

СОЗДАНИЕ ДЕФЕКТНОЙ КОМПОЗИЦИОННОЙ ПАНЕЛИ ДЛЯ ОТРАБОТКИ МЕТОДОВ ДИАГНОСТИКИ

М.А. Прохорова

mary.prokhorova.bmstu@gmail.com

SPIN-код: 9107-0563

Юлиана Зонляйн

juliana.soehnlein@gmail.com

SPIN-код: 4778-5061

Цзя Чжэньюань

yurajia@gmail.com

SPIN-код: 7263-7750

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация
Мюнхенский технический университет, Мюнхен, Германия

Аннотация

Подробно описан процесс создания панелей из композиционного материала методом вакуумной инфузии с заранее заложенными в них различными видами дефектов. Рассмотрены самые распространенные виды дефектов, которые могут возникнуть в деталях из композиционных материалов в результате нарушения технологического процесса, наличия дефектов в исходном материале (в частности, дефектов армирующей ткани), а также дефектов, связанных с низкой квалификацией мастера. Создание дефектной панели необходимо для отработки методов контроля с использованием традиционных методов диагностики.

Ключевые слова

Метод вакуумной инфузии, углеродная ткань, дефекты композиционной детали, адгезия

Поступила в редакцию 20.05.2020

© МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2020

В настоящее время практически отсутствуют эффективные методики диагностики средства контроля, адаптированной для оценки качества и эксплуатационных свойств композиционных материалов (КМ). Для оценки эффективности того или иного метода необходимо создать опытный образец изделия (композиционной панели), изготовленной методом ручной выкладки, широко используемого в производстве изделий из композиционных материалов [1, 2]. С этой целью методом вакуумной инфузии в МИЦ МГТУ им. Н.Э. Баумана «Композиты России» была вручную послойно выложена панель из восьми слоев углеродного волокна. При этом она была промаркирована и разделена на семь зон (см. рис. 1, а, б). Всего на композитной панели рассмотрено семь зон. Для образца использовалась такая последовательность выкладки восьми слоев: $0^\circ/0^\circ/0^\circ/0^\circ/0^\circ/0^\circ/0^\circ/0^\circ$.

Рассмотрим более подробно каждую из семи зон и находящиеся в ней (созданные) дефекты. Иллюстрации дефектов представлены на рис. 2, а–д.

Зона 1 является полностью бездефектной с точки зрения технологии изготовления.

Зона 2 представляет собой **дефект отсутствия связующего** или его нехватки. Важно отметить, что на 1, 2 и 8-й слои в этой зоне связующее было нанесено. Это было необходимо для того, чтобы панель после изготовления являла собой единый монолитный КМ.



a

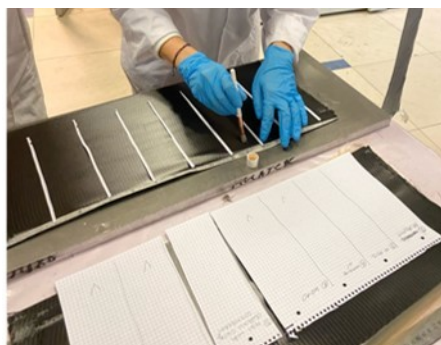
1	2	3	4	5	6	7

б

Рис. 1. Маркировка дефектных зон композиционной панели:

a — нанесение маркировки и зонирование поверхности армирующей ткани; *б* — схема зонирования и маркировки (1-7 — разные виды дефектов)

Зона 3 подвергалась дополнительному **воздействию машинного полусинтетического масла** марки ЛУКОЙЛ люкс SAE 5W-40, API SJ/CF (см. рис. 2, *a*). Данное масло наносилось в зону 3 вместо связующего начиная с 4-го слоя и до 7-го включительно.



