

МОДЕЛИ УПЛОТНЕНИЯ И ПОЛИМЕРИЗАЦИИ ПРЕПРЕГОВ ПРИ ИНФУЗИИ ПЛЕНОЧНОГО СВЯЗУЮЩЕГО В ПРОИЗВОДСТВЕ КОМПОЗИТНЫХ ДЕТАЛЕЙ АВИАЦИОННОЙ ТЕХНИКИ

Целью данного обзора являются рассмотрение и оценка существующих моделей уплотнения наполнителя и полимеризации связующего в ходе создания композитных изделий методом инфузии пленочного связующего и определение путей дальнейшего их усовершенствования.

В настоящее время ведущие зарубежные и отечественные ученые активно ведут исследования, направленные на разработку материалов и технологий, позволяющих снизить затраты при изготовлении изделий из полимерных композиционных материалов (ПКМ) [1–3]. Активно проводятся научно-исследовательские работы, направленные на разработку безавтоклавных технологий изготовления композитных конструкций в целях снижения их стоимости. К числу технологий, с помощью которых можно без использования автоклава изготовить конструкцию из ПКМ с высоким уровнем упругих и прочностных свойств материала, относятся: вакуумное формование ПКМ – VARTM пропитка под вакуумом (Vacuum assisted resin transfer molding) и RFI (Resin Film Infusion), и формование ПКМ с помощью пропитки под давлением – RTM (Resin transfer molding) [4].

Все перечисленные выше технологии характеризуются тем, что процесс совмещения наполнителя со связующим происходит непосредственно в момент формования ПКМ, что позволяет использовать тканые преформы с различной схемой армирования и повысить качество получаемой композитной конструкции за счет исключения ошибки при выкладке наполнителя, уменьшения пористости и инородных включений в композите.

Однако технологии, предполагающие совмещение полимерного связующего и наполнителя непосредственно на оснастке открытого типа, такие, как вакуумная инфузия, имеют существенный недостаток – сложность контроля содержания связующего в готовом изделии, что может стать причиной разнотолщинности и существенного разброса физико-механических свойств. В целях устранения такого недостатка для контроля содержания связующего в изделии используют две жесткие полуматрицы (технология RTM), что приводит к существенному аппаратному усложнению процесса [5, 6]. Метод RFI (технология пропитки пленочным связующим) является компромиссным решением для устранения этого недостатка – он позволяет задавать и контролировать содержание связующего в получаемом ПКМ, но в то же время не требует использования сложных полужорм-оснасток. Перспективная технология

RFI, обеспечивающая снижение трудоемкости и энергоемкости процесса изготовления детали, активно используется за рубежом при производстве различных деталей авиационной техники, в то время как на Украине она, пока еще, не нашла массового применения.

RFI – метод изготовления деталей, при котором связующее в виде пленки укладывается на оснастку совместно с пакетом сухого наполнителя (см. рисунок). После изготовления вакуумного мешка оснастка помещается в автоклав, в котором происходит расплавление пленочного связующего.

Автоклавное давление через вакуумный мешок воздействует на пакет наполнителя и вдавливают его в расплавленное связующее. Толщину пленочного связующего выбирают из условия заданного объемного содержания наполнителя в композите. Для толстых пакетов пленочное связующее чередуют с заданным количеством слоев наполнителя. Связующее при пропитке может находиться в весьма вязком состоянии, но путь, на который происходит его распространение, на несколько порядков меньше, чем при RTM и VARTM методах и составляет не более 1–2 мм. Таким образом, открывается возможность использования вязких связующих, применяемых для изготовления препрегов для аэрокосмической промышленности. В источнике [7] описывается применение данного метода для изготовления монолитных подкрепленных и трехслойных панелей сотовым или иным наполнителем.

