

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ГЕОМЕТРИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ
СТРУКТУРЫ 3D-ТКАНИ В ПО "ПРЕФОРМА"**

**IMPROVEMENT OF THE GEOMETRIC MODEL OF THE 3D FABRIC
STRUCTURE IN "PREFORMA"**

*А.Б. БАЛАШОВ, П.А. ХИЛОВ, В.А. КРУПЕННИКОВ,
А.М. КИСЕЛЕВ, Н.В. КИСЕЛЕВ, М.В. КИСЕЛЕВ*

*A.B. BALASHOV, P.A. KHILOV, V.A. KRUPENNIKOV,
A.M. KISELEV, N.V. KISELEV, M.V. KISELEV*

**(ООО НПО "Программируемые Композиты",
Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексева,
ПАО "ОДК-Сатурн")**

**(NPO Programmable Composites LLC,
Nizhny Novgorod State Technical University named after R.E. Alekseev,
PAO UEC-Saturn)**

E-mail: balashovandrej@yandex.ru; khilov p@mail.ru; vitaliv.krupennikov@uec-saturn.ru;
laibach@mail.ru; kstu-tplv@yandex.ru; Kisselev50@mail.ru

На основе изучения компьютерной томограммы структуры нитей для 3D-тканей выявлен факт поворота их сечения вокруг своей оси. Разработана математическая модель структуры ткани с учетом данного фактора.

Based on the study of a computer tomogram of the yarn structure for 3D tissues, the fact of rotation of their section around its axis is revealed. A mathematical model of tissue structure was developed taking into account this factor.

Ключевые слова: геометрическая модель 3D-ткани, математическое моделирование структуры 3D-ткани.

Keywords: geometric model of 3D fabric, mathematical modeling of the structure of 3D fabric.

В рамках федерального проекта "Цифровые технологии", утвержденного в 2018 г., разработаны дорожные карты по различным направлениям науки, в том числе и по новым производственным технологиям. Данная дорожная карта включает субтехнологии "Цифровое проектиро-

вание, математическое моделирование и управление жизненным циклом изделия или продукции", парадигмой которой является применение цифровых двойников (Digital Twin), нацеленных на прохождение с первого раза физических и натурных испытаний новых разрабатываемых изделий.

Ключевой целью данного подхода является сокращение времени разработки высокотехнологичных продуктов за счет уменьшения объема натуральных испытаний и мероприятий по доводке.

В данной статье рассматривается задача построения цифрового двойника геометрической модели 3D-ткани. Данные материалы используются в качестве армирующих преформ при изготовлении изделий композиционных материалов, чаще по технологии инъекции связующего в форму (RTM, LRTM, VARTM). Точность описания разработанной модели преформы влияет на сходимость результатов прочностного анализа и свойств натурального изделия из композиционного материала, что определяет актуальность решаемой задачи.

Описанием геометрической модели 3D-тканей на уровне нити занимались ведущие зарубежные фирмы. Известны разработки программного обеспечения (ПО), такие как WeaveStudio, ScotCAD, WiseTex, Arahne, TexGen, ESI GROUP, Digimat MF & FE (eXstream), TechText CAD и Weave Engineer [1...11]. Из отечественного программного обеспечения известно ПО "Преформа", описание которого дано в [12]. Однако ни в одном из представленных ПО не учитывается фактор поворота поперечного сечения нити вокруг своей оси. В реальном технологическом процессе 3D-ткачества в настоящее время чаще используются крученые нити. Данный факт обусловлен упрощением технологического процесса ткачества с точки зрения снижения контактного взаимодействия высокомодульных волокон с технологической оснасткой ткацкого оборудования. Кроме того, для увеличения линейной плотности нитей и выравнивания их свойств по длине часто применяют операцию трощения (сложение нитей), при этом для получения единой нити ей придают дополнительную крутку с параметрами 20...30 кручений на метр. Таким образом, поперечное сечение уточных нитей не является идеально круглым и при контакте с нитями основы способно принимать формоустойчивое положение, что приводит их к повороту вокруг своей оси. Этот фактор меняет траектории центров нитей преформы,

влияет на их взаимное положение в пространстве и объемное заполнение композиционного материала армирующими волокнами. Данная статья посвящена исследованию поворота сечения нитей вокруг своей оси и учету данного фактора при построении геометрической модели преформы с целью повышения точности построения ее цифрового двойника.

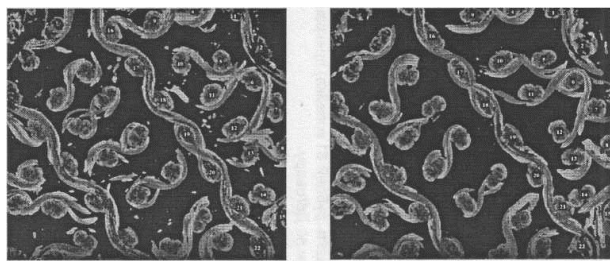
Прежде чем приступить к разработке алгоритма учета поворота нитей в структуре сечения ткани, необходимо детально исследовать структуру 3D-ткани для подтверждения данного факта и изучения особенностей и закономерностей данного процесса.

