

## КОНТРОЛЬ КАЧЕСТВА ЦЕЛЬНОТКАНЫХ 3D-ПРЕФОРМ МЕТОДОМ КОМПЬЮТЕРНОЙ ТОМОГРАФИИ

### QUALITY CONTROL OF COLORFUL 3D-PREFORMS THE METHOD OF COMPUTER TOMOGRAPHY

М.В. Киселев, А.М. Киселев

M.V. Kiselev, A.M. Kiselev

НПО «Программируемые композиты», (г.Кострома)

LLC NPO "Programmable Composites", (Kostroma)

E-mail: laibach@mail.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 ткан в ПО «ПРЕФОРМА». Разработана методика сравнительного анализа графических изображений спроектированных и изготовленных образцов. Приведены результаты сравнения изображений по разработанной методике.

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

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.

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

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, позволяющей создавать цельнотканое изделие с заранее заданными геометрическими параметрами, соответствующими форме заданной композиционной детали. На пути реализации данной технологии много проблем. Это и отсутствие отечественного оборудования, выпускаемого серийно, реализующего технологию 3D ткачества и отсутствие систем проектирования цельнотканых объемных преформ сложной пространственной конфигурации.

В области разработки оборудования, реализующего технологию 3D ткачества активно работают отечественные предприятия АО «Три-Д» (Московская обл., п. Андреевка), ООО НПП «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 применение ремонтно-восстановительных технологий.

Одним из современных методов неразрушающего контроля качества изделий является рентгеновская компьютерная томография (КТ), которая позволяет обнаруживать и измерять трехмерные микроскопические дефекты, контролировать геометрические параметры изделий — линейные и угловые размеры, а также проводить полный анализ отклонений

смоделированной формы от реального образца, тем более, что степень детализации исследуемого образца томограф позволяет регулировать вплоть до различения филамент нитей. Именно производители томографического оборудования являются разработчиками систем контроля геометрических параметров спроектированного и изготовленного изделия через его томографическое изображение. Мировым лидером в данном направлении является фирма Volume Graphics с программным модулем VGStudio MAX (модуль Nominal/Actual comparison). К сожалению, отечественные разработки в данном направлении отсутствуют.

Глобальной проблемой оценки соответствия спроектированного изделия от реально изготовленного, с применением компьютерной томографии, заключается в том, что при проектировании изделий в любых CAD системах мы получаем выходной файл твердотельной модели, в заданном пользователем формате. Результатом работы компьютерного томографа являются выходные файлы в виде облака точек, поверхностных моделей, моделей виртуальной реальности и др., которые не являются форматами файлов твердотельной модели.

Таким образом 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 системы. Данная задача конвертации томографических изображений является отдельным самостоятельным направлением в науке. 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. Рассмотренное программное обеспечение обладает очень высокой стоимостью, и не опробовано для решения задач, в области текстильного материаловедения, в частности оценки качества цельнотканых объемных каркасов для последующего изготовления композиционных деталей. 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 3D ткани. Первый образец был изготовлен методом 3D ткачества на экспериментальной установке в ОАО КНИИЛП, описанной в [4]. Для изготовления данного образца использовалась крученая с  $K=20$  кручений/метр углеродная нить с линейной плотностью 98х3 Текс производства НПЦ УВИКОМ. Размеры исследуемого образца 30х30х20 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 выполнялись в группе компаний Остек г. Владимир на системе GE v|tome|x m300.

Основой разработанной методики является сопоставление геометрии преформы в воксельном формате, спроектированной в CAD системе и воксельной модели изготовленной преформы в формате томографа. Проектирование геометрической модели преформы осуществлялось в программном комплексе «ПРЕФОРМА». При этом решалась реверсивная задача построения геометрической модели преформы по ее томографическому изображению. Размер вокселя может регулироваться пользователем, что повышает точность представления описания пустот в объемах 3D структур.

Очень важным в данной методике является возможность учета любой, произвольно созданной с помощью CAD системы, структуры переплетений в объеме преформы. Последовательные этапы уточненной методики приведены в таблице 1.

## Последовательные этапы методики оценки качества 3D преформы после ее изготовления

№ 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 $H_1$	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 $H_2$ . $H_1 \neq H_2$	Подготовка файла с данными об изготовленной преформе для последующего сравнения
8	Разбиение 3D геометрии преформы, созданной на этапе 3 методики с шагом $H_3=H_2$	Подготовка файла с данными о спроектированной САД модели преформы для последующего сравнения
9	Сравнение 2-х воксельных моделей на 8 и 7 этапах. Построение графиков отклонений размеров в виде 3D графика отклонений размеров и цветной карты наложения изображений	Оценка качества спроектированной преформы. Выполнение сравнительного анализа геометрии 2-х файлов.

