

**ТЕХНОЛОГИИ ТРЕХМЕРНОГО АРМИРОВАНИЯ
ТЕКСТИЛЬНЫМИ И ШВЕЙНЫМИ МЕТОДАМИ КОНСТРУКЦИЙ
ИЗ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ***

**TECHNOLOGIES OF 3D REINFORCING OF POLYMER COMPOSITE
CONSTRUCTIONS BY TEXTILE AND SEWING METHODS**

Г.П. ЗАРЕЦКАЯ, Е.М. БАЗАЕВ, Т.В. РУДНЕВА, Е.В. ЛУНИНА

G.P. ZARETSKAYA, E.M. BAZAEV, T.V. RUDNEVA, E.V. LUNINA

(Российский государственный университет имени А.Н. Косыгина (Технологии. Дизайн. Искусство))

(Russian State University named after A.N. Kosygin (Technologies. Design. Art))

E-mail: zaretskaya-gp@rguk.ru; bazaevem@mail.ru; Rudneva.tv@yandex.ru; katushty@hotmail.com

В статье представлены текстильные и швейные технологии изготовления преформ, в том числе трехмерных, сложной пространственной формы, для конструкций из композиционных материалов. К основным преимуществам высоконагруженных армированных деталей из полимерных композиционных материалов отнесены целостность и неразрушимость. Рассмотрены виды волокнистых структур для армирования. Показана возможность получения преформ с локальным распределением физико-механических свойств. Описаны традиционные и мультиаксиальные тканые и вязаные армирующие материалы. Выявлено, что наиболее перспективны в этой области армированные преформы с нерегулярной структурой, а также со структурой природных оболочек.

The article presents textile and sewing technologies for preform manufacturing for composite materials, including three-dimensional preforms of complex spatial shape. Integrity and indestructibility are the main advantages of highly loaded reinforced parts made of polymer composites. Types of fiber structures for reinforcement have been considered. The possibility of obtaining preforms with local distribution of physical and mechanical properties is shown. Traditional and multiaxial woven and knitted reinforcing materials are described. It has been revealed that the most promising in this area are reinforced preforms with irregular structure, as well as with the structure of natural shells.

Ключевые слова: полимерные композиционные материалы, трехмерное армирование, мультиаксиальные материалы, нерегулярная структура, природные оболочки, тканая деталь, плетеные изделия.

Keywords: polymer composites, 3D reinforcement, multiaxial materials, irregular structure, natural shells, woven article, braided goods.

В современном мире, где летательные аппараты (ЛА) постоянно совершенствуются, а их конструкции усложняются, в

уюду возрастающим эксплуатационным требованиям, полимерные композиционные материалы (ПКМ), а именно методы их

* Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-29-13044.

* The reported study was funded by RFBR, project number 19-29-13044.

конструирования и технологии изготовления, требуют пересмотра и преобразования за счет внедрения нового технологического оборудования с целью повышения надежности структуры и деталей из ПКМ в целом.

При разработке конструкций из ПКМ основное внимание уделяется весу готовой детали или изделия, поскольку энергозатраты на перемещение ЛА во многом зависят от его массы. Помимо проектирования легких конструкций всегда стоит задача создания технологий, обеспечивающих минимальные материальные вложения на производство ЛА [1]. Именно внедрение конструкций из ПКМ в производство ЛА позволило не только снизить вес аппаратов по сравнению с ранее используемыми металлическими конструкциями, но и улучшить их прочностные показатели, а также сократить себестоимость. Однако с развитием технологий производства авиационных конструкций этого становится недостаточно, и требуются все более эффективные подходы к решению поставленной задачи совмещения прочности и легкости.

Изготовление авиационных конструкций из ПКМ сложного профиля традиционными швейными и текстильными методами становится проблематичным, так как в этом случае требуется раскрой и последующее соединение деталей кроя или ручная выкладка, что значительно снижает прочность конструкции в местах соединений. Одним из эффективных решений данной задачи является использование трехмерных армирующих преформ, обладающих высокой подвижностью нитей и способностью принимать сложные пространственные формы [2].

На основании структурной целостности, а также линейности и непрерывности волокон волокнистые структуры можно разделить на 4 типа: дискретные, непрерывные, плоские (2D) и трехмерные (3D).

