

**РАЗРАБОТКА МЕТОДА КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА
ЦЕЛЬНОТКАНЫХ 3D-ПРЕФОРМ
С ПРИМЕНЕНИЕМ КОМПЬЮТЕРНОЙ ТОМОГРАФИИ****

**DEVELOPMENT OF THE METHOD OF QUALITY CONTROL
WHOLLY WOVEN 3D PREFORMS
WITH APPLICATION OF COMPUTER TOMOGRAPHY**

А.М. КИСЕЛЕВ, П.А. ХИЛОВ, В.С. ПРЯХИН, П.А. АЛЕЙНИКОВ, М.В. КИСЕЛЕВ
A.M. KISELEV, P.A. KHILOV, V.S. PRYAKHIN, P.A. ALEINIKOV, M.V. KISELEV

(ООО НПО "Программируемые Композиты",
ПАО "ОДК-Сатурн",
ООО "Остек-СМТ")
(LLC NPO "Programmable Composites",
Public corporation "ODK-Saturn",
LLC "Ostek-SMT)

E-mail: laibach@mail.ru, pavel.khilov@npo-saturn.ru, pryakhin.v@ostec-group.ru,
Aleynikov.P@ostec-group.ru, kisselev50@mail.ru

Статья посвящена разработке системы контроля качества цельнотканой преформы, изготавливаемой по технологии 3D-ткачества с применением методов компьютерной томографии. Изготовлены два образца 3D-ткани из углеродного и кремнеземного волокна. Проведены томографические исследования структуры полученных образцов. По томографическим изображениям образцов 3D-тканей получена геометрическая модель ткани в ПО "ПРЕФОРМА". Разработана методика сравнительного анализа графических изображений спроектированных и изготовленных образцов. Приведены результаты сравнения изображений по разработанной методике. Выполнены сравнения полученных результатов с известным ПО VGStudio MAX.

The article is devoted to the development of a quality control system for a seamless preform fabricated using 3D-weaving technology using computer tomography techniques. Two samples of 3D-fabric made of carbon and silica fibers were made. Tomographic studies of the structure of the samples were carried out. The geometric model of the tissue in the "PREFORMA" software was obtained from tomographic images of 3D-tissue samples. The technique of comparative analysis of graphic images of designed and manufactured samples is developed. The results of image comparison by the developed method are given. Comparison of the results with the well-known software VGStudio MAX.

Ключевые слова: 3D-ткачество, компьютерная томография, контроль качества, программирование.

Keywords: 3D-weaving, computed tomography, quality control, programming.

* Работа выполнена при финансовой поддержке Фонда содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере, договор №1992ГС1/32675 от 16.05.2017.

** По материалам пленарного доклада на XXI Международном научно-практическом форуме "SMARTEX-2018" (г. Иваново, ИВГПУ, 2018).

В настоящее время в области полимерных композиционных материалов (ПКМ) все большее распространение получают объемно-армированные композиты, в которых в качестве армирующего каркаса используются преформы, изготовленные по технологии 3D-ткачества. Данные технологии позволяют создавать цельнотканое изделие с заранее заданными геометрическими параметрами, соответствующими форме заданной композиционной детали. В области разработки оборудования, реализующего технологию 3D-ткачества, активно работают отечественные предприятия АО "Три-Д" (Московская обл., п. Андреевка), ООО НПТП "Текстор" (г. Казань), ИЦ НТТМ, г. Шуя, и др. В области проектирования цельнотканых объемных преформ появился новый программный комплекс проектирования "ПРЕФОРМА", разработанный ООО НПО "Программируемые Композиты" (г. Кострома).

