а) определены максимальные линейные размеры пор и с помощью языка программирования R [17] построены гистограмма и кривая плотности вероятности распределения линейных размеров пор (рис. 1, б), полученная методом сглаживания ядерной функцией. В качестве ядерной функции использовано распределение Гаусса [18]

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2\right],$$

где σ и μ — оценки стандартного отклонения и математического ожидания.

Установлено, что около 97 % пор имеют максимальный линейный размер менее 0,3 мм, из них около 80 % пор имеют линейный размер менее 0,2 мм, вследствие чего для контроля целесообразно использовать УЗВ частотой 10 МГц. В этом случае длина волны составляет 0,23...0,29 мм, что обеспечивает оптимальное соотношение между чувствительностью контроля, точностью определения скорости УЗВ и их затуханием в стеклопластике. Уменьшать частоту нецелесообразно вследствие сопутствующего снижения чувствительности и точности определения скорости УЗВ.

В качестве источника и приемника УЗВ применяли прямые контактные пьезоэлектрические преобразователи (ПЭП) с резонансной частотой 10 МГц. Измерение скорости УЗВ проводили в теновом режиме при соосном расположении ПЭП с противоположных поверхностей стенки контролируемой конструкции (рис. 2, а).

Для улучшения акустического контакта с криволинейной поверхностью конструкции,

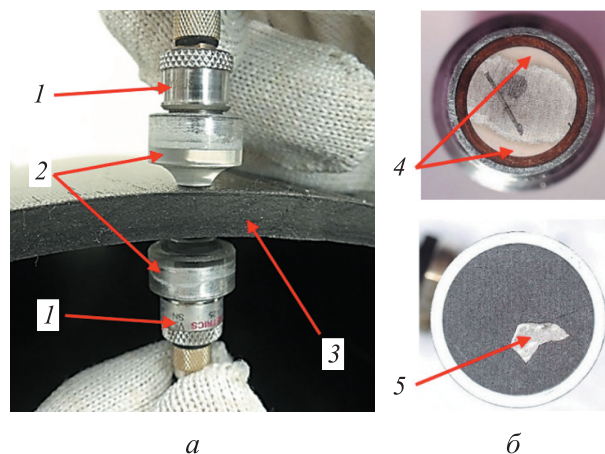


Рис. 2. Внешний вид ПЭП (а) и поврежденного токопроводящего напыления и защитного покрытия (б):

1 — ПЭП; 2 — профилированные защитные протекторы; 3 — объект контроля; 4 — пьезоэлектрическая керамика без токопроводящего напыления; 5 — участок с разрушением защитного покрытия

проведения измерений в дальней зоне диаграммы направленности и защиты пьезоэлектрической пластины преобразователей от механического износа (рис. 2, б) использовали профилированные защитные протекторы из органического стекла.

В качестве генератора сигналов применяли ультразвуковой дефектоскоп OmniScan MX. Чтобы повысить точность определения скорости УЗВ, временные интервалы измеряли с помощью цифрового осциллографа Rigol DS1054Z. Внешний вид используемого оборудования показан на рис. 3.

Применение осциллографа для усиления, оцифровки и измерения временных интервалов

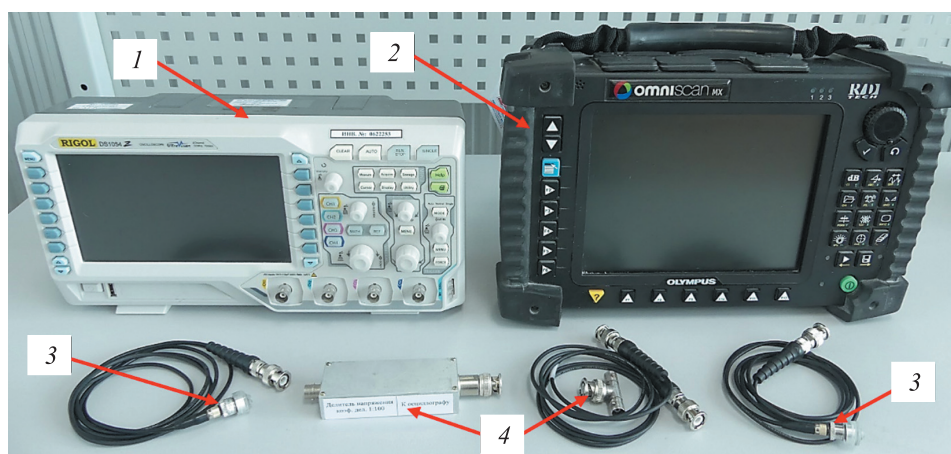


Рис. 3. Внешний вид используемого оборудования:

1 — цифровой осциллограф Rigol DS1054Z; 2 — ультразвуковой дефектоскоп OmniScan MX; 3 — ПЭП V544 с протекторами и соединительными кабелями; 4 — делитель напряжения 1:100 и байонетный разветвитель

позволило повысить точность определения скорости УЗВ в стенке конструкции толщиной 1,5 мм с 6 (при измерении с помощью серийного дефектоскопа) до 2 % (с учетом погрешности измерения толщины стенки $\pm 0,02$ мм). При увеличении толщины стенки точность определения скорости УЗВ возрастает.

В исследуемых конструктивных элементах ЛА измеряли время распространения продольных УЗВ с шагом 20 мм вдоль образующей. Затем по полученным данным в каждом j -м сечении элемента конструкции вычисляли средние по образующим значения скорости УЗВ (ультразвуковые профили) по формуле

$$c_{cpj} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{h_{ij}}{t_{ij}},$$

где j — номер сечения; n и i — количество и номер образующих; h_{ij} — толщина стенки элемента конструкции ЛА в точке измерения на i -й образующей в сечении j ; t_{ij} — время распространения продольных УЗВ.

Скорость УЗВ определяли после формования элементов конструкции ЛА и отверждения связующего, а также после их пропитки про-

дуктом МФСС-8 методом вакуумирования и его полимеризации. Распределения скорости продольных УЗВ c_l в различных стеклопластиковых элементах конструкции ЛА до и после пропитки продуктом МФСС-8 и его полимеризации приведены на рис. 4.

Видно, что после пропитки элементов конструкции ЛА продуктом МФСС-8 и его полимеризации скорость УЗВ увеличивается в среднем на 260 м/с. Отдельные «выбросы» скорости УЗВ обусловлены попаданием в точки измерений швов стеклоткани, дефектов типа складки [19] или наплывов связующего.

В целях экспериментального определения качества исследуемых элементов конструкций ЛА после пропитки продуктом МФСС-8 выполняли стендовые теплопрочностные испытания, по результатам которых они сохранили целостность в пределах эксплуатационных нагрузок с учетом запаса прочности, тем самым подтвердив соответствующее качество пропитки продуктом МФСС-8.

Для исследования изменения скорости УЗВ в стеклопластике после режима полимеризации без выполнения пропитки кремнийорганической смолой или при нарушении технологии