В трехмерной волокнистой системе волокна ориентированы в трех направлениях. С помощью непрерывной нити трехмерная сеть формируется как единое целое. Главной особенностью трехмерной структуры является армирование не только по плоскости, но и по всей толщине, что практически

исключает расслаивание композиционного материала при эксплуатации. Еще одним важным свойством многих трехмерных структур, таких как тканые, трикотажные, плетеные и нетканые материалы, является их способность принимать сложные пространственные формы.

В настоящее время авиационные конструкции из ПКМ изготавливаются преимущественно с использованием традиционных технологий армирования, заключающихся в послойной укладке слоев тканевого наполнителя с последующим формованием автоклавными и безавтоклавными методами. Такие композиционные материалы обладают рядом недостатков – низкой прочностью на удар, сдвиг и расслаивание материала, так как соединение слоев происходит только за счет связующего.

3D-армированный композиционный материал имеет значительное преимущество перед распространенными на сегодняшний день препрегами. Механические свойства композитов, изготовленных из препрега, характеризуются высокой жесткостью и прочностью в плоскости и меньшей жесткостью и прочностью вне плоскости [1]. Применяемая на настоящий момент технология изготовления деталей из препрегов заключается в раскрое, укладке и придании нужной формы 2D-препрегов. Основные проблемы использования препрегов для изготовления деталей из ПКМ заключаются в сложности фиксирования слоев препрега в нужном положении перед отверждением, а также достижении удовлетворительных механических характеристик по толщине материала [1].

Армирующая структура композиционного материала играет решающую роль в его механических характеристиках [3], [4]. Так как в роли армирующего каркаса выступают нити или волокна, образующие целостную систему, немаловажным фактором при проектировании сетчатых армирующих материалов является теория сетей. Согласно этой теории возможность искривления и смещения линий сети относительно друг друга приводит к изменению трех основных признаков ячеек сети: сетевых углов, длин сторон и расстояний между сто-

ронами, что характерно и для формообразования тканевых и тканых оболочек и является их особенностью [5]. Улучшить формообразующие свойства тканой структуры можно путем изгиба сторон ячеек, причем в этом случае появляется возможность проектировать армирующие материалы с нерегулярными формообразующими свойствами.

Ткачество широко используется в области изготовления деталей из ПКМ, поскольку именно этим методом производится подавляющее большинство однослойных, широкополотных углеволокнистых и стекловолокнистых тканей, которые в настоящее время используются в качестве армирующего материала для композитных компонентов. Однако традиционное ткацкое оборудование может быть использовано для производства более сложных, трехмерных сетчатых преформ с сетчатой структурой [6].

В некоторых источниках [6...8] 3D-тканые материалы разделяются на 2D-тканые 3D-материалы (то есть получаемые традиционными методами 2D-ткачества) и 3D-тканые 3D-материалы (то есть получаемые методом 3D-ткачества).

3D-ткачество характеризуется операцией двойного зевобразования. Такая система зевобразования позволяет основным нитям переплетаться одновременно с горизонтальными и вертикальными системами уточных нитей. Соответственно основные нити, горизонтальные и вертикальные уточные нити, перпендикулярны друг другу.

3D-ткачество позволяет напрямую изготавливать тканые профильные материалы – сплошные, трубчатые, сферические, криволинейные и их комбинации, а также комбинировать ткацкие переплетения – полотняное, саржевое и атласное – в различных областях преформы [1]. 3D-ткачеством можно получить различные структуры волокна, включая панели с ортогональным расположением нитей, панели переменной толщины, полые детали или жгуты. Одни из примеров таких деталей показаны на рис. 1 (образцы трехмерных деталей, полу-

ченных методом ткачества: а – тканая деталь с цельноткаными ребрами жесткости; б – кубическая деталь, в которой нити основы переходят в нити утка и наоборот).

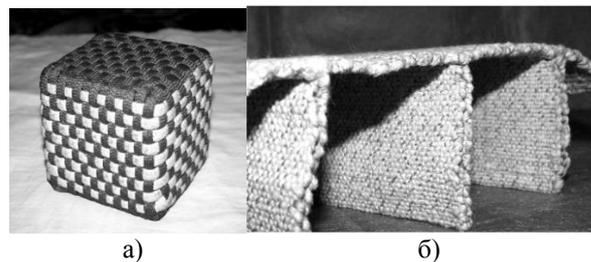


Рис. 1

Ткачество позволяет использовать несколько разных по свойствам и составу нитей и разных ткацких переплетений в одной преформе. Более того, при ткачестве возможно изменять поперечное сечение и размер преформы в процессе изготовления путем введения или удаления нитей. Таким образом можно получить преформу с локальным распределением физико-механических свойств.