После изготовления преформ по технологии 3D-ткачества следует этап оценки ее качества. Данный этап особенно важен для условий реального производства ответственных высоконагруженных композиционных изделий с длительным сроком эксплуатации и не допускающих применения ремонтно-восстановительных технологий. В статье разработана методика оценки качества изготовленной 3D-преформы на основе сравнения ее геометрической модели и спроектированной преформы с использованием компьютерной томографии. При использовании томографии в качестве метода оценки разработанной геометрической модели структуры (CAD-модели) появляется необходимость конвертации файлов, получаемых в формате томографа, в файлы твердотельного формата для возможностей последующего сравнения спроектированного изделия и его томографического изображения средствами CAD-сис-

темы. В настоящее время известны следующие системы в данном направлении: ПО 3Dview Materialise Mimics, ПО CAD Monster, ПО Simpleware [1...3]. Все они имеют специфику применения. При этом необходимо отметить, что имеющееся программное обеспечение является зарубежным и ориентированным на обработку изображений деталей машиностроительного профиля, поэтому выявлена необходимость разработки отечественной методики оценки качества изготовления цельнотканых 3D-преформ и реализующего данную методику программного обеспечения для практического внедрения на производстве.

Для исследования структуры 3D-ткани были изготовлены два образца. Первый образец был изготовлен методом 3D-ткачества на экспериментальной установке в ОАО КНИИЛП, описанной в [4]. Для изготовления данного образца использовали крученую $K=20$ кручений/м углеродную нить с линейной плотностью 98×3 текс производства НПЦ УВИКОМ. Размеры исследуемого образца $30 \times 30 \times 20$ мм. Второй образец, предоставленный предприятием АО "Три-Д", был изготовлен из кремнеземной нити с линейной плотностью 125 текс производства ХК "Композит" по технологии 3D-ткачества с использованием механизма жаккарда. Оба образца были исследованы томографическим методом. Томографические исследования выполняли в группе компаний Остек, г. Владимир, на системе GE v|tome|x m300.

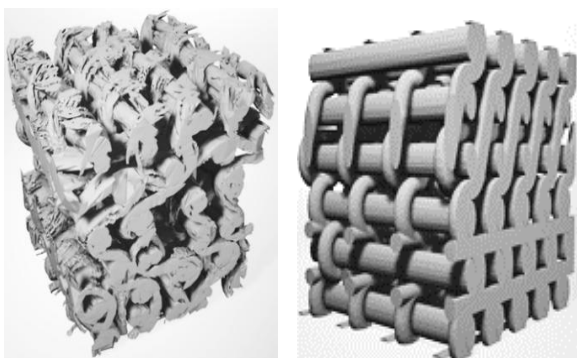
Проектирование геометрической модели преформы осуществляли в программном комплексе "ПРЕФОРМА". При этом решалась реверсивная задача построения геометрической модели преформы по ее томографическому изображению. Последовательные этапы разработанной методики оценки качества 3D-преформы после ее изготовления приведены в табл. 1.

Т а б л и ц а 1

№ п/п	Содержание этапа	Задача этапа
1	Загрузка в ПО "Преформа" исходной геометрии детали в формате *.stl	Ввод исходных данных для проектирования
2	Разбиение 3D-геометрии детали на воксели с заданным шагом H1	Подготовка геометрии детали для построения структуры переплетения по сечениям модели

3	Создание заданной структуры переплетения во всем объеме детали	Разработка САД-модели преформы. Проектирование текстильной структуры по всему объему детали
4	Изготовление преформы	Получение контрольного образца реальной преформы
5	Выполнение томографии преформы	Получение данных об изготовленной преформе в формате томографа
6	Загрузка в ПО "Преформа" данных о преформе в формате *.stl после томографии	Преобразование данных о преформе из формата томографа в формат *.stl с помощью специализированного ПО
7	Разбиение 3D-геометрии преформы на воксели с заданным шагом $H2$. $H1 \neq H2$	Подготовка файла с данными об изготовленной преформе для последующего сравнения
8	Разбиение 3D-геометрии преформы, созданной на этапе 3 методики с шагом $H3=H2$	Подготовка файла с данными о спроектированной САД-модели преформы для последующего сравнения
9	Сравнение 2-воксельных моделей на 8 и 7-м этапах. Построение графиков отклонений размеров в виде 3D-графика отклонений размеров и цветной карты наложения изображений	Оценка качества спроектированной преформы. Выполнение сравнительного анализа геометрии двух файлов

Оценку качества спроектированной преформы из углеродного волокна выполняли путем сравнения геометрических характеристик двух файлов, представленных на рис. 1 (а – спроектированная 3D-модель преформы; б – томография изготовленной преформы из углеродного волокна).