Для исследования структуры 3D-ткани были взяты два образца 3D-ткани. Первый образец был изготовлен методом ткачества на экспериментальной установке в ОАО КНИИЛП, описанной в [13]. Для изготовления данного образца использовалась крученая с $K=20$ кручений/метр углеродная нить с линейной плотностью 98x2 текс производства НПЦ УВИКОМ. Далее по тексту будем использовать обозначение образца как "образец 1". Вторым образцом, предоставленным предприятием АО "Три-Д", был изготовлен из кремнеземной нити с линейной плотностью 125 текс производства холдинговой компании "Композит" по технологии 3D-ткачества с использованием механизма жаккарда. Далее по тексту будем использовать обозначение образца как "образец 2".

Для исследования были вырезаны образцы ткани с размерами 30x30x20 мм. Исследования проводились методом компьютерной томографии, который позволяет с наперед заданной погрешностью исследовать объемные структуры сложного строения. Томографические исследования выполнялись в группе компаний Остек в г. Владимире на системе GE v|tome|x m300. Компьютерная обработка изображений велась с помощью специализированного программного обеспечения Volume Graphics.

Результаты томографических исследований "образца 1" в различных сечениях представлены на рис. 1, где "а" – это продольный разрез ткани "образца 1" в сечении

1, "б" – это продольный разрез ткани "образца 1" в сечении 2. На рисунке синий цвет – нити утка, красный цвет – нити основы.



а)

б)

Рис. 1

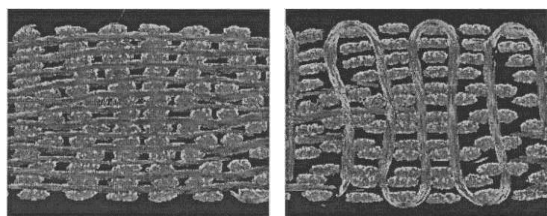
Фактор поворота сечений утков вокруг своей оси определялся по изменению положения эллипсоидного сечения утков в различных сечениях 3D-ткани. Для этого структура ткани исследовалась на томографическом изображении в двух различных сечениях. Расстояние между сечениями 1 и 2 составляло 5 мм. Данный параметр ограничивался размерами самого образца в пределах 30 мм. Несмотря на малое расстояние между сечениями 1 и 2, можно наблюдать существенные изменения положения отдельных сечений утков. Например, уткины 5, 13, 14 повернулись на угол около 90 град. Если сравнивать их положение в сечениях 1 и 2 (рис. 1).

Факт поворота утков вокруг своей оси может быть объяснен практически отсутствием крутильной жесткости самой нити, отсутствием специализированных направляющих при проброске утка и отсутствием крепления или устройств натяжения на концах тканого изделия или специализированных устройств на станке. Можно сказать, что положение сечения утка будет или вероятностным, или определяться взаимодействием с нитями основы или прошивными нитями. Расстояние в 5 мм для исследования изменения положения сечений утков достаточно мало, поскольку длина изделия может составлять десятки и даже сотни сантиметров. На таких существенных расстояниях вероятность изменения ориентации сечения нити существенно возрастает. Однако даже такого малого расстояния между сечениями 1 и 2 достаточно для

доказательства факта поворота утков в сечениях 3D-ткани. Этот фактор является весьма существенным для построения уточненных моделей геометрии структуры 3D-ткани, достигающим величины около 30%. Данная величина погрешности построения геометрической модели структуры 3D-ткани будет напрямую зависеть от соотношения длин диагоналей в сечениях эллипсообразной формы. Чем больше соотношение длин диагоналей, тем выше будет погрешность описания геометрии структуры 3D-ткани, что характерно для сечения нитей из углеродных волокон.

При анализе рис. 1 обратим внимание на то, что ориентация сечения уточной нити определяется характером ее взаимодействия с основной нитью. На рис. 1 видно, что из 46 утков сечения сорока трех из них ориентированы в положение, где большая диагональ эллипса становится параллельной касательной к траектории основной нити, огибающей данную уточину. По статистике данному правилу подчиняется 93,5% утков в сечении на рис. 1, и только 6,5% являются случайными. Для рассматриваемого случая необходимо отметить, что "образец 1" представляет собой структуру слоисто-каркасной ткани, где имеются заполнительные и каркасные слои. При этом для каркасных слоев данное правило соблюдается на 100%, что подтверждается положением утков с 16...22. Этот вывод будет важен для разработки алгоритма поворота утков в структуре 3D-ткани.