Основное различие между вязаным материалом и материалом, изготовленным при помощи других текстильных процессов, заключается в высокой степени извитости пряжи, которая возникает в процессе вязания. В результате полученный вязаный материал обеспечивает меньшую структурную прочность композита, но достаточную формообразующую способность для производства деталей сложной формы. Особенность строения вязаного материала придает ему достаточную эластичность для покрытия всей поверхности формы без необходимости разрезать и перекрывать участки. Это снижает количество технологических операций, отходов материала и затраты на производство деталей сложной формы.

Изменение структуры вязаного материала может значительно изменить свойства самого вязаного полотна. Такие характеристики, как растяжимость ткани, плотность, толщина, текстура поверхности и т.д., можно контролировать достаточно точно. Это позволяет изготавливать вязаное полотно с требуемыми свойствами для конкретного компонента [6].

Стандартные основовязаные и уточновязаные полотна считаются 2D-материалами, однако машины с двумя или более игольными фонтурными способными производить многослойные полотна с нитями, проходящими между слоями. Такие полотна также могут быть изготовлены с переменной шириной, отверстиями, а также разделениями, позволяющими формировать несколько параллельных тканей [6].

Мультиаксиальные основовязаные материалы состоят из систем нитей, расположенных по основе (0°), утку (90°) и диагонали (45°) и скрепляемых вместе цепочной или трикотажной строчкой. Перспективным направлением развития технологии изготовления мультиаксиальных основовязаных материалов является получение кругловязаных мультиаксиальных структур.

По сравнению с традиционными ткаными материалами, мультиаксиальные ткани обладают большей гибкостью. Нити в таких тканях могут быть уложены под углами от 0 до 90° , включая 45 , 90 , 30 , 60 и

22° , и затем прошиты, образуя слои скрепленных строчкой мультиаксиальных слоев нитей, тогда как тканые материалы изготавливаются в основном из ровинга, расположенного под углами 0 и 90° . Мультиаксиальные основовязаные материалы превосходят по прочностным показателям традиционные тканые, так как нити не переплетаются друг с другом, соответственно отсутствует извитость нитей, свойственная для материалов, полученных традиционными методами ткачества и вязания. Особенности технологического процесса, благодаря которому слои ткани сохраняют способность сдвигаться на определенную величину относительно друг друга, позволяют такому материалу принимать заданную форму без образования складок, которые обычно образуются в стандартной тканой ткани (рис. 2-а) [6], [10], [11]. Рис. 2 – примеры вязаных материалов: а – мультиаксиальный основовязанный материал; б – вязаная деталь сложной пространственной формы [6]; в – 3D-вязанный материал [9]).

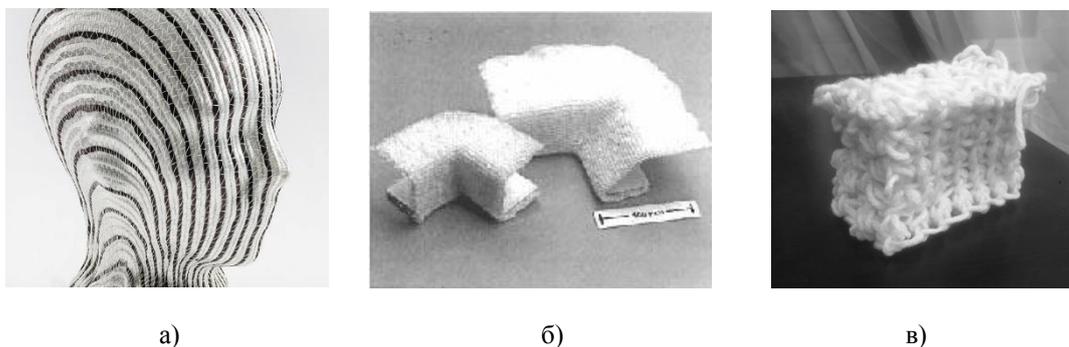


Рис. 2

Триаксиальные основовязаные ткани ($0^\circ, \pm 45^\circ$) используются тогда, когда нужно увеличить продольную и торсионную жесткость, тогда как триаксиальные уточновязаные ткани ($90^\circ, \pm 45^\circ$) используются для увеличения поперечной и торсионной жесткости [10].

Разработки, приведенные в работе [6], позволяют получить вязаный материал с требуемой трехмерной формой с минимальными потерями материала (рис. 2-б) без нахлеста ткани или швов и изменения свойств ткани, и таким образом сократить

затраты времени и материалов на производство деталей сложной формы.