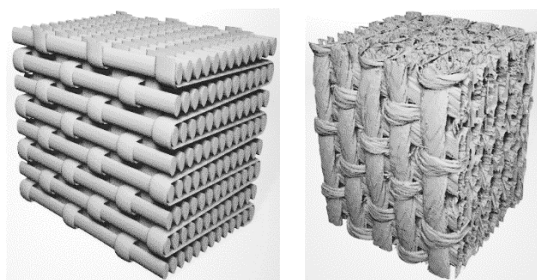


а) б)

Рис. 1

Исследования выполняли согласно методике, описанной в табл. 1. С целью определения возможности применения разработанных методик к различным видам переплетений в структуре преформ из различных нитей выполнены исследования образца из кремнеземного волокна.

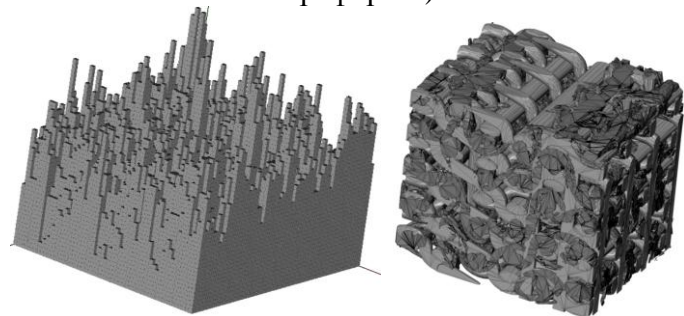
Оценку качества спроектированной преформы из кремнеземного волокна выполняли путем сравнения геометрических характеристик двух файлов, представленных на рис. 2 (а – спроектированная 3D-модель преформы; б – томография изготовленной преформы из кремнеземного волокна б).



а) б)

Рис. 2

Результат сравнения двухвоксельных моделей представлен на рис. 3 (результат сравнения двухвоксельных моделей в виде объемной гистограммы совпадения вокселей и цветовой картины наложения геометрических моделей спроектированной и изготовленной преформы).



а) б)

Рис. 3

По результатам вычислений совпадение геометрических размеров спроектированной и изготовленной преформы из углеродного волокна составило 56,4%. Для второго образца из кремнеземного волокна аналогичные характеристики составили 75% совпадения вокселей.

Еще одним из косвенных показателей качества спроектированной и изготовленной преформы является коэффициент объемного заполнения преформы. Для рассмотренных образцов погрешность коэффициента объемного заполнения проектируемой преформы составляет величину около 1%, что говорит о высокой достоверности разработанной методики.

Для проверки качества разработанной геометрической модели преформ из углеродной и кварцевой нитей выполнялось их сравнение с томографией изготовленных

образцов в программном обеспечении VGStudio MAX (модуль Nominal/Actual comparison) – мирового лидера по разработке ПО для обработки результатов томографических исследований. Результаты выполненных исследований для описанных образцов 3D-тканей представлены на рис. 4 (для образца преформы из углеродной нити: а) – 3D-картина отклонений геометрической формы преформы из углеродного волокна, б) – диаграмма отклонений геометрической формы преформы из углеродного волокна) и на рис. 5 (для образца преформы из кремнеземной нити: а) – 3D-картина отклонений геометрической формы преформы из кремнеземного волокна, б) – диаграмма отклонений геометрической формы преформы из кремнеземного волокна).