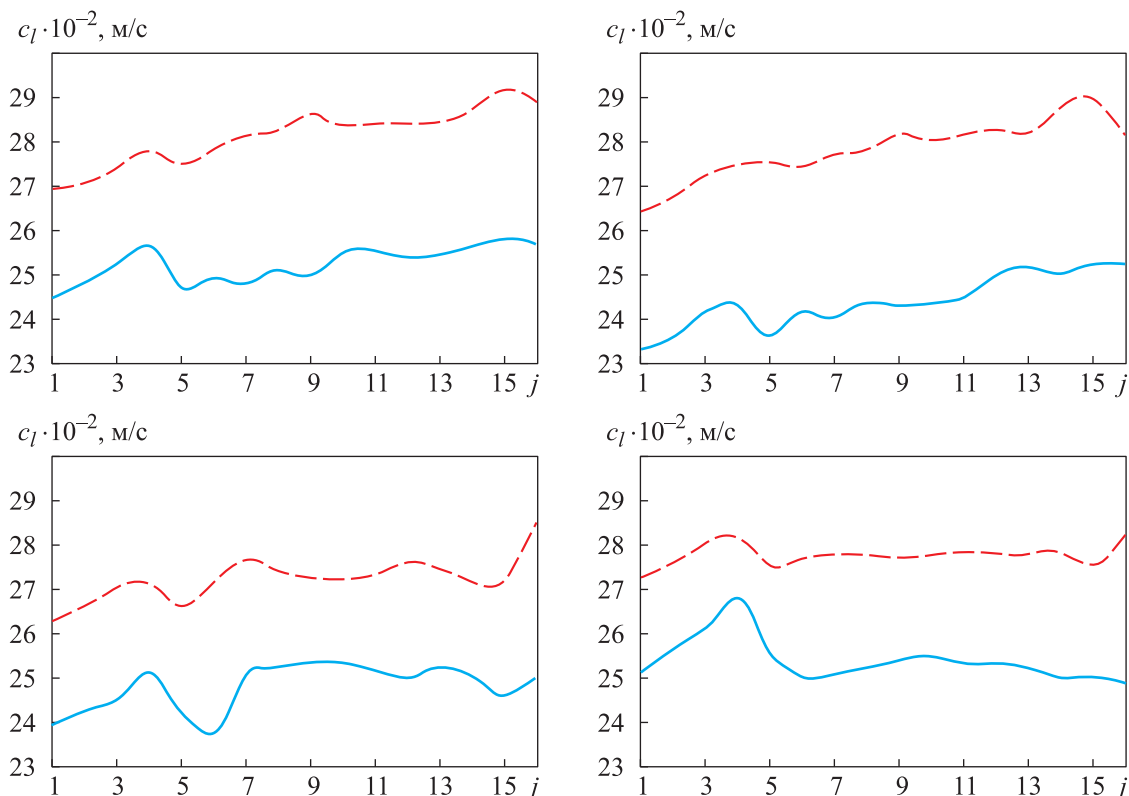


Рис. 4. Распределения скорости продольных УЗВ c_l в различных стеклопластиковых элементах конструкции ЛА до (—) и после (---) пропитки продуктом МФСС-8

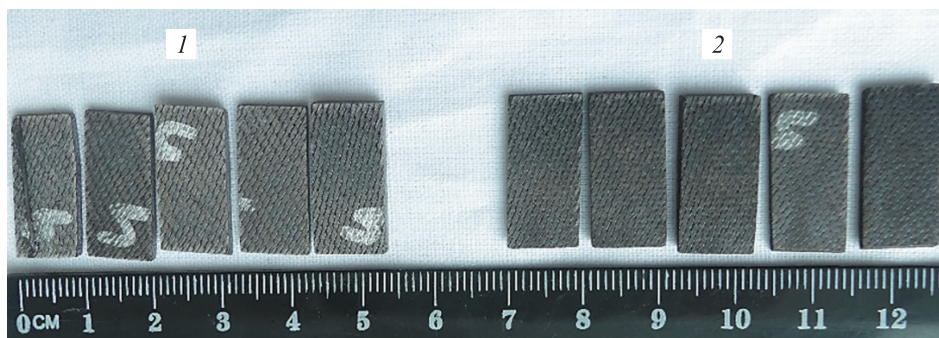


Рис. 5. Внешний вид непропитанных 1 и пропитанных 2 продуктом МФСС-8 образцов после термической обработки