3D-вязанный материал, указанный в работе [9], отличается возможностью создания 3D-структур, эластичных в трех направлениях хуз и практически любых пространственных форм: куб, конус, пирамида, цилиндр, сфера и др., включая внутренние полости, а также возможностью изготавливать как регулярные, так и нерегулярные изделия, меняя регулярность в процессе производства в трех направлениях хуз (рис. 2-в). За счет комбинирования ни-

тей с различными свойствами в одном материале можно придать готовому изделию требуемые свойства, например, повысить прочность, жесткость, эластичность, проводимость и т.д. Указанный материал имеет достаточно широкий спектр областей применения: от бытовой и специальной одежды до наполнителей для матрасов и подушек. В последнем случае преимуществом применения объемного трикотажа являются его хорошие релаксационные свойства, позволяющие создать материал с памятью формы.

3D-плетение – один из текстильных технологических процессов, благодаря которому можно получить большое разнообразие сложных цельных форм, обладающих высоким сопротивлением к разрушению. Технология 3D плетения является развитием технологии 2D-плетения, в которой материал получают путем переплетения двух или более систем нитей, образуя таким образом цельную конструкцию. Технологией плетения можно получить изделие с заданными параметрами длины, ширины, толщины, углом наклона нитей [12]. В процессе плетения могут быть использованы оправки сложных форм с переменным поперечным сечением или длиной, с узлами крепления или отверстиями, которые также оплетаются при выработке материала, что позволяет сократить количество этапов отделки детали и улучшить механические характеристики за счет непрерывности армирующего волокна в месте крепления [6].

Технология 3D-плетения имеет ряд недостатков. Основным недостатком традиционной технологии плетения заключается в трудности получения деталей с требуемой толщиной, если только оправка не подвергается многократной оплетке. Причем в этом случае получится многослойная структура без связности по толщине материала. По сравнению с другими текстильными процессами плетением можно изготовить преформы небольшого размера относительно размера оборудования. Кроме того, производство преформ большой длины может быть медленным из-за необходимости повторной подачи пряжи на движущиеся носители, которые в идеале

должны быть маленькими и легкими для быстрого производства оплетки [6].

Современные технические возможности позволяют объединить несколько текстильных методов, получив таким образом материал с новыми свойствами. Текстильные гибридные композиты, состоящие из тканых, вязаных и плетеных материалов – новое направление в текстильных композициях.

Механические характеристики вязаных композитов ниже, чем тканых и плетеных, из-за строения петель волокон, с другой стороны, вязаные материалы обладают более высокими формообразующими характеристиками, чем тканые и плетеные [13...16]. Например, можно получить, с одной стороны жесткость тканого слоя и гибкость вязаного. Более того, вязаные материалы более объемные, таким образом можно достичь большой толщины композита меньшим количеством слоев, по сравнению с ткаными материалами [16].

Комбинированием текстильных материалов, полученных различными технологиями, можно повысить механические характеристики и снизить затраты на производство композиционного материала [16].

Комбинированные материалы, объединяющие в себе текстильный метод изготовления нетканых полотен и швейный метод технической вышивки, могут использоваться в качестве защитных накладок для бронежилетов и защитной одежды [17].

К швейным методам изготовления преформ для ПКМ относятся методы прошивки и автоматической вышивки – настрачивание и тафтинг.

Прошивка – наиболее простая из приведенных здесь технологий и не требует значительных затрат на специализированное оборудование. Стандартное швейное оборудование подходит для прошивки преформ из стекло- и углеволокна [6].