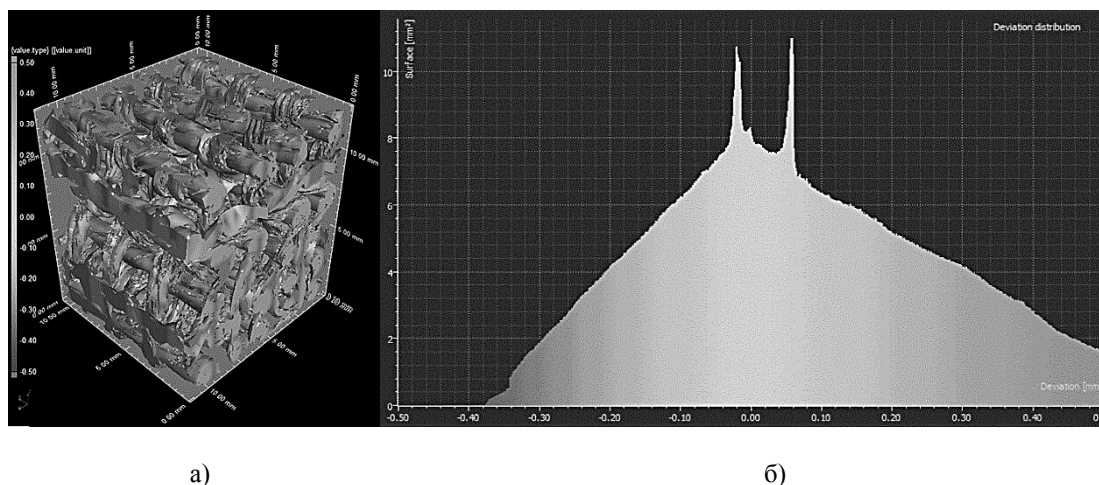


Рис. 4

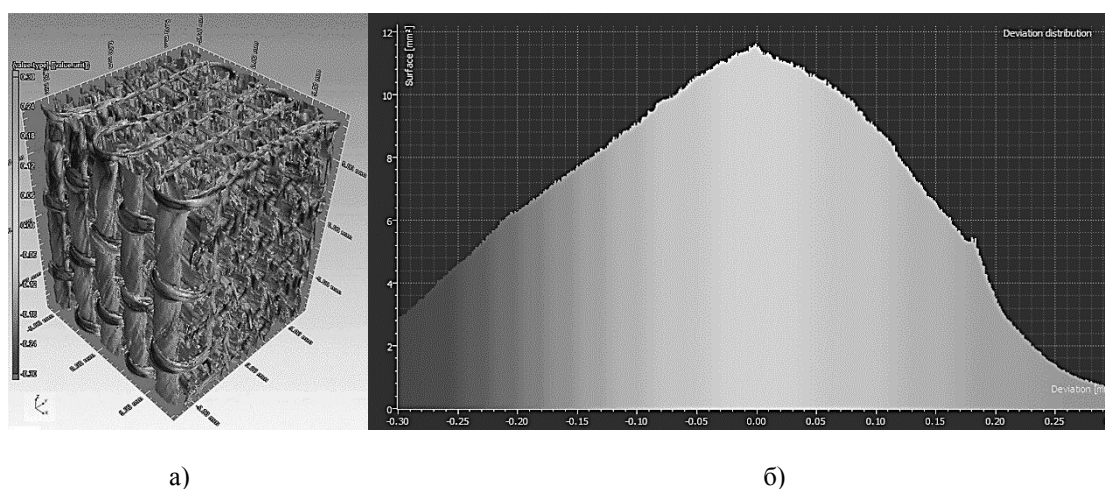


Рис. 5

Анализ полученных данных на рис. 4, 5 показывает, что максимальное отклонение размеров преформы из углеродных нитей лежит в пределах от - 0,38 до + 0,5 мм (общий разброс 0,88 мм). При этом 90% площади поверхности модели лежат в пределах отклонения 0,42 мм. Для преформы из кварцевого волокна максимальное отклонение размеров лежит в пределах от - 0,3 до + 0,3 мм (общий разброс 0,6 мм). При этом 90% площади поверхности модели лежат в пределах отклонения 0,26 мм.