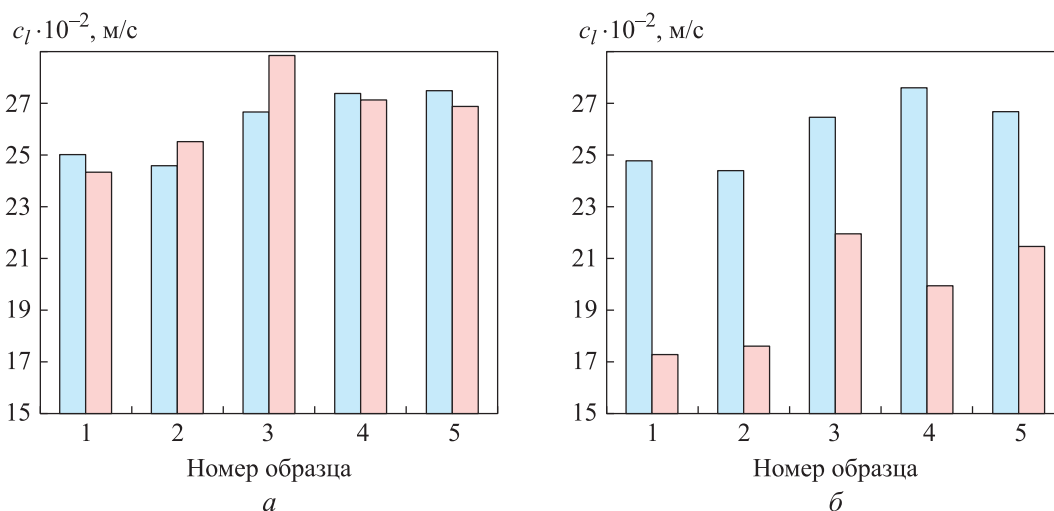


Рис. 6. Диаграммы скорости продольных УЗВ c_l в образцах с пропиткой (а) и без пропитки (б) продуктом МФСС-8 до (□) и после (■) термической обработки

пропитки проводили экспериментальные работы на образцах размером 20×10 мм.

Исследуемые образцы изготавливали из элемента конструкции ЛА по два образца из пяти участков с различной толщиной и количеством слоев стеклоткани. Последовательность выполнения эксперимента включала в себя определение скорости УЗВ в образцах, пропитку продуктом МФСС-8 методом окунания по одному образцу из каждого участка, термическую обработку всех образцов (в том числе непропитанных) по режиму полимеризации продукта МФСС-8 и повторное нахождение скорости УЗВ в образцах.

Внешний вид образцов после термической обработки показан на рис. 5. Диаграммы скорости продольных УЗВ c_l в образцах с пропиткой и без пропитки продуктом МФСС-8 до и после термической обработки приведены на рис. 6.

Как видно из рис. 6, скорость продольных УЗВ в образцах без пропитки продуктом МФСС-8 после термообработки уменьшилась в

среднем на 750 м/с по сравнению с ее первоначальным значением. Это связано с термоокислительной деструкцией связующего стеклопластика.

Пропитка стеклопластиковых образцов продуктом МФСС-8 позволила избежать интенсивного процесса термоокислительной деструкции связующего, в результате чего скорость продольных УЗВ практически не изменилась. Тот факт, что после пропитки и полимеризации продукта МФСС-8 в образцах скорость продольных УЗВ существенно не увеличилась, связан с неполным заполнением пор стеклопластика продуктом МФСС-8, вызванным способом пропитки образцов (элементы конструкции ЛА пропитывали методом вакуумирования, а образцы — методом окунания).

Выводы

1. Предложен новый способ НК качества пропитки стеклопластиков кремнийорганиче-

ской смолой, основанный на изменении скорости продольных УЗВ до и после пропитки. Мерой качества пропитки является увеличение скорости продольных УЗВ на требуемое для заданного элемента конструкции пороговое значение. Определение скорости УЗВ в направлении нормали к плоскости армирования материала позволяет локально контролировать качество пропитки, в частности, в изделиях двойной кривизны с переменной толщиной стенки.

2. Повышение надежности элементов конструкций ЛА обеспечивается отбраковкой в процессе технологического цикла по результатам измерений непосредственно в материале изделий.

3. Внедрение предложенного способа контроля в серийное производство повысит надежность высокоответственных элементов конструкций ЛА из стеклопластика, эксплуатируемых в условиях экстремального теплосилового воздействия.