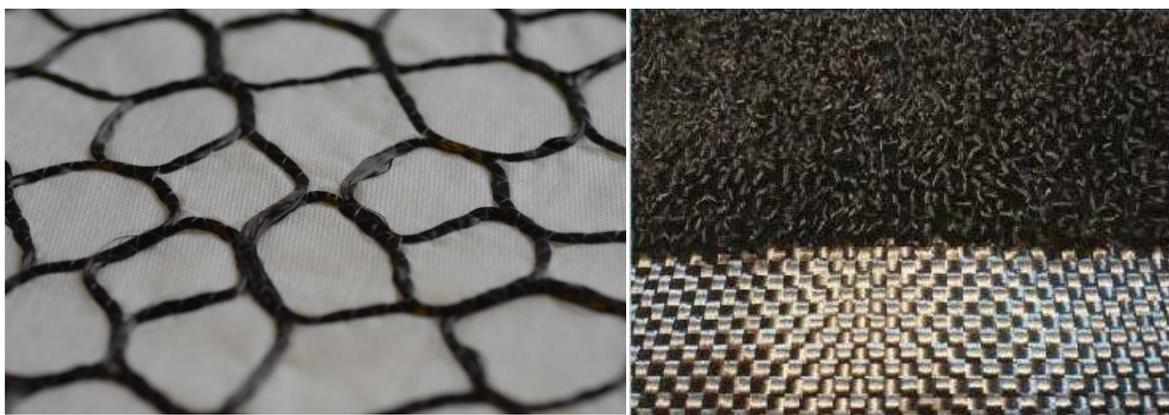
Процесс прошивки имеет свои недостатки, главным из которых является снижение свойств в плоскости получаемого композиционного материала (то есть при растяжении, сжатии, сдвиге и т.д.). При проколе ткани иглой возникают локальные повреждения волокон и деформация ткани,

что снижает механические характеристики композита [6], [18].

Разновидностью прошивки, которая может быть использована для локализованного плоского армирования вместе с армированием по толщине, является техническая вышивка. В этом процессе армирующая нить подается на траекторию движения вышивальной головки и пришивается к поверхности преформы (рис. 3-а). С помощью современных вышивальных головок с компьютерным управлением возможно точное настраивание армирующей нити по довольно сложным траекториям, что позволяет армировать участки детали с высокой нагрузкой волокнами, уложенными в направлении максимальной нагрузки. Современное оборудование ограничивает размер преформ, изготовленных таким способом, но преимуществом процесса является

высокий уровень автоматизации. Этот метод производства также можно рассматривать как вариант технологии укладки волокон [6].

Значительный интерес представляет технология трехмерного армирования слоистых преформ способами тафтинга, позволяющими локально и в заданном направлении вводить в структуру наполнителя армирующих нитей различных видов практически без их повреждения. Процесс тафтинга заключается в прошивании стежками нити основы в вертикальном направлении (рис. 3-б). В качестве первичной основы может выступать тканое или нетканое полотно. Рис. 3 – швейные методы армирования: а — техническая вышивка на водорастворимой основе; б – тафтинг.



а)

б)

Рис. 3

В этом случае трехмерное армирование осуществляется за счет введения в наполнитель Z-направленных нитей в заданных зонах и направлениях, что позволит повысить прочностные характеристики на удар, сдвиг и расслаивание [19].

По сравнению с традиционной технологией прошивки, в процессе которой в толщине преформы образуется узел, что ухудшает прочностные характеристики готовой детали, при тафтинге можно избежать натяжения и снижения прочности.

Преимущества тафтинга заключаются также в том, что можно получить разнотолщинные и/или сетчатые полотна в процессе их выработки, с заданной плотностью

наполнения в соответствии с предъявляемыми к ним требованиями. Вес преформы, изготовленной методом тафтинга, зависит от материала нити и основы, плотности прошивки и высоты ворса.

В процессе тафтинга возможно армировать преформу по толщине практически под любым углом, что недоступно при армировании другими текстильными и швейными методами. Чаще всего углы при армировании тафтингом составляют 45, 60 и 90°. Армирование преформы под углом 45° улучшает прочностные характеристики при изгибе и сдвиге, а при армировании под углом 60° возрастает прочность на сжатие [19], [20].

Кроме того, преимущество тафтинга заключается в малой истираемости нити и малом повреждении структуры материала в процессе вышивки, по сравнению с методом прошивки.

Все рассмотренные технологии армирования позволяют получить более прочные и легкие армированные конструкции, по сравнению с традиционными текстильными и швейными технологиями. Еще больше возможностей предоставляют конструкции со структурой природных оболочек

Одним из примеров нерегулярных сетчатых структур являются структуры природных оболочек, которые, кроме того, обладают малым весом и большой прочностью. В природе встречается много примеров армированных 2D (крылья насекомых, листья растений, паутина) и 3D-структур (человеческая кость, стебель бамбука, древесина, кость каракатицы, пчелиные соты).

Легкие сетчатые композиты, спроектированные по принципу строения природных объектов и состоящие из взаимосвязанной сети нитей (жилок), образующих стороны ячеек, представляют собой новый класс высокоэффективных конструкционных материалов [21], [22].