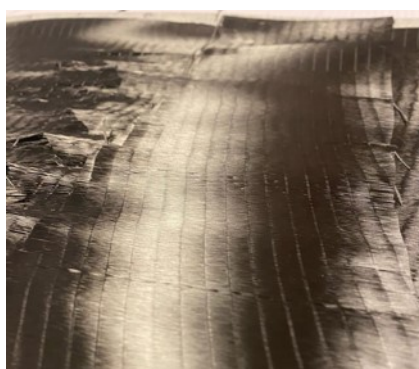
a



б



в



г

Рис. 2. Иллюстрация разных видов дефектов:

a — дополнительная добавка машинного масла; *б* — механическое воздействие в виде порезов лезвием; *в* — воздействие универсальной смазки WD-40; *г* — добавление 9-го слоя материала

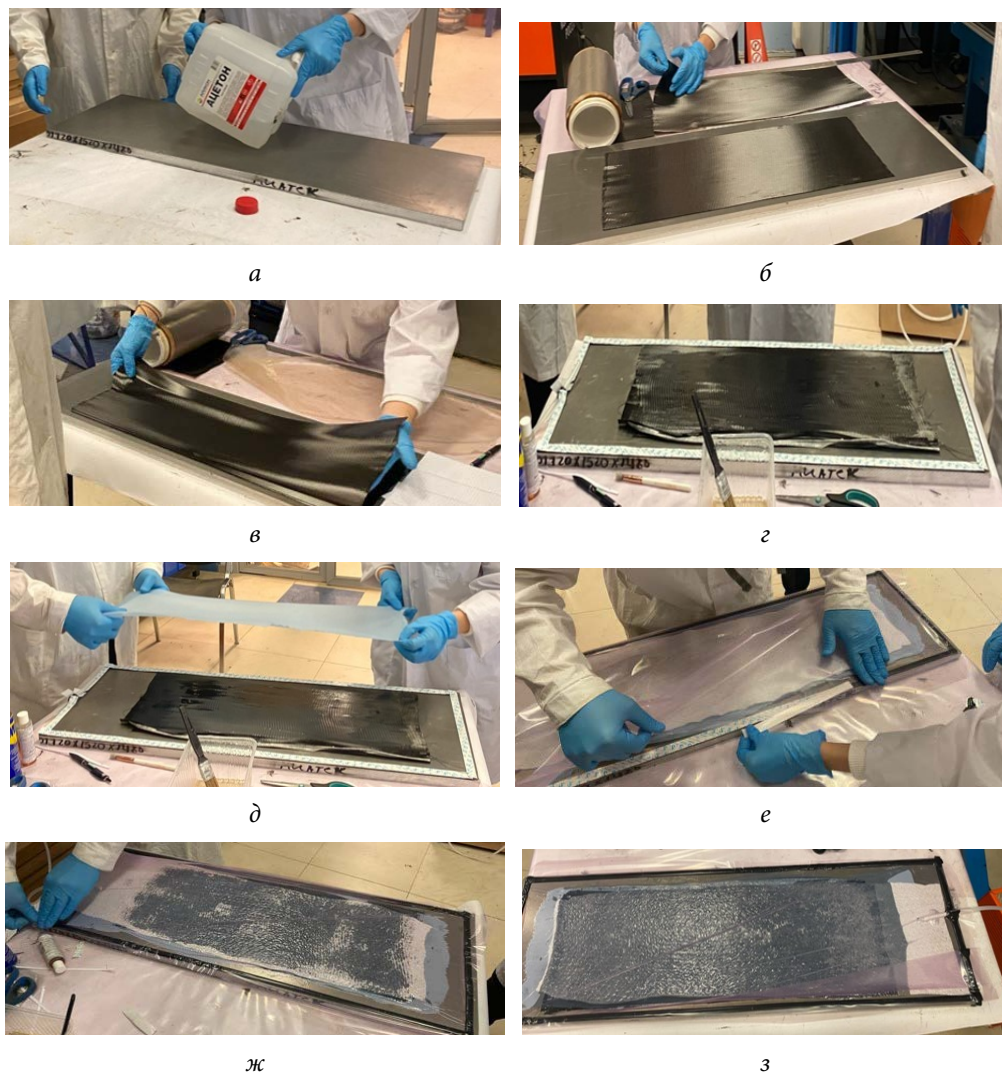


Рис. 3. Некоторые этапы технологического процесса создания панели из КМ:

a — очищение поверхности подложки и нанесение разделительного состава; *б* — вырезка слоев ткани необходимых размеров; *в* — ручная послойная выкладка углеродной ткани; *г* — последний этап нанесения связующего; *д* — укладка жертвенной ткани; *е* — закрепление полиэтиленовой пленки по периметру герметизирующего жгута; *ж* — вставка спиральной трубки и проверка на герметичность; *з* — вакуумирование и подача связующего

Зона 4 аналогично зоне 3 подверглась **воздействию универсальной смазки WD-40** (см. рис. 2, *в*), патентованный состав которой включает разные продукты перегонки нефти. Важно отметить, что первоначально данное вещество было разработано как водоотталкивающее средство, предотвращающее коррозию.

Зона 5 иллюстрирует дефект, заключающийся в **другой концентрации связующего**. Для этого было локально обильно нанесено отверждающее вещество, входящее в состав связующего в целом.

Зона 6 демонстрирует **эффект механического воздействия** (см. рис. 2, б). Для этого по всей зоне лезвием хаотично были сделаны глубокие надрезы напоминающие царапины. Надрезы были сделаны только на 4-м слое. Все остальные слои механическому воздействию не подвергались.

Зона 7 отличается от всех остальных зон тем, что между 4-м и 5-м слоем углеродной ленты был добавлен кусочек углеродной ткани того же материала, размер которой полностью соответствует геометрическим параметрам зоны 7 (см. рис. 2, г). Таким образом, зона 7 **состоит из девяти слоев** углеродной ткани с одинаковым направлением укладки.

Технологию создания КМ методом вакуумной инфузии можно разделить на несколько этапов [3]. Первый этап — подготовительный (см. рис. 3, а, б). Он включает в себя подготовку и нарезание армирующей ткани нужного размера, а также механическую и химическую очистку материала оснастки — подложки. Поверхность подложки многократно обрабатывают разделительным составом, а периметр оснастки, куда будет в дальнейшем крепиться герметизирующий жгут, обрабатывают только растворителем (ацетоном). На втором этапе осуществляют послойную ручную выкладку армирующей ткани с пропиткой связующим (см. рис. 3, в, г). Третий этап связан с укладкой технологического слоя (см. рис. 3, д).

В данном случае, он представляет собой жертвенную и проводящую ткань, линии подачи связующего и герметизирующий жгут. На четвертом этапе осуществляется герметизация формы путем закрепления вакуумной полиэтиленовой пленки по периметру герметизирующего жгута (см. рис. 3, е, ж). На пятом, заключительном, этапе происходят вакуумирование, пропитка связующим и полимеризация КМ (см. рис. 3, з) [3–5].

Дополнительно тем же самым методом **вакуумной инфузии** были вручную послойно выложены две панели из восьми слоев углеродного волокна. При этом одна панель была выложена согласно традиционной последовательности укладки (см. рис. 4, а, нижняя панель), а во второй панели последовательность укладки намеренно нарушили для создания **дефекта укладки** (см. рис. 4, а, верхняя панель) [6].

Последовательность укладки 1-й панели (без дефекта): $0^\circ/0^\circ/0^\circ/0^\circ/0^\circ/0^\circ/0^\circ/0^\circ$

Последовательность укладки 2-й панели (с дефектом): $0^\circ/90^\circ/90^\circ/90^\circ/90^\circ/90^\circ/90^\circ/90^\circ$

Технология создания данных панелей из КМ методом вакуумной инфузии (см. рис. 4, а–в) является аналогичной технологии создания панели, содержащей семь зон с различными дефектами, в предыдущем эксперименте. Единственным отличием является методика пропитки связующим. В данном случае связующее подавалось только на последнем этапе изготовления панели, для чего дополнительно была установлена проводящая сетка (см. рис. 4, б). Слои раскроенной армирующей ткани при последовательной ручной выкладке не пропитывались связующим, а закреплялись с помощью спрея — клея временной фиксации, что обеспечивало плотное прилегание слоев ткани друг к другу, а также равномерное качественное прижатие ткани по всей поверхности оснастки.