Сопоставляя результаты исследования геометрической формы и размеров спроектированных и изготовленных преформ по разработанной оригинальной методике и известному ПО VGStudio MAX (модуль Nominal/Actual comparison), можно сделать следующие выводы.

1. Принципы сравнения в проведенных исследованиях различны. В ПО VGStudio MAX сравнение геометрии двух файлов выполняется на основе поверхностной полигональной модели. В ПО "Преформа" сравнение геометрии двух файлов выполняется на основе твердотельной модели.

2. В ПО VGStudio MAX оценивается % площади полигонов модели в пределах числовых значений отклонений преформы. При этом нет возможности интегрированно оценить численно % совпадения двух моделей. В ПО "Преформа" оценивается сравнение положений вокселей модели в двух файлах, поэтому возможна интегрированная оценка качества проектирования преформы в целом.

3. Оценка качества проектирования преформы в ПО VGStudio MAX с точки зрения отклонения ее геометрии более точная, по сравнению с ПО "Преформа", вследствие более лучшей аппроксимации произвольной объемной области сложной конфигурации совокупностью полигонов, вместо воксельного представления модели. Однако данное преимущество будет уменьшаться по мере уменьшения размера вокселя в твердотельной модели.

4. Оценка качества преформы в виде твердотельной модели в ПО "Преформа" позволяет выполнить сравнение двух файлов по показателю объемной плотности

преформы, что является существенным показателем для композиционных изделий.

5. Оба рассмотренных подхода к оценке качества проектирования преформы дают более высокую оценку для образца преформы из кремнеземных волокон. По оценке ПО VGStudio MAX максимальное отклонение размеров преформы для углеродного волокна составляет - 0,38 до + 0,5 мм, для образца преформы из кремнеземного волокна - 0,3 до + 0,3 мм. По оценке качества проектирования преформы в ПО "Преформа" для образца из углеродных волокон % соответствия моделей составляет величину 56%, а для преформы из кремнеземного волокна – 75% соответственно, что говорит о тесной корреляции рассмотренных методов в оценке качества проектирования преформы.

6. Оба рассмотренных подхода не учитывают несплошность самой нити, принимая допущение о ее сплошности.

Исходя из сделанных выводов, можно сказать, что разработанное ПО "Преформа" является отечественной разработкой, позволяющей с высокой степенью точности решать задачи оценки качества изготовленных цельнотканых 3D-преформ.

ВЫВОДЫ

Разработана новая отечественная система контроля качества цельнотканых 3D-преформ сложной пространственной конфигурации с применением методов компьютерной томографии.

ЛИТЕРАТУРА

1. Электронный ресурс. Режим доступа: <http://www.companyram.kz/ram-trade-company-cee5>.
2. Электронный ресурс. Режим доступа: www.cadmonster.ru.
3. Электронный ресурс. Режим доступа: www.simpleware.ru.
4. Киселев М.В., Селиверстов В.Ю., Киселев А.М., Ляпунов Л.С. Проектирование и разработка технологии получения 3D-тканых полотен для производства композиционных материалов повышенной прочности // Корпоративный журнал дивизиона "Двигатели для гражданской авиации" АО "ОДК" Трамплин к успеху. – 2017, №10. С. 36...37.

REFERENCES

1. Elektronnyy resurs. Rezhim dostupa: <http://www.companyram.kz/ram-trade-company-cee5>.
2. Elektronnyy resurs. Rezhim dostupa: www.cad-monster.ru.
3. Elektronnyy resurs. Rezhim dostupa: www.simpleware.ru.
4. Kiselev M.V. Seliverstov V.Yu., Kiselev A.M., Lyapunov L.S. Proektirovanie i razrabotka tekhnologii

polucheniya 3D-tkanyh poloten dlya proizvodstva kompozitsionnykh materialov povyshennoy prochnosti // Korporativnyy zhurnal diviziona "Dvigateli dlya grazhdanskoy aviatsii" AO "ODK" Trampin k uspekhу. – 2017, №10. S. 36...37.

Рекомендована заседанием Совета ООО НПО "ПК". Поступила 23.08.18.