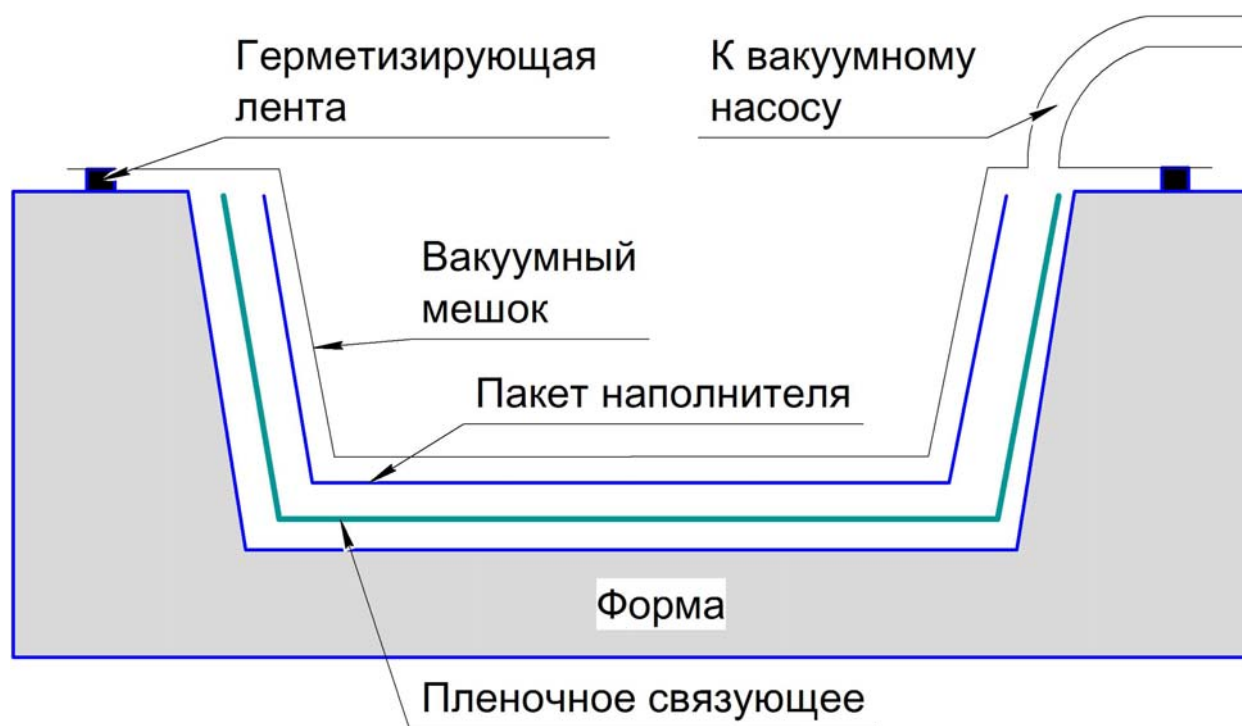


Схема изготовления детали методом RFI

В настоящее время есть необходимость в разработке модели пропитки армирующего материала связующим и его отверждения при безавтоклавных способах формования композитных конструкций. Критически важно обеспечить возможность прогнозирования течения связующего и уплотнения наполнителя в процессе формования. Модель должна иметь возможность определять оптимальный цикл отверждения без необходимости проведения дорогостоящего метода проб и ошибок.

Предложено довольно много моделей прогнозирования потока связующего через волокнистую заготовку, но только несколько из них учитывают перемещение волокон в процессе формования.

Лус и Спрингер [8] разработали модель уплотнения слоистого КМ, сформировав основу для будущей исследовательской деятельности моделирования течения связующего через многослойный пакет однонаправленного армирующего волокна. В своей работе они экспериментально и аналитически исследовали механизм достижения монолитности. Для получения уравнения, определяющего течение связующего, они использовали совместное решение закона Дарси, уравнений равновесия линейных механических моментов и закон сохранения масс. Тем не менее в этой модели не была учтена деформация волокна в процессе пропитки, при этом было рассмотрено уплотнение слоистого КМ, обусловленное вытеканием связующего.