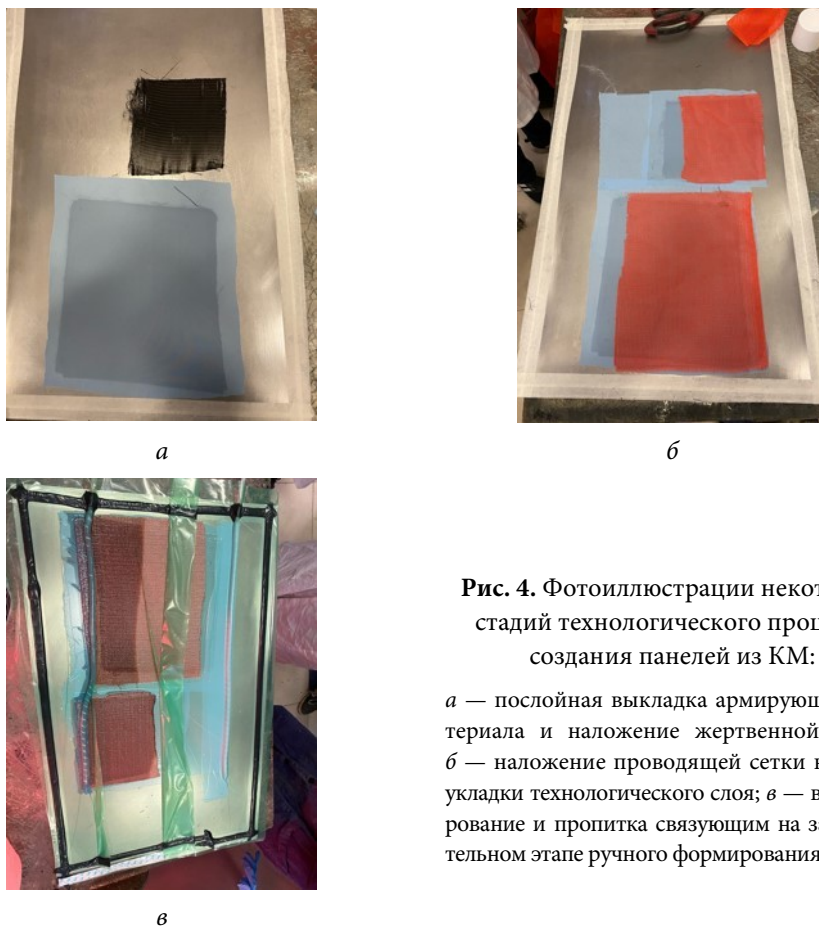


Рис. 4. Фотоиллюстрации некоторых стадий технологического процесса создания панелей из КМ:

а — послойная выкладка армирующего материала и наложение жертвенной ткани;
б — наложение проводящей сетки на этапе укладки технологического слоя; *в* — вакуумирование и пропитка связующим на заключительном этапе ручного формирования КМ

На заключительном этапе формирования панелей пропитка смолой осуществлялась за счет его подачи через спиральную трубку линии подачи связующего. Важно отметить, что во время пропитки связующим на начальном этапе необходимо обеспечить низкое разряжение для качественного равномерного распределения пленки по поверхности формы (см. рис. 5, *а*). Данное условие выполняется благодаря установке клапана регулировки степени разряжения (см. рис. 5, *б*) [7–9].

Также необходимо выделить тот факт, что с целью ускорения процесса полимеризации композиционных панелей дополнительно было применено воздействие инфракрасной коротковолновой сушилки Trommelberg IR3C Standard (см. рис. 5, *в*).