Так же, как и в текстильных материалах, на свойства природных структур влияет их геометрическое строение [23...25], но их сложность и многообразие позволяют найти новые подходы к проектированию композиционных материалов с улучшенными эксплуатационными свойствами.

Используя особенности строения, присущие природным материалам и формам, становится возможным разработать новые подходы к проектированию конструкционных изделий с улучшенными прочностными и весовыми показателями, так как природные объекты обладают уникальными характеристиками, включающими эффективное использование материала и распределение сил при значительной прочности конструкции [23], [27]

В области проектирования инновационных эффективных армирующих структур все большее развитие получает применение

принципов геометрического строения природных оболочек. С точки зрения разработки методов проектирования особый интерес представляют принципы роста растений [28] и построения диаграммы Вороного, позволяющий достаточно быстро получить схему армирования, подобную рисунку жилкования крыла стрекозы в автоматизированном режиме [22], [29], [31].

Проведенный анализ существующих текстильных и швейных методов армирования преформ для деталей из ПКМ позволяет заключить, что постоянно возрастающие сложность авиационных конструкций и предъявляемые к ним требования диктуют направление развития методов армирования и совершенствования и автоматизации оборудования. Наряду с традиционными технологиями все большее распространение получают инновационные методы получения преформ и материалов нового поколения, более эффективных по прочностным, весовым и экономическим показателям. Наибольшие перспективы в этой области представляет проектирование армированных преформ с нерегулярной структурой, а также со структурой природных оболочек, так как они обладают оптимальным соотношением весовых и прочностных показателей.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Stig F.* 3D-woven Reinforcement in Composites. Doctoral Thesis // KTH School of Engineering Sciences. – Stockholm, Sweden, 2012.
2. *Богомолов П.И., Козлов И.А., Бируля М.А.* Обзор современных технологий изготовления объемно-армирующих преформ для перспективных композиционных материалов // Техничко-технологические проблемы сервиса. – 2017, №1(39). С. 22...27.
3. *Chiu C. H., Cheng C.C.* Weaving method of 3D woven preforms for advanced composite materials // Textile Research Journal. – Vol. 73(1), 2003. P.37...41. doi:10.1177/004051750307300107
4. *Gu H., Zhili Z.* Tensile behavior of 3D woven composites by using different fabric structures. Materials and Design. 2002. – vol. 23(7). pp. 671 – 674. doi: 10.1016/S0261-3069(02)00053-5
5. *Базаев Е.М.* Геометрия формообразования структур тканевых и тканых оболочек // Дизайн и Технологии. – 2008, № 8(50). С. 47...52.
6. *Tong L., Mouritz A.P., Bannister M.K.* 3D fibre reinforced polymer composites // Elsevier Science Ltd. – Oxford. 2002. ISBN 0-08-043938-1