Литература

- [1] Русин М.Ю. *Проектирование головных обтекателей ракет из керамических и композиционных материалов*. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2005. 64 с.
- [2] Соколов В.И., ред. *Радиопрозрачные изделия из стеклопластиков*. Москва, Мир, 2002. 368 с.
- [3] Пригода В.А., Кокунько В.С. *Обтекатели антенных летательных аппаратов*. Москва, Машиностроение, 1970. 285 с.
- [4] Каплун В.А. *Обтекатели антенных СВЧ*. Москва, Советское радио, 1974. 239 с.
- [5] Русин М.Ю., Пашутина Т.А., Сальникова Т.В. и др. *Способ изготовления изделий из стеклопластиков*. Патент РФ 2266928. Заявл. 19.07.2004, опубл. 27.12.2005.
- [6] Русин М.Ю., Василенко В.В., Ромашин А.Г. и др. Композиционный материал для радиопрозрачных обтекателей летательных аппаратов. *Новые огнеупоры*, 2014, № 10, с. 19–23.
- [7] Михеев К.Г., Обновленский П.А. *Способ контроля качества пропитки неметаллического материала*. Авторское свидетельство СССР 267997. Заявл. 08.01.1969, опубл. 02.04.1970.
- [8] Chulkov D.I., Terekhin A.V., Dumansky A.M. et al. Experimental study of the correlation between the elastic modulus of polymer composite materials and the velocity of ultrasonic waves. *MATEC Web Conf.*, 2020, vol. 329, art. 02031, doi: <https://doi.org/10.1051/mateconf/202032902031>.
- [9] Чулков Д.И., Терехин А.В., Типикин М.Е. и др. Ультразвуковой неразрушающий контроль структурной однородности композиционных материалов и конструкций на их основе. *Композиты и наноструктуры*, 2021, т. 13, № 2, с. 47–52, doi: <https://doi.org/10.36236/1999-7590-2021-13-2-47-52>.
- [10] Мурашов В.В. *Контроль и диагностика многослойных конструкций из полимерных композиционных материалов акустическими методами*. Москва, Спектр, 2016. 244 с.
- [11] Мурашов В.В. Определение прочностных характеристик полимерных композиционных материалов ультразвуковым методом. *Заводская лаборатория. Диагностика материалов*, 2016, т. 82, № 10, с. 47–55.
- [12] Мурашов В.В. Оценка степени накопления микрповреждений структуры ПКМ в деталях и конструкциях неразрушающими методами. *Авиационные материалы и технологии*, 2016, № 3, с. 73–81.
- [13] Ермолов И.Н., Ланге Ю.В. *Неразрушающий контроль*. Т. 3. Ультразвуковой контроль. Москва, Машиностроение, 2004. 864 с.
- [14] Зацепин А.Ф. *Акустический контроль*. Екатеринбург, Изд-во Урал. ун-та, 2016. 211 с.
- [15] Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. *Теория упругости*. Москва, Наука, 1987. 246 с.
- [16] Алешин Н.П., Белый В.Е., Вopilкин А.Х. и др. *Методы акустического контроля металлов*. Москва, Машиностроение, 1989. 456 с.
- [17] Мاستицкий С.Э., Шитиков В.К. *Статистический анализ и визуализация данных с помощью R*. Москва, ДМК-пресс, 2015. 496 с.
- [18] ГОСТ Р ИСО 16269-4-2017. *Национальный стандарт Российской Федерации. Статистические методы. Статистическое представление данных. Часть 4. Выявление и обработка выбросов*. Москва, Стандартинформ, 2017. 48 с.

- [19] ГОСТ 32794–2014. Межгосударственный стандарт. Композиты полимерные. Термины и определения. Москва, Стандартинформ, 2015. 94 с.