Таким образом были созданы три углеродные панели, включающие семь различных распространенных видов дефектов композиционных материалов: отсутствие связующего, случайное попадание машинного масла и водоотталкивающей смазки, неправильная концентрация связующего в результате ненормированного смешивания отвердителя и смолы, механическое повреждение армирующего волокна, случайное попадание дополнительного слоя ткани и нарушение выкладки. При этом после окончательного отверждения данные панели по внешнему виду ничем не отличаются от бездефектных аналогов.

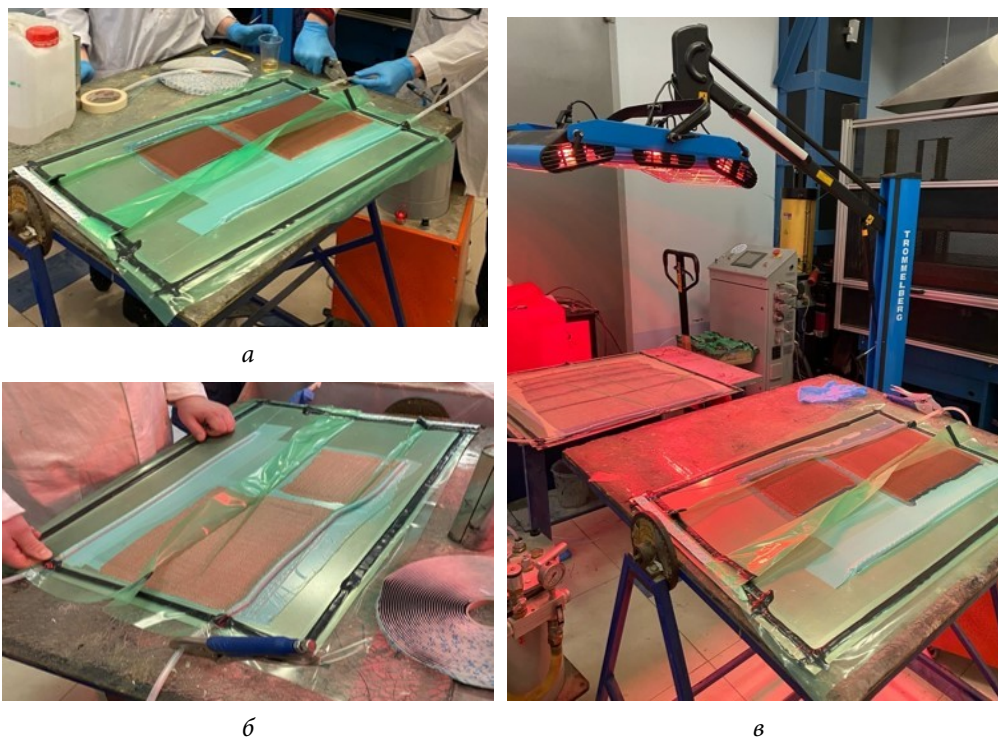


Рис. 5. Иллюстрации принципиальных моментов заключительного этапа формирования панелей из КМ:

а — установка клапана регулировки степени разряжения; *б* — регулировка распределения вакуумной пленки; *в* — использование инфракрасной коротковолновой лампы для снижения временных затрат на полимеризацию панелей из КМ

Данные панели необходимы для отработки различных методов дефектоскопии и оценки эффективности применения каждого из методов по обнаружению тех или иных дефектов в изделиях из КМ [10–12]. Эта задача является весьма актуальной для обеспечения качества и надежности изделий аэрокосмической техники в условиях практического отсутствия методических рекомендаций по применению существующих методов. Самостоятельной задачей является разработка новых методов контроля и диагностики, в частности применения метода ультраструйной диагностики и его отработки с учетом всей специфики изделий из КМ [13–15].