7. *Khokar N.* 3D-weaving: Theory and practice // Journal of the Textile Institute. – Vol. 92(1), 2001. P.193...207. DOI:10.1080/00405000108659570
8. *Khokar N.* 3D fabric-forming process: Distinguishing between 2D-weaving, 3D-weaving and an unspecified non-interlacing process // Journal of the Textile Institute. – Vol. 87(1), 1996. P.97...106. ISSN 00405000, 17542340
9. *Марченко Д.В.* Объемный трикотаж. 2018. Патент RU 2 689 446 С1.
10. *Mazumdar S. K.* Composites manufacturing: materials, product, and process engineering. – CRC PRESS LLC. 2002. ISBN 0-8493-0585-3
11. *Lomov S. V.* Non-crimp fabric composites. Manufacturing, properties and applications. – Woodhead Publishing Limited, 2011. ISBN 978-1-84569-762-4
12. *Донецкий К.И., Раскутин А.Е., Хилов П.А., Лукьяненко Ю.В., Белинис П.Г., Коротыгин А.А.* Объемные текстильные преформы, используемые при изготовлении полимерных композиционных материалов (обзор) // Электронный научный журнал "ТРУДЫ ВИАМ". – 2015, № 9. DOI: 10.18577/2071-9140-2019-0-4-18-26
13. *Sugimoto K., Fukui T., Inoda M., Nakai A., Hamada H.* Mechanical Properties of Knitted Composite with Flexible Interphase // 8th Japan International SAMPE Symposium and Exhibition, November 18-21, 2003.
14. *Ramakrishna S., Hamada H., Hull D.* The Effect of Knitted Fabric Structure on the Crushing Behaviour of Glass-Epoxy Composite Tubes // Impact and Dynamic Fracture of Polymers and Composites. – John Wiley and Sons Ltd, 1995.
15. *Hirai Y., Hamada H., Kim J.K.* Damage Modes in Impact Loading of Glass Woven Fabric Composites. Advanced Composites Letters. – Vol. 5, №2, 1996. P.59...63. ISSN 0963-6935.
16. *Inoda M., Sugimoto K., Nakai A., Hamada H.* Mechanical Properties of Textile Hybrid Composite. Composites technologies for 2020 // Proceedings of the Fourth Asian-Australasian Conference on Composite Materials (ACCM-4) University of Sydney. – Australia, 6-9 July 2004.
17. *Тамбовцева Е.П., Зарецкая Г.П., Руднева Т.В., Мезенцева Т.В.* Применение армирующих основ при изготовлении волокнистых наполнителей для деталей одежды из композиционных материалов // Light Conf 2021. "Наука - Технологии - Производство": Мат. Международн. науч.-технич. конф. 29-31 марта 2021 г. –СПб.: ФГБОУВО "СПбГУПТД", 2021. С. 10. ISBN 978-5-7937-1990-2
18. *Mouritz A.P., Leong K.H., Herszberg I.* A review of the effect of stitching on the in-plane mechanical properties of fibre-reinforced polymer composites. Composites Part A // Applied Science and Manufacturing. – Vol. 28, Is. 12, 1997. P. 979...991. doi:10.1016/S1359-835X(97)00057-2
19. *Lingshan Liu.* Development and optimisation of the tufting process for textile composite reinforcement. Doctoral Thesis. Universite de Lille. – 2017.
20. *Dell'Anno G., Treiber J.W.G., Partridge I.K.* Manufacturing of composite parts reinforced through-thickness by tufting // Robotics and Computer Integrated Manufacturing. – Vol. 37. P. 262...272. Doi:10.1016/j.rcim.2015.04.004
21. *Thiyagarajan K.* Bio Inspired Lightweight Composite Material Design for 3D Printing. Master Thesis. South Dakota State University.– 2017.
22. *Mirzaani M.J.* Using Bio-Inspired design elements in the fabrication of cellular materials with special properties and functionalities. Doctoral Dissertation. Politecnico di Milano, Department of Mechanical Engineering. – Milano, Italia, 2017.
23. *Darvishani-Fikouhi S.* Honeycomb Topologies; Design Rationalization of a free-form space frame structure. Master Thesis. – University College London. 2009.
24. *Thompson D.A.W.* On growth and form // Cambridge University Press. – Cambridge, 1992.
25. *Руднева Т.В.* Разработка метода проектирования швейных изделий по принципу строения природных оболочек: Дис. ... канд. техн. наук. – М.: МГУДТ, 2015.
26. *Руднева Т.В., Базаев Е.М.* Армирование композитов по принципу строения природных оболочек // Сб. докл. Междунар. научн.-практ. конф.: Интеграция науки и образования. – Уфа: РИО "Омега Сайнс", 2014. С. 162...164.
27. *Milwich M., Speck T., Speck O., Stegmaier T., Planck H.* Biomimetics and technical textiles: solving engineering problems with the help of nature's wisdom // American Journal of Botany. – Vol.93(10), 2006. P.1455...1465.
28. *Pochel T.* Simple Model for the Growth of Ramified Leaf Structures // Chaos, Solitons & Fractals. – Vol. 4, №10, 1994. P. 1883...1888.
29. *Dimcic M.* Structural Optimization of Grid Shells based on Genetic Algorithms. Institut fuer Tragkonstruktionen und Konstruktives Entwerfen. – Stuttgart, 2011. ISBN 978-3-922302-32-2
30. *Saraptzian K.* Irregular structural grid systems: The design of non-standard architectural forms with structural complexity. – PhD Thesis. Aristotle University of Thessaloniki, School of Architecture, Thessaloniki, 2017.
31. *Махмудова Г., Руднева Т.В., Базаев Е.М., Стаханова С.И., Таишулатов С.Ш., Сулейменова У.Т.* Разработка классификации характеристик строения природных армирующих оболочек //Изв. вузов. Технология текстильной промышленности. – 2018, №1. С. 85...88.