Необходимая составляющая для любой модели, учитывающей деформацию волокнистого наполнителя, - это отношение между деформацией волокна и проницаемостью. Объемное содержание наполнителя, пористость и проницаемость наполнителя изменяются при деформации волокон. Требуются отношения между этими свойствами и применяемым давлением или деформацией слоистого КМ. Часто применяемое выражение для моделирования проницаемости существует благодаря Карману и Козени [9–11]. Лус и МакРей [12] и Сонг [13] предложили эмпирические зависимости с хорошими результатами сходимости с экспериментальными данными. Некоторые исследователи [14–16] разрабатывали аналитические модели двойной шкалы, которые учитывают изменение проницаемости между жгутами волокна и пространства между ними в армированной ткани.

Уравнение проницаемости Кармана–Козени [9] основано на концепции гидравлических радиусов:

$$S_{ij} = \frac{r_f^2}{4k_{uj}} \cdot \frac{(1 - V_f)^3}{V_f^2}, \quad i, j = 1, 2, 3, \quad (1)$$

$$S_{ij} = \frac{r_f^2}{4k_{uj}} \cdot \left(\sqrt{\frac{V'_a}{V_f}} - 1 \right)^3 \cdot \left(\frac{V'_a}{V_f} + 1 \right)^{-1}, \quad i, j = 1, 2, 3, \quad (2)$$

где S_{ij} – проницаемость, м^2 ; k_{ij} – постоянная Кармана–Козени; r_f – радиус волокна, м ; V_f – объемное содержание наполнителя; V'_a – объемное содержание, ограничивающее поток текучей среды.

Эта модель определяет проницаемость массива выровненных цилиндров, основанную на объемном содержании наполнителя, радиусе цилиндра и одной постоянной, за что была подвергнута критике за неоднозначность данной постоянной, хотя и демонстрировала адекватное прогнозирование проницаемости выровненных волокон в плоскости [17]. Тем не менее такая модель неудовлетворительно прогнозировала проницаемость в поперечном направлении. Гутовски и другие [18, 19] предложили обобщение (2).

Уравнение (2) позволяет лучше прогнозировать поперечную проницаемость, несмотря на то, что современные работы имеют склонность к одобрению использования отношений проницаемости, полученных из экспериментальных данных. Гутовски и другие [18, 19] предложили параметр объемного содержания наполнителя, ограничивающий поток. Этот параметр определяется как объемное содержание наполнителя (менее, чем максимально достижимое), при котором все пути течения закрыты благодаря перемещению волокон. Главное отличие между уравнениями (1) и (2) в том, что последнее учитывает значительное уменьшение проницаемости перед приближением к доступному значению объемного содержания наполнителя, что согласуется с экспериментальными данными. Доступное значение объемного содержания наполнителя – это максимальное объемное содержание наполнителя, достигаемое при любом давлении.

Другим неотъемлемым элементом модели является деформация волокон при формовании композита, которая не всегда учитывается в предлагаемых уравнениях. Исследование Ван Вука [20] выявило уплотнение волокон в сжимаемости шерстяной пряжи. Он рассматривал волокна как балки Кирхгофа и допускал, что не происходит скручивания, проскальзывания или удлинения. Гутовски и другие [18, 19, 21–25] учитывают деформацию волокон, допуская, что волокна имеют математически характеризуемую периодическую волнистость, и что их поведение при уплотнении можно приближенно описывать посредством сети балок Кирхгофа между множеством соприкасающихся точек. Выражение, полученное Гутовски и другими, является более простым, чем выражение Ван Вука:

$$P = A_s \cdot \left(\sqrt{\frac{V_f}{V_0}} - 1 \right) \cdot \left(\sqrt{\frac{V_a}{V_f}} - 1 \right)^{-2}, \quad (3)$$

где A_s – коэффициент жесткости; P – поддерживаемое давление, Па; k_{ij} – начальное объемное содержание наполнителя; V_a – достижимое объемное содержание наполнителя.