В заключение отметим, что данные панели обладают следующими нюансами, которые необходимо учитывать. В первой серии изготовления панели с семью зонами сначала были последовательно пропитаны связующим 1-й и 2-й слои углеродной ленты. Затем выложены еще три слоя. Начиная с 5-го слоя мы приступили к созданию дефектов различных видов. Более того, благодаря технологии вакуумной инфузии в процессе вакуумирования концентрация связующего постепенно выравнивается по всему материалу. Поэтому в зону 2 (см. рис. 3) благодаря капиллярному эффекту на последнем этапе изготовления па-

нели проникло связующее и равномерно заполнило также эту зону. При дальнейшем исследовании панелей на наличие дефектов и отработке различных средств контроля качества материалов данные нюансы могут сыграть существенную роль.

Литература

- [1] Ковалев С.П., Нелюб В.А., Шелофаст В.В. Многокритериальный анализ разрушения конструкций летательных аппаратов. *Известия высших учебных заведений. Авиационная техника*, 2015, № 4, с. 9–14.
- [2] Александров И.А., Малышева Г.В., Нелюб В.А. и др. Механизм разрушения микроуглепластиков на основе эпоксидных связующих. *Энциклопедия инженера-химика*, 2012, № 4, с. 24–30.
- [3] Марычева А.Н., Нелюб В.А. Технологическое обеспечение качества изготовления деталей из композитов методом вакуумной инфузии. *XLIII Академ. чтения по космонавтике. Сб. тез.*, 2019, с. 56–57.
- [4] Литвинов В.Б., Токсанбаев М.С., Деев И.С. и др. Кинетика отверждения эпоксидных связующих и микроструктура полимерных матриц в углепластиках на их основе. *Материаловедение*, 2011, № 7, с. 49.
- [5] Bochkarev S.V., Tsaplin A.I., Galinovskii A.L. et al. Ultra-jet diagnosis of heat treated material microstructure. *Met. Sci. Heat Treat.*, 2017, vol. 59, no. 5-6, pp. 384–388. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11041-017-0160-7>
- [6] Nelyub V.A. Characteristics of interfacial layers of polymer composite materials. *Polym. Sci. Ser. D*, 2014, vol. 7, no. 4, pp. 310–312. DOI: <https://doi.org/10.1134/S1995421214040091>
- [7] Абашин М.И., Галиновский А.Л., Бочкарев С.В. и др. Моделирование ультраструйного воздействия для контроля качества покрытий. *Физическая мезомеханика*, 2015, т. 18, № 1, с. 84–89.
- [8] Нелюб В.А., Бородулин А.С., Кобец Л.П. и др. Капиллярная гидродинамика олигомерных связующих. *Все материалы. Энциклопедический справочник*, 2016, № 3, с. 43–48.
- [9] Нелюб В.А. Оценка адгезионного взаимодействия между углеродным волокном и эпоксидным связующим. *Клеи. Герметики. Технологии*, 2014, № 7, с. 20–22.
- [10] Тарасов В.А., Галиновский А.Л. Проблемы и перспективы развития гидроструйных технологий ракетно-космического машиностроения. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2013, № 3(15). DOI: <http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2013-3-636>
- [11] Нелюб В.А., Александров И.А., Малышева Г.В. и др. Исследование параметров состояния поверхности углеродных волокон. *Энциклопедия инженера-химика*, 2013, № 5, с. 34–38.
- [12] Абашин М.И. Возможности экспресс-оценки информационно-диагностических параметров изделий ультраструйным методом. *Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии*, 2011, № 4-3(288), с. 128–133.
- [13] Абашин М.И., Барзов А.А., Галиновский А.Л. и др. Ультраструйная экспресс-диагностика материалов и изделий машиностроения. *Научно-технические ведомости СПбГПУ. Наука и образование*, 2011, № 2(123). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/ultrastruynaya-ekspress-diagnostika-materialov-i-izdeliy-mashinostroeniya>
- [14] Судник Л.В., Галиновский А.Л., Колпаков В.И. и др. Модернизация технологии оценки эксплуатационных динамических свойств композиционной конструкцион-

- ной керамики путем использования гидроабразивной ультразвуки. *Наука и образование: научное издание*, 2014, № 3. URL: <http://engineering-science.ru/doc/701307.html>
- [15] Барзов А.А., Галиновский А.Л., Абашин М.И. Анализ физико-технологических особенностей процесса ультразвуковой диагностики. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2012, № 11. DOI: <http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2012-11-421>

Прохорова Мария Алексеевна — студентка кафедры «Технологии ракетно-космического машиностроения», МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация.