References

- [1] Rusin M.Yu. *Proektirovanie golovnykh obtekatel'ey raket iz keramicheskikh i kompozitsionnykh materialov* [Design of a rocket from ceramics and composites]. Moscow, Bauman MSTU Publ., 2005. 64 p. (In Russ.).
- [2] Sokolov V.I., ed. *Radioprozrachnyye izdeliya iz stekloplastikov* [Radiotransparent products from fibreglass]. Moscow, Mir Publ., 2002. 368 p. (In Russ.).
- [3] Prigoda V.A., Kokunko V.S. *Obtekateli antennykh letatelnykh apparatov* [Fairing of aerial aircraft]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1970. 285 p. (In Russ.).
- [4] Kaplun V.A. *Obtekateli antennykh SVCh* [Fairings of aerial UHF]. Moscow, Sovetskoe radio Publ., 1974. 239 p. (In Russ.).
- [5] Rusin M.Yu., Pashutina T.A., Salnikova T.V. et al. *Sposob izgotovleniya izdeliy iz stekloplastikov* [Method of manufacture of articles from glass-reinforced plastics]. Patent RU 2266928. Appl. 19.07.2004, publ. 27.12.2005. (In Russ.).
- [6] Rusin M.Yu., Vasilenko V.V., Romashin A.G. et al. Composite materials for radio-transparent aircrafts domes. *Novye ognepupory* [New Refractories], 2014, no. 10, pp. 19–23. (In Russ.).
- [7] Mikheev K.G., Obnovlenskiy P.A. *Sposob kontrolya kachestva propitki nemetallicheskogo materiala* [Method for quality control of nonmetallic materials dipping]. Inventor's certificate SU 267997. Appl. 08.01.1969, publ. 02.04.1970.
- [8] Chulkov D.I., Terekhin A.V., Dumansky A.M. et al. Experimental study of the correlation between the elastic modulus of polymer composite materials and the velocity of ultrasonic waves. *MATEC Web Conf.*, 2020, vol. 329, art. 02031, doi: <https://doi.org/10.1051/mateconf/202032902031>.
- [9] Chulkov D.I., Terekhin A.V., Tipikin M.E. et al. Ultrasonic non-destructive testing structural uniformity of composite materials and structures on their basis. *Kompozity i nanostruktury* [Composites and Nanostructures], 2021, vol. 13, no. 2, pp. 47–52, doi: <https://doi.org/10.36236/1999-7590-2021-13-2-47-52> (in Russ.).
- [10] Murashov V.V. *Kontrol i diagnostika mnogosloynnykh konstruksiy iz polimernykh kompozitsionnykh materialov akusticheskimi metodami* [Control and diagnostics of multi-layer constructions from polymer composites by acoustic methods]. Moscow, Spektr Publ., 2016. 244 p. (In Russ.).
- [11] Murashov V.V. Ultrasonic control of the strength properties of polymer composite materials. *Zavodskaya laboratoriya. Diagnostika materialov* [Industrial laboratory. Diagnostics of materials.], 2016, vol. 82, no. 10, pp. 47–55. (In Russ.).
- [12] Murashov V.V. Assessment of accumulation degree of microdamages of pcm structure in structures determined by nondestructive methods. *Aviatsionnye materialy i tekhnologii* [Aviation Materials and Technologies], 2016, no. 3, pp. 73–81. (In Russ.).
- [13] Ermolov I.N., Lange Yu.V. *Nerazrushayushchiy kontrol*. T. 3. Ultrazvukovoy control [Nondestructive control. Vol. 3. Ultrasound control]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2004. 864 p. (In Russ.).
- [14] Zatselin A.F. *Akusticheskiy kontrol* [Acoustic control]. Ekaterinburg, Izd-vo Ural. un-ta Publ., 2016. 211 p. (In Russ.).
- [15] Landau L.D., Lifshits E.M. *Teoriya uprugosti* [Elasticity theory]. Moscow, Nauka Publ., 1987. 246 p. (In Russ.).
- [16] Aleshin N.P., Belyy V.E., Vopilkin A.Kh. et al. *Metody akusticheskogo kontrolya metallov* [Acoustic control methods for metals]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1989. 456 p. (In Russ.).
- [17] Mastitskiy S.E., Shitikov V.K. *Statisticheskiy analiz i vizualizatsiya dannykh s pomoshchyu R* [Statistic analysis and data visualization using R]. Moscow, DMK-press Publ., 2015. 496 p. (In Russ.).
- [18] GOST R ISO 16269-4-2017. *Natsionalnyy standart Rossiyskoy Federatsii. Statisticheskie metody. Statisticheskoe predstavlenie dannykh. Chast 4. Vyyavlenie i obrabotka vybrosov* [State standard GOST R ISO 16269-4-2017. Statistical methods. Statistical data presenta-

tion. Part 4. Detection and treatment of outliers]. Moscow, Standartinform Publ., 2017. 48 p. (In Russ.).