Аналитически завершенная и экспериментально подтвержденная Вайнманом [26], Кинджери [27] и другими, эта модель была разработана в течение продолжительного времени и была применена другими исследователями [28, 29].

Адвани и другие [29] применили уравнение (3) к пористой среде двойной шкалы для процесса RTM и получили высокое согласование с экспериментальными результатами для некоторых случаев, но признали необходимость модификации уравнения для получения возможности применения к сложной геометрии и/или различным уровням уплотнения. Чжэн и Чжоу [14, 15] использовали концепцию балок Кирхгофа, чтобы описать изменение формы в тканых волокнистых преформах. Робитали и Гавани [30] использовали эту идею для прогнозирования поведения повторяющегося уплотнения и релаксации как в сухих, так и пропитанных преформах.

Чжен и другие [16] позже предложили простую зависимость для сухого уплотнения тканой волокнистой преформы. Они определили модуль объемной деформации как аналитическую функцию от объемного содержания наполнителя и пяти параметров. Модуль объемной деформации называется модулем объемного сжатия в [16]. Параметры для модуля объемного сжатия были определены в результате эксперимента, но для ограниченной материальной базы. Главный недостаток данного значения модуля объемного сжатия заключается в том, что оно получено для сухих преформ.

Лус и другие [31] анализировали деформацию волокна, допуская стандартное непрерывное определяющее отношение для гомогенных эластичных ортотропных материалов, и использовали правило смеси для определения необходимых эластичных и теплофизических свойств. Сочетая уравнение неразрывности, закон Дарси и равновесие линейных механических моментов, они описали деформацию и насыщение многонаправленной основовязаной сшитой угольной преформы при использовании процесса RFI. При этом они использовали метод конечных элементов/контрольных объемов для нахождения приблизительного решения основного уравнения. Модель включала в себя частично насыщенную пористую среду, алюминиевую оснастку, дренажный слой и другие материалы, необходимые для реализации RTM:

$$\sigma_{ij} = C_{ijkl} (e_{kl} - a_{kl} \cdot (T - T_0)) - f \bar{\phi} p \delta_{ij}, \quad (4)$$

где σ_{ij} – тензор напряжения; C_{ijkl} – постоянные упругости; e_{kl} – тензор бесконечно малой деформации; a_{kl} – тензор коэффициент температур-

ного расширения; T, T_0 – текущая и исходная температуры соответственно; f – объемная доля пустоты, замещенной текучим телом; $\bar{\varphi}$ – пористость преформы; p – давление текучего тела. Давление текучей среды в этом отношении идентично давлению текучей среды в модели Луса и других.

Каждое представленное аналитическое выражение требует определения набора параметров для рассматриваемого материала. В большинстве случаев это приводит к лабораторным экспериментам, обработке и отбору данных, что является затратным по критериям времени и материальных средств. На сегодняшний день нет доступной модели, которая позволяет описать процесс совмещения компонентов ПКМ и его отверждения (composites consolidation) на базе легко определяемых свойств материала, таких, как плотность, модуль упругости и диаметр волокна, характеристик связующего.

Столкнувшись с необходимостью проводить эксперименты, многие исследователи предпочитают использовать эмпирические [12, 13, 30–33] или статистические [17] отношения для описания деформации волокон при приложенной нагрузке и соответствующем изменении проницаемости. Было продемонстрировано, что выражение степенной зависимости, такое, как уравнение (5), может описать кривую уплотнения как функцию от давления для широкого ряда материалов [32]:

$$V_f = A \cdot P^b. \quad (5)$$

Выражение степенной зависимости также используется для описания изменений проницаемости в зависимости от объемного содержания наполнителя [13, 31]. Экспериментальные данные для релаксации волокна под постоянной деформацией соответствуют следующим уравнениям [32, 13]:

$$\frac{P}{P_0} = 1 - C \cdot t^{\frac{1}{D}}; \quad (6)$$

$$V_f = a(1 - e^{b \cdot p}); \quad (7)$$

$$V_f = c + d \frac{p}{f - p}, \quad (8)$$

где P_0 – начальное давление релаксации, Па; $A, B, C, D, a, b, c, d, f$ – постоянные, определяемые из экспериментальных данных; t – время, истекшее от момента начала отсчета времени, с.