Алгоритмы в разработанном программном обеспечении соответствуют этапам реализации методик, описанных в таблице 1. Основой сравнительного анализа геометрических отклонений размеров спроектированной и изготовленной преформы является разработанный ранее эвристический алгоритм разбиения произвольной 3D области на воксели с заданным размером. Результатом сравнительного анализа двух преформ в программном обеспечении является 3D график совпадения вокселей двух моделей по всем сечениям преформы и интегрированная оценка совпадения геометрических параметров в процентах.

Оценка качества спроектированной преформы из углеродного волокна выполнялась путем сравнения геометрических характеристик двух файлов, представленных на рис. 1.

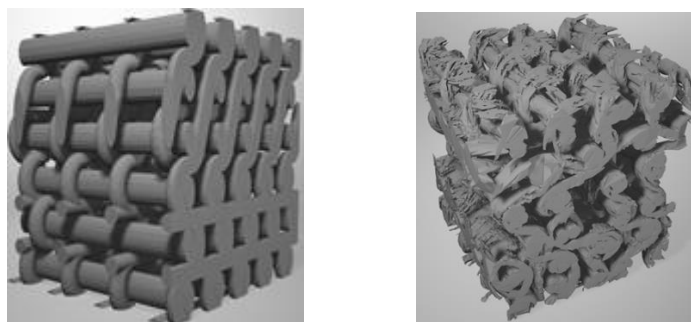


Рис.1. Спроектированная 3D модель преформы и томография изготовленной преформы из углеродного волокна

Исследования выполнялись согласно методике, описанной в таблице 1.

С целью определения возможности применения разработанных методик к различным видам переплетений в структуре преформ из различных нитей, выполнены исследования образца из кремнеземного волокна.

Оценка качества спроектированной преформы из кремнеземного волокна выполнялась путем сравнения геометрических характеристик двух файлов, представленных на рис. 2.

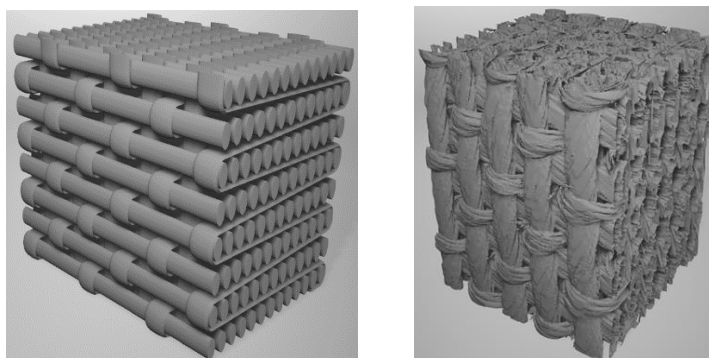
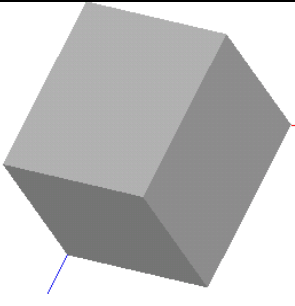


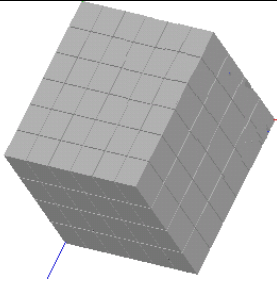
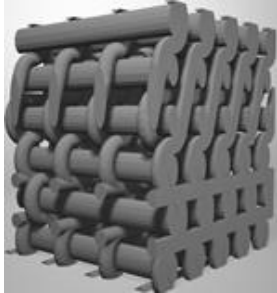


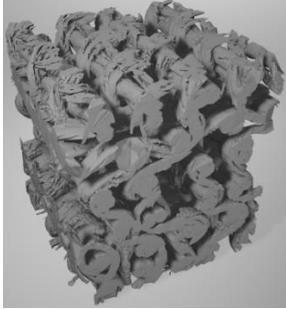
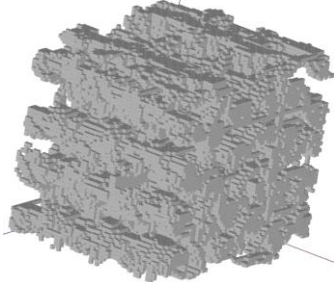
Рис. 2. Спроектированная 3D модель преформы и томография изготовленной преформы из кремнеземного волокна

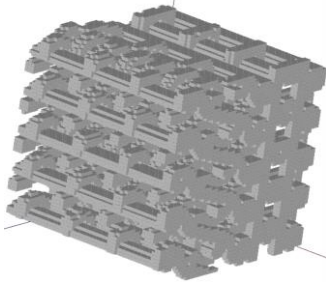
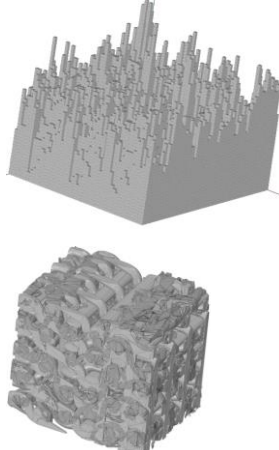
Результаты этапов реализации методики для преформы из углеродного волокна приведены в таблице 2.