Юлиана Зонляйн — студентка факультета «Аэрокосмической промышленности и геодезии», Мюнхенский технический университет, Мюнхен, Германия.

Цзя Чжэньюань — аспирант кафедры «Технологии ракетно-космического машиностроения», МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация.

Научный руководитель — Галиновский Андрей Леонидович, доктор педагогических наук, доктор технических наук, профессор кафедры «Технологии ракетно-космического машиностроения», МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация.

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Прохорова М.А., Юлиана Зонляйн, Цзя Чжэньюань. Создание дефектной композиционной панели для отработки методов диагностики. *Политехнический молодежный журнал*, 2020, № 06(47). <http://dx.doi.org/10.18698/2541-8009-2020-06-621>

CREATING A DEFECTIVE COMPOSITE PANEL FOR TESTING DIAGNOSTIC METHODS

M.A. Prokhorova

mary.prokhorova.bmstu@gmail.com

SPIN-code: 9107-0563

Juliana Soehnlein

juliana.soehnlein@gmail.com

SPIN-code: 4778-5061

TSzia CHzheniuan

yurajia@gmail.com

SPIN-code: 7263-7750

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation
Munich Technical University, Munich, Germany

Abstract

The article describes the process of creating panels from a composite material by the method of vacuum infusion with various types of defects pre-embedded in them. The most common types of defects are examined that can occur in parts made of composite materials as a result of a violation of the process, the presence of defects in the starting material (in particular, defects in the reinforcing fabric), as well as defects associated with the low qualification of the worker. Creating a defective panel is necessary for testing control methods using traditional diagnostic methods.

Keywords

Vacuum infusion method, carbon fabric, defects in the composite part, adhesion

Received 20.05.2020

© Bauman Moscow State Technical University, 2020

References

- [1] Kovalev S.P., Nelyub V.A., Shelofast V.V. Multi-criteria analysis of aircraft structures fracture. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Aviatsionnaya tekhnika*, 2015, no. 4, pp. 9–14 (in Russ.). (Eng. version: *Russ. Aeronaut.*, 2015, vol. 58, no. 4, pp. 370–375. DOI: <https://doi.org/10.3103/S1068799815040029>)
- [2] Aleksandrov I.A., Malysheva G.V., Nelyub V.A., et al. Study of fracture surfaces of black-reinforced plastics made by melted and dissolved technologies. *Entsiklopediya inzhenera-khimika* [Encyclopaedia of Chemical Engineer], 2012, no. 4, pp. 24–30 (in Russ.).
- [3] Marycheva A.N., Nelyub V.A. [Technological maintenance of composite parts production quality by vacuum infusion method]. *XLIII Akadem. chteniya po kosmonavtike. Sb. tez.* [43th Academic Readings on Cosmonautics. Abstracts], 2019, pp. 56–57 (in Russ.).
- [4] Litvinov V.B., Toksanbaev M.S., Deev I.S., et al. Kinetics of curing the epoxy binders and microstructures of polymer particles in carbon reinforced plastics based on them. *Materi- alovedenie*, 2011, no. 7, pp. 49 (in Russ.).
- [5] Bochkarev S.V., Tsaplin A.I., Galinovskii A.L. et al. Ultra-jet diagnosis of heat treated material microstructure. *Met. Sci. Heat Treat.*, 2017, vol. 59, no. 5-6, pp. 384–388. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11041-017-0160-7>
- [6] Nelyub V.A. Characteristics of interfacial layers of polymer composite materials. *Polym. Sci. Ser. D*, 2014, vol. 7, no. 4, pp. 310–312. DOI: <https://doi.org/10.1134/S1995421214040091>
- [7] Abashin M.I., Galinovskiy A.L., Bochkarev S.V., et al. Modelling ultra-jet impact for control of coatings quality. *Fizicheskaya mezomekhanika* [Physical Mesomechanics Journal], 2015, vol. 18, no. 1, pp. 84–89 (in Russ.).