Сонг [13] вывел эмпирическое отношение, которое описывает перемещение волокон в процессе вакуумной инфузии. Изначально сухая преформа, загерметизированная под гибкой оснасткой, пропитывается связующим с помощью вакуума (VARTM). Экспериментальные данные

для уплотнения сухого волокна, уплотнения пропитанного волокна и релаксация насыщенного волокна описываются уравнениями (7) и (8). Изменение проницаемости в зависимости от объемного содержания наполнителя было учтено в следующем выражении:

$$S = g \cdot V_f^2, \quad (9)$$

где S – проницаемость, м^2 ; V_f – объемное содержание наполнителя; g – постоянные, определяемые из экспериментальных данных.

Процесс VARTM анализировался с использованием методов конечных элементов и контрольных объемов, и было получено хорошее согласование между вычисленными результатами и экспериментальными данными.

Вериеенко и другие [34] численно изучили процесс пропитки пленочным связующим путем рассмотрения его как задачи с подвижной границей. Использовался непрерывный подход для описания напряжений и деформаций в волокнистой преформе.

Можно заключить, что теория для пропитки пленочным связующим находится на стадии разработки. Значительные отличия метода пропиткой пленочным связующим (RFI) от методов пропитки вакуумом (VARTM) и пропитки под давлением (RTM) делают метод наиболее привлекательным для применения при производстве силовых и ответственных деталей аэрокосмической отрасли. Метод RFI требует еще менее дорогостоящей оснастки, чем метод VARTM, но при этом позволяет изготавливать легковоспроизводимые и равнопропитанные изделия за счет того, что необходимое количество связующего еще до начала инфузии равномерно распределено по поверхности пакета наполнителя и частично по его толщине (в случае с поочередной укладкой слоев наполнителя и связующего).

Таким образом, становится задача разработки модели, способной прогнозировать течение связующего и уплотнение наполнителя в процессе оптимального цикла отверждения композитной конструкции без необходимости проведения экспериментальной отработки. В целом модель будет состоять из трех взаимосвязанных частей: кинетического уравнения, описывающего прохождение реакции отверждения полимерного связующего, термовязкостного отношения, показывающего изменение вязкости в процессе отверждения, и динамической модели движения потока пленочного связующего в процессе пропитки и формования.