Таблица 2

Результаты этапов реализации методики для образца из углеродных волокон

№ п/п	Содержание этапа	Результат
1	Загрузка в ПО «Преформа» исходной геометрии детали в формате *.stl	

2	Разбиение 3D геометрии детали на воксели с заданным шагом H1	
3	Создание заданной структуры переплетения во всем объеме детали	
4	Изготовление преформы	
5	Выполнение томографии преформы	
6	Загрузка в ПО «Преформа» данных о преформе в формате *.stl после томографии	
7	Разбиение 3D геометрии преформы на воксели с заданным шагом H2. H1 не=H2	

8	Разбиение 3D геометрии преформы, созданной на этапе 3 методики с шагом $H3=H2$	
9	Сравнение 2-х воксельных моделей на 8 и 7 этапах.	

По результатам вычислений совпадение геометрических размеров спроектированной и изготовленной преформы из углеродного волокна составило 56,4%, при разбиении вокселями со стороной – 0,2 мм. Для второго образца из кремнеземного волокна аналогичные характеристики составили 75% совпадения вокселей.

Причин расхождения геометрических размеров спроектированной и изготовленной преформ много. Это и неплотность представления нити на томографическом изображении, характеристики оборудования и параметры технологического процесса производства преформы, изменение формы поперечного сечения нитей и их ориентации в пространстве и др.

Для рассмотренных двух образцов преформ из различных материалов причины расхождения геометрии размеров спроектированной и изготовленной преформы различные. Для образца из углеродной нити коэффициент объемного заполнения 38,4%, поскольку это структура слоисто-каркасной ткани. Это разреженная структура, для которой характерно существенное смещение положения уточных нитей в сечениях преформы относительно правильной структуры проектируемой. Соседние нити не поддерживаются друг другом и имеют возможность свободно смещаться по объему преформы. При этом наблюдаются повороты поперечного сечения нитей и, вследствие этого, нарушения геометрии структуры всей преформы.

Для второго образца из кремнеземного волокна причина расхождения геометрии размеров спроектированной и изготовленной преформы другая. Для данного образца коэффициент объемного заполнения преформы – 64,90%. Это плотная структура многослойной ткани. По результатам томографии видно, что в данном образце для получения высокой плотности заполнения прошивные нити имеют высокое натяжение, что приводит к деформации нити в местах контакта с уточными нитями. Сечения нитей становится деформированным, отличным от первоначальной проектируемой формы поперечного сечения нитей. Деформация нитей структуры преформы приводит к повышению плотности заполнения ее объема и, следовательно, к изменению геометрии всей структуры преформы. Для плотных структур 3D тканей совпадение геометрии проектируемой структуры преформы и изготовленной существенно выше. Для слоисто-каркасной структуры ткани процент совпадения формы около 56%, а для многослойной

ткани до 75%. Точность разработанной системы проектирования возрастает при увеличении объемной плотности преформы.

Еще одним из косвенных показателей качества спроектированной и изготовленной преформы является коэффициент объемного заполнения преформы. Для рассмотренных образцов погрешность коэффициента объемного заполнения проектируемой преформы составляют величину около 1%, что говорит о высокой достоверности разработанной методики. Данные показатели рассчитаны с использованием САД системы SolidWorks.

Разработанная методика позволяет оценить качество технологического процесса изготовления многослойных тканей, изготавливаемых по технологии 3D ткачества с точностью до размера одного вокселя, размер которого может задаваться пользователем. Таким образом, можно говорить об оценке точности изготовления преформ с наперед заданной погрешностью, задаваемой проектировщиком.

Вывод:

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

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

#### ЛИТЕРАТУРА

- 1.Электронный ресурс. Режим доступа: <http://www.companyram.kz/ram-trade-company-see5>.
- 2.Электронный ресурс. Режим доступа: [www.cadmonster.ru](http://www.cadmonster.ru).
- 3.Электронный ресурс. Режим доступа: [www.simpleware.ru](http://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. №10. 2017. С. 36-37.