- [8] Nelyub V.A., Borodulin A.S., Kobets L.P., et al. Capillary hydrodynamics of oligomer binders. *Vse materialy. Entsiklopedicheskiy spravochnik* [All materials. Encyclopaedic reference manual], 2016, no. 3, pp. 43–48 (in Russ.).
- [9] Nelyub V.A. Estimate of adhesion interaction between carbon fiber and epoxy binding agent. *Klei. Germetiki. Tekhnologii* [Adhesives. Sealants. Technologies], 2014, no. 7, pp. 20–22 (in Russ.).
- [10] Tarasov V.A., Galinovskiy A.L. Problems and prospects of ultra-jet technology in rocket space engineering. *Inzhenernyy zhurnal: nauka i innovatsii* [Engineering Journal: Science and Innovation], 2013, no. 3(15). DOI: <http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2013-3-636> (in Russ.).
- [11] Nelyub V.A., Aleksandrov I.A., Malysheva G.V., et al. Study of state parameters of carbon fiber surface. *Entsiklopediya inzhenera-khimika* [Encyclopaedia of Chemical Engineer], 2013, no. 5, pp. 34–38 (in Russ.).
- [12] Abashin M.I. Possibilities of express-estimate of product information-diagnostic parameters by ultra-jet method. *Fundamental'nye i prikladnye problemy tekhniki i tekhnologii*, 2011, no. 4-3(288), pp. 128–133 (in Russ.).
- [13] Abashin M.I., Barzov A.A., Galinovskiy A.L., et al. Ultra-jet express diagnostics of mechanical engineering materials and products. *Nauchno-tekhnicheskie vedomosti SPbGPU. Nauka i obrazovanie*, 2011, no. 2(123). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/ultrastruynaya-ekspres-diagnostika-materialov-i-izdeliy-mashinostroeniya> (in Russ.).
- [14] Sudnik L.V., Galinovskiy A.L., Kolpakov V.I., et al. Modernization of technology to estimate composite constructional ceramics operational dynamic properties using a hydroabrasive ultrastream. *Nauka i obrazovanie: nauchnoe izdanie* [Science and Education: Scientific Publication], 2014, no. 3. URL: <http://engineering-science.ru/doc/701307.html> (in Russ.).
- [15] Barzov A.A., Galinovskiy A.L., Abashin M.I. Physical processing features analysis of ultrajet diagnostics. *Inzhenernyy zhurnal: nauka i innovatsii* [Engineering Journal: Science and Innovation], 2012, no. 11. DOI: <http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2012-11-421> (in Russ.).

Prokhorova M.A. — Student, Department of Aerospace Engineering Technologies, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation.

Juliana Soehnlein — Student, Department of Aerospace and Geodesy, Munich Technical University, Munich, Germany.

TSzia CHzheniuan — PhD Student, Department of Aerospace Engineering Technologies, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation.

Scientific advisor — Galinovskiy A.L., Dr. Sc. (Ped.), Dr. Sc. (Eng.), Professor, Department of Aerospace Engineering Technologies, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation.

Please cite this article in English as:

M.A. Prokhorova, Juliana Soehnlein, TSzia CHzheniuan. Creating a defective composite panel for testing diagnostic methods. *Politekhnikeskiiy molodezhnyy zhurnal* [Politechnical student journal], 2020, no. 06(47). <http://dx.doi.org/10.18698/2541-8009-2020-06-621.html> (in Russ.).