Список использованных источников

1. Каблов, Е.Н. Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года [Текст] / Е.Н. Каблов // *Авиационные материалы и технологии: юбилейный науч.-техн. сб. (приложение к журналу «Авиационные материалы и технологии»)* / ВИАМ. – М., 2012. – С. 7–17.
2. Гращенков, Д.В. Стратегия развития композиционных и функциональных материалов [Текст] / Д.В. Гращенков, Л.В. Чурсова // *Авиационные материалы и технологии. Юбилейный науч.-техн. сб. (приложение к журналу «Авиационные материалы и технологии»)* / ВИАМ. – М., 2012. – С. 231–242.
3. Коган, Д.И. Полимерные композиционные материалы, полученные путем пропитки пленочным связующим [Текст] / Д.И. Коган, Л.В. Чурсова, А.П. Петрова // *Композиционные материалы*. – 2011. – № 11. – С. 2–6.
4. Новые полимерные связующие для перспективных методов изготовления конструкционных волокнистых ПКМ [Текст] / Р.Р. Мухаметов, К.Р. Ахмадиева, Л.В. Чурсова, Д.И. Коган // *Авиационные материалы и технологии*. – 2011. – № 2. – С. 38–42.
5. Буланов, И.М. Технология ракетных и аэрокосмических конструкций из композиционных материалов [Текст] / И.М. Буланов, В.В. Воробей. – М. : МГТУ им. Н.Э. Баумана, 1998. – 513 с.
6. Крыжановский, В.К. Производство изделий из полимерных материалов [Текст] / В.К. Крыжановский. – СПб. : Профессия, 2008. – 460 с.
7. Patent № 4,622,091 (US), Int. Cl.4 B32B 31/20. Resin film infusion process and apparatus [Текст] / Leslie E. Letterman; The Boeing Comp. – Appl. No. : 676,427 ; Filed Nov. 29, 1984 ; Date of Patent Nov. 11, 1986. – 3 p.
8. Loos, A.C. Curing of Epoxy Matrix Composites [Текст] / A.C. Loos, G.S. Springer // *Journal of Composite Materials*. – 2013. – № 17. – P. 135–169.
9. Carman, P.C. Fluid Flow Through Aligned Fiber Beds [Текст] / P.C Carman // *Journal of Agricultural Science*. – 1939. – № 29. – P. 262–273.
10. Costa, V.A.F. Modeling of Flow and Thermo-Kinetics during the Cure of Thick Laminated Composites [Текст] / V.A.F. Costa, A.C.M. Sousa // *International Journal of Thermal Sciences*. – 2012. – № 42. – P. 15–22.
11. Rahatekar, S.S. Numerical Simulation of Pressure Variation and Resin Flow in Injection Pultrusion [Текст] / S.S. Rahatekar, J.A. Roux // *Journal of Composite Materials*. – 2012. – № 37(12). – P. 1067–1082.
12. Loos, A.C. A Process Simulation Model for the Manufacture of a Blade Stiffened Panel by the Resin Film Infusion Process [Текст] / A.C. Loos,

J.D. Macrae //Composites Science and Technology. – 2006. – № 56. – P. 273–289.

13. Song, X. Vacuum Assisted Resin Transfer Molding (VARTM): Model Development and Verification [Текст] : Ph.D. Dissertation. Virginia Polytechnic Institute and State University – 2003.

14. Chou, T.W. Compaction of Woven Fabric Preforms: Nesting and Multi-Layer Deformation [Текст] / T.W. Chou, B. Chen //Composites Science and Technology. – 2010. – № 60. – P. 2223–2231.

15. Chou, T.W. Compaction of Woven Fabric Preforms in Liquid Composite Molding Processes: Single Layer Deformation [Текст] / T.W. Chou, B. Chen //Composites Science and Technology. – 2011. – № 59. – P. 1519–1526.

16. Chen, B., A Nonlinear Compaction Model for Fibrous Preforms [Текст] / B. Chen, A.H.-D. Cheng, T.-W. Chou // Composites Part A: Applied Science and Manufacturing. – 2011. – № 32. – P. 701–707.

17. Hammami, A. Analysis of the Vacuum Infusion Molding Process [Текст] / A. Hammami, B. R. Gebart // Polymer Composites. – 2010. – № 21(1). – P. 28–40.

18. Gutowski, T.G. Consolidation Experiments for Laminate Composites [Текст] / T.G. Gutowski, Z. Cai, S. Bauer, D. Boucher, J. Kingery, S. Wineman // Journal of Composite Materials. – 2012. – № 21. – P. 650–669.

19. Advanced Composites Manufacturing [Текст] / Gutowski, T.G., Ed. – New York : John Wiley and Sons, 1997.

20. Van Wyk, C.M. Notes on the Compressibility of Wool [Текст] / C.M. Van Wyk // Journal of Textile Inst. – 1939. – № 37. – P. 285–292.