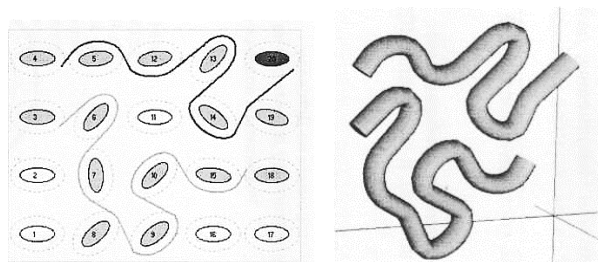
Следует отметить, что для "образца 1" использовалась крученая нить в 2 сложения, в совокупности образующая форму близкую к эллипсу. Для определения возможности поворота нити, изначально имеющей сечение в форме эллипса, было проведено исследование "образца 2". Результаты томографии "образца 2" представлены на рис. 2, где "а" – это продольный разрез ткани "образца 2" в сечении 1, "б" – это продольный разрез ткани "образца 2" в сечении 2. На рисунке синий цвет – нити основы, красный цвет – нити утка и прошивные нити.



а) б)

Рис. 2

Рассматриваемая структура многослойной 3D-ткани образована из трех нитей – основы, утка и прошивной. Это более плотная по определению ткань, в которой нити утка изначально имеют форму эллипса. Анализ положения поперечных сечений утков в "образце 2" в различных сечениях 1 и 2 показывает, что оно также меняется, как и в "образце 1", однако эти изменения существенно меньше. Эллипсовидные сечения утков в "образце 2" практически не имеют поворотов и ориентированы в одном направлении (рис. 1). Очевидно, это связано с тем, что нити основы, ориентированные строго горизонтально, удерживают нити утка в их первоначальном положении, и не дают им возможности поворота. Данное предположение подтверждает сделанный выше вывод для "образца 1" о том, что положение сечения утков и их поворотов, относительно своей оси, в основном будет определяться характером взаимодействия с основными и прошивными нитями. Очевидно, можно ожидать, что более плотные 3D-структуры ткани будут обладать более строгой ориентацией формы утков.



а) б)

Рис. 3

Реализация математической модели поворота утков в 3D-ткани выполнена путем модернизации ПО "Преформа". На рис. 3 представлены варианты скриншотов из разработанного ПО, показывающие схемати-

зированное изображение прокладки основной нити в структуре 3D-ткани (рис. 3-а), и 3D-изображение нити в геометрической модели (рис. 3-б). При этом в зависимости от траектории основной нити меняется положение утков (поворот вокруг своей оси).

На рис. 4 представлены скриншоты из разработанного ПО, показывающие повороты утков по длине нити в 3D-геометрической модели ткани.

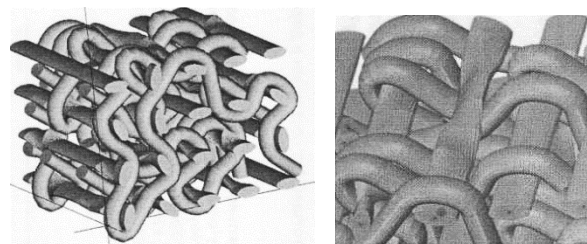


Рис. 4

Выполненные исследования и совершенствование разработанного ПО позволят получать более точные цифровые двойники геометрической структуры 3D-тканей и, следовательно, повысят точность прогнозов механических свойств композиционных изделий, изготовленных на их основе.

ЛИТЕРАТУРА

1. Kolcavova Sirkova B., Iva Mertova. Computer aided woven fabric design // 7th International Conference - TEXSCI 2010 (6-8 September 2010, Liberec, Czech Republic). – Liberec, 2010. P. 9.
2. CAD/CAE systems for weaving EAT [Electronic resource]. - Mode of access: www.designcopecompany.com (дата обращения: 10.06 2018).
3. CAD/CAM systems for weaving - ScotCAD-Textiles Limited [Electronic resource]. - Mode of access: www.scotweave.com (дата обращения: 10.06 2018).
4. CAD/CAM systems for weaving - NedGraphics [Electronic resource]. - Mode of access: www.nedgraphics.com (дата обращения: 10.06 2018).
5. CAD-/CAM systems for weaving - Arachne [Electronic resource]. - Mode of access: www.arahne.si (дата обращения: 10.06 2018).
6. Lomov S., Verpoest I. Modelling of the internal structure and deformability of textile reinforcements: WiseTex software // Proc. of 10th European Conf. Composite Materials (ECCM-10) (Brugge, Belgium, June 3-7, 2002). – Brugge, 2002. P. 1...9.
7. Lomov S.V., Huysmans G., Verpoest I. Hierarchy of Textile Structures and Architecture of Fabric Geometric Models // Textile Research Journal. – Vol. 71, №6, 2001. P. 534...543.