- [19] GOST 32794–2014. *Kompozity polimernye. Terminy i opredeleniya* [State standard GOST 32794–2014. Polymer composites. Terms and definitions]. Moscow, Standartinform Publ., 2015. 94 p. (In Russ.).

Статья поступила в редакцию 15.09.2022

Информация об авторах

ЧУЛКОВ Дмитрий Игоревич — инженер второй категории научно-исследовательской лаборатории. ГНЦ РФ АО «ОНПП «Технология» им. А.Г. Ромашина» (249031, Обнинск, Российская Федерация, Киевское шоссе, д. 15, e-mail: DIChulkov@gmail.com).

ТЕРЕХИН Александр Васильевич — кандидат технических наук, начальник научно-исследовательской лаборатории. ГНЦ РФ АО «ОНПП «Технология» им. А.Г. Ромашина» (249031, Обнинск, Российская Федерация, Киевское шоссе, д. 15, e-mail: info@technologiya.ru).

РУСИН Михаил Юрьевич — доктор технических наук, директор НПК — главный конструктор. ГНЦ РФ АО «ОНПП «Технология» им. А.Г. Ромашина»; профессор, МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1, e-mail: info@technologiya.ru).

ТИПИКИН Максим Евгеньевич — начальник сектора научно-исследовательской лаборатории. ГНЦ РФ АО «ОНПП «Технология» им. А.Г. Ромашина» (249031, Обнинск, Российская Федерация, Киевское шоссе, д. 15, e-mail: METipikin@mail.ru).

ДУМАНСКИЙ Александр Митрофанович — доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник. Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН; профессор, МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1, e-mail: aldumans@yandex.ru).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Чулков Д.И., Терехин А.В., Русин М.Ю., Типикин М.Е., Думанский А.М. Ультразвуковой контроль качества пропитки стеклопластиковых элементов конструкций летательных аппаратов органическими смолами. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2023, № 3, с. 46–54, doi: 10.18698/0536-1044-2023-3-46-54

Please cite this article in English as:

Chulkov D.I., Terekhin A.V., Rusin M.Yu., Tipikin M.E., Dumansky A.M. Ultrasonic Quality Control of the Aerial Vehicle Fiberglass Structural Elements Impregnation with the Organic Resins. *BMSTU Journal of Mechanical Engineering*, 2023, no. 3, pp. 46–54, doi: 10.18698/0536-1044-2023-3-46-54

Information about the authors

CHULKOV Dmitry Igorevich — Engineer of the Second Category, Scientific Research Laboratory. Obninsk Research and Production Enterprise *Technologiya* named after A.G. Romashin JSC (249031, Obninsk, Russian Federation, Kievskoe Shosse, Bldg. 15, e-mail: DIChulkov@gmail.com).

TEREKHIN Alexander Vasilyevich — Candidate of Science (Eng.), Head, Scientific Research Laboratory. Obninsk Research and Production Enterprise *Technologiya* named after A.G. Romashin JSC (249031, Obninsk, Russian Federation, Kievskoe Shosse, Bldg. 15, e-mail: info@technologiya.ru).

RUSIN Mikhail Yurievich — Doctor of Science (Eng.), SPC Director, Chief Designer. Obninsk Research and Production Enterprise *Technologiya* named after A.G. Romashin JSC; Professor. Bauman Moscow State Technical University (105005, Moscow, Russian Federation, 2nd Baumanskaya St., Bldg. 5, Block 1, e-mail: info@technologiya.ru).

TIPIKIN Maxim Evgenievich — Chief, Scientific Research Laboratory Sector. Obninsk Research and Production Enterprise *Technologiya* named after A.G. Romashin JSC (249031, Russian Federation, Obninsk, Kievskoe Shosse, Bldg. 15, e-mail: METipikin@mail.ru).

DUMANSKY Alexander Mitrofanovich — Doctor of Science (Physics and Math), Chief Researcher. Blagonravov Mechanical Engineering Research Institute of the Russian Academy of Sciences; Professor, Bauman Moscow State Technical University (105005, Moscow, Russian Federation, 2nd Baumanskaya St., Bldg. 5, Block 1, e-mail: aldumans@yandex.ru).