21. Gutowski, T.G. The Consolidation of Laminate Composites [Текст] / T.G. Gutowski, T. Morigaki, Z. Cai // Journal of Composite Materials. – 1987. – № 21. – P. 172–188.

22. Gutowski, T.G. A Resin Flow / Fiber Deformation Model for Composites [Текст] / T.G. Gutowski // SAMPE Quarterly. – 1985. – № 16(4). – P. 58–64.

23. Gutowski, T.G. Resin Flow /Fiber Deformation Experiments [Текст] / T.G. Gutowski, Z. Cai, J. Kingery, S. J. Wineman //SAMPE Quarterly. – 1986. – № 17(4). – P. 54–58.

24. Gutowski, T.G. Experiments in Composites Consolidation: Fiber Deformation [Текст] / T.G. Gutowski, J. Kingery, D. Boucher // Proceedings of the SPE Annual Technical Conference, Boston, 1986. – P. 1316–1320.

25. Gutowski, T.G. Applications of the Resin Flow / Fiber Deformation Model [Текст] / T.G. Gutowski, S. J. Wineman, Z. Cai // 31st International SAMPE Symposium, April 7–10, 1986. – P. 245–254.

26. Wineman, S. J. Viscous Flow Through Aligned Graphite Fibers in Compression [Текст] / S. J. Wineman // S. B. Thesis, MIT, 1995.

27. Kingery, J. C. Composite Process Modeling: Consolidation of Aligned Fiber Assemblies [Текст] / J. C. Kingery // M. S. Thesis, MIT, 1985.

28. Gauvin, R. Compaction and Creep Behavior of Glass Reinforcement for Liquid Composite Molding [Текст] / R. Gauvin, P. Clerk, Y. Lemenn, F. Trochu // Proceedings of the 10th Annual ASM / ESD Advanced Composites Conference, Dearborn, Michigan. November 7–10, 2004. – P. 357–367.

29. Advani, S.G. The Implications of Fiber Compaction and Saturation on Fully Coupled VARTM Simulation [Текст] / S.G. Advani, P. Simacek, J.A. Acheson // Composites Part A: Applied Science and Manufacturing. – 2013. – № 35. – P. 159–169.

30. Robitaille, F. and R. Gauvin. (1999) Compaction of Textile Reinforcements for Composites Manufacturing. III: Reorganization of the Fiber Network [Текст] / F. Robitaille, R. Gauvin // Polymer Composites. – 2009. – № 20(1). – P. 48–61.

31. Process Model Development / Residual Stress Model Development [Текст] : Final Report : Prepared for The Boeing Company ; Loos A.C., Batra R.C., Rattazzi D., Caba A.C., Knott T. – Long Beach, CA, 2008 – Prime Contract Number NAS1-20546. – Purchase Order Number 5XY070866

32. Robitaille, F. Compaction of Textile Reinforcements for Composites Manufacturing. I: Review of Experimental Results [Текст] / F. Robitaille, R. Gauvin. // Polymer Composites. – 2010. – № 19(2). – P. 198–216.

33. Robitaille, F. Compaction of Textile Reinforcements for Composites Manufacturing. II: Compaction and Relaxation of Dry and H₂O Saturated Woven Reinforcements [Текст] / F. Robitaille, R. Gauvin // Polymer Composites. – 2010. – № 19(5). – P. 543–557.

34. Verijenko, V.E., Sevostianov, I.B., von Klemperer, C.J. and B. Chevallereau. (1999) Mathematical Model of Stress Formation During Vacuum Resin Infusion Process [Текст] / V.E Verijenko, I.B. Sevostianov, C.J. von Klemperer, B. Chevallereau // Composites Part B: Engineering. –1999. – №30. – P. 513–521.

Поступила в редакцию 14.09.2015.

*Рецензент: канд. техн. наук, доц. М.А. Шевцова,
Национальный аэрокосмический университет
им. Н. Е. Жуковского «ХАИ», г. Харьков.*