8. Smith M.A., Xiaogang Chen CAD/CAM Algorithms for 3D-Woven Multi-layer Textile Structures, World Academy of Science, Engineering and Technology // International Journal of Chemical, Molecular, Nuclear, Materials and Metallurgical Engineering. – Vol.3, № 9, 2009. P.538...549.

9. Smith M. and Chen X. WeaveStudio CAD/CAM software for 3D-woven structures: EPSRC funded project; University of Manchester. – Manchester, UK, 2005-2008.

10. MSCSoftware - Инженерный анализ и компьютерное моделирование [Электронный ресурс] // Официальный сайт компании MSCSoftware. - Режим доступа : <http://www.mscsoftware.ru> (дата обращения: 10.06.2018).

11. Моделирование процесса плетения bBraidingsimulation [Электронный ресурс] // ESI- group: официальный сайт компании. - Режим доступа: <http://www.esi-group.com> (дата обращения: 10.06.2018).^f

12. Киселев А.М., Хамматова В.В., Голубев С.Е., Киселев М.В. Описание возможностей системы проектирования структуры цельнотканых 3D-преформ "Преформа" // Дизайн. Материалы. Технология. – 2019, № 1(53). С.20...25.

13. 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 прочностью // Двигатели для гражданской авиации: корпоративный журнал дивизиона АО "ОДК" Трамплин к успеху. – 2017, № 10. С. 36...37.

REFERENCES

1. Kolcavova Sirkova V., Iva Mertova. Computer aided woven fabric design // 7th International Conference - TEXSCI 2010 (6-8 September 2010, Liberec, Czech Republic). – Liberec, 2010. P. 9.

2. CAD/CAE systems for weaving EAT [Electronic resource]. - Mode of access: www.designcopecompany.com (data obrashcheniya: 10.06 2018).

3. CAD/CAM systems for weaving - ScotCAD-Textiles Limited [Electronic resource]. - Mode of access: www.scotweave.com (data obrashcheniya: 10.06 2018).

4. CAD/CAM systems for weaving - NedGraphics [Electronic resource]. - Mode of access: www.nedgraphics.com (data obrashcheniya: 10.06 2018).

5. CAD/CAM systems for weaving - Arachne [Electronic resource]. - Mode of access: www.arachne.si (data obrashcheniya: 10.06 2018).

6. Lomov S., Verpoest I. Modelling of the internal structure and deformability of textile reinforcements: WiseTex software // Proc. of 10th European Conf. Composite Materials (ECCM-10) (Brugge, Belgium, June 3-7, 2002). – Brugge, 2002. P. 1...9.

7. Lomov S.V., Huysmans G., Verpoest I. Hierarchy of Textile Structures and Architecture of Fabric Geometric Models // Textile Research Journal. – Vol. 71, №6, 2001. P. 534...543.

8. Smith M.A., Xiaogang Chen CAD/CAM Algorithms for 3D-Woven Multilayer Textile Structures, World Academy of Science, Engineering and Technology // International Journal of Chemical, Molecular, Nuclear, Materials and Metallurgical Engineering. – Vol.3, № 9, 2009. P.538...549.

9. Smith M. and Chen X. WeaveStudio CAD/CAM software for 3D-woven structures: EPSRC funded project; University of Manchester. – Manchester, UK, 2005-2008.

10. MSCSoftware - Inzhenernyy analiz i komp'yuternoe modelirovanie [Elektronnyy resurs] // Ofits. sayt kompanii MSCSoftware. - Rezhim dostupa : <http://www.mscsoftware.ru> (data obrashcheniya: 10.06.2018).

11. Modelirovanie protsessa pleteniya bBraidingsimulation [Elektronnyy resurs] // ESI- group: ofits. sayt kompanii. - Rezhim dostupa : <http://www.esi-group.com> (data obrashcheniya: 10.06.2018). f

12. Kiselev A.M., Khammatova V.V., Golubev S.E., Kiselev M.V. Opisaniye vozmozhnostey sistemy proektirovaniya struktury tsel'notkanykh 3D-preform "Preforma" // Dizayn. Materialy. Tekhnologiya. – 2019, № 1(53). S.20...25.

13. Kiselev M.V., Seliverstov V.Yu., Kiselev A.M., Lyapunov L.S. Proektirovanie i razrabotka tekhnologii polucheniya 3D-tkanykh poloten dlya proizvodstva kompozitsionnykh materialov povyshennoy prochnosti // Dvigateli dlya grazhdanskoy aviatsii: korporativnyy zhurnal diviziona AO "ODK" Tramplin k uspekhu. – 2017, № 10. S. 36...37.

Рекомендована заседанием Совета ООО НПО "ПК". Поступила 22.02.21.