REFERENCES

1. Stig F. 3D-woven Reinforcement in Composites. Doctoral Thesis // KTH School of Engineering Sciences. – Stockholm, Sweden, 2012.
2. Bogomolov P.I., Kozlov I.A., Birulya M.A. Review of modern technologies for the manufacture of volume-reinforcing preforms for advanced composite materials. Technical and technological problems of service. – 2017, No. 1 (39). P. 22...27.
3. Chiu C.H., Cheng C.C. Weaving method of 3D woven preforms for advanced composite materials //Textile Research Journal. – Vol. 73(1), 2003. P.37...41. doi:10.1177/004051750307300107

4. Gu H., Zhili Z. Tensile behavior of 3D woven composites by using different fabric structures. *Materials and Design*. 2002. - vol. 23(7). P. 671 – 674. doi: 10.1016/S0261-3069(02)00053-5
5. Bazaev E.M. Geometry of shaping structures of fabric and woven shells // *Design and Technologies*. - 2008, No. 8 (50). P. 47...52.
6. Tong L., Mouritz A.P., Bannister M.K. 3D fiber reinforced polymer composites // Elsevier Science Ltd. — Oxford. 2002. ISBN 0-08-043938-1
7. Khokar N. 3D-weaving: Theory and practice // *Journal of the Textile Institute*. – Vol. 92(1), 2001. P.193...207. DOI:10.1080/00405000108659570
8. Khokar N. 3D fabric-forming process: Distinguishing between 2D-weaving, 3D-weaving and an unspecified non-interlacing process // *Journal of the Textile Institute*. – Vol. 87(1), 1996. P.97...106. ISSN 00405000, 17542340
9. Marchenkov D.V. Bulky knitwear. 2018. Patent RU 2 689 446 C1.
10. Mazumdar S. K. Composites manufacturing: materials, product, and process engineering. – CRC PRESS LCC. 2002. ISBN 0-8493-0585-3
11. Lomov S. V. Non-crimp fabric composites. manufacturing, properties and applications. – Wood-head Publishing Limited, 2011. ISBN 978-1-84569-762-4
12. K. I. Donetskskii, A. E. Raskutin, P. A. Khilov, Yu. Volumetric textile preforms used in the manufacture of polymer composite materials (review) // *Electronic scientific journal "WORKINGS OF VIAM"*. – 2015, No. 9. DOI: 10.18577/2071-9140-2019-0-4-18-26
13. Sugimoto K., Fukui T., Inoda M., Nakai A., Hamada H. Mechanical Properties of Knitted Composite with Flexible Interphase // 8th Japan International SAMPE Symposium and Exhibition, November 18-21, 2003.
14. Ramakrishna S., Hamada H., Hull D. The Effect of Knitted Fabric Structure on the Crushing Behaviour of Glass-Epoxy Composite Tubes // *Impact and Dynamic Fracture of Polymers and Composites*. – John Wiley and Sons Ltd, 1995.
15. Hirai Y., Hamada H., Kim J.K. Damage Modes in Impact Loading of Glass Woven Fabric Composites. *Advanced Composites Letters*. – Vol. 5, No. 2, 1996. P.59...63. ISSN 0963-6935.
16. Inoda M., Sugimoto K., Nakai A., Hamada H. Mechanical Properties of Textile Hybrid Composite. *Composites technologies for 2020 // Proceedings of the Fourth Asian-Australasian Conference on Composite Materials (ACCM-4) University of Sydney*. – Australia, 6-9 July 2004.
17. Tambovtseva E.P., Zaretskaya G.P., Rudneva T.V., Mezentseva T.V. The use of reinforcing bases in the manufacture of fibrous fillers for clothing parts from composite materials // *Light Conf 2021. "Science - Technology - Production": Mat. International. scientific and technical conf. March 29-31, 2021 - St. Petersburg: FGBOUVO "SPbGUPTD"*, 2021. P. 10. ISBN 978-5-7937-1990-2
18. Mouritz A.P., Leong K.H., Herszberg I. A review of the effect of stitching on the in-plane mechanical properties of fiber-reinforced polymer composites. *Composites Part A // Applied Science and Manufacturing*. – Vol. 28, Is. 12, 1997. P. 979...991. doi:10.1016/S1359-835X(97)00057-2
19. Lingshan Liu. Development and optimization of the tufting process for textile composite reinforcement. doctoral thesis. University of Lille. – 2017.
20. Dell'Anno G., Treiber J.W.G., Partridge I.K. Manufacturing of composite parts reinforced through-thickness by tufting // *Robotics and Computer Integrated Manufacturing*. – Vol. 37. P. 262...272. Doi:10.1016/j.rcim.2015.04.004
21. Thiyagarajan K. Bio Inspired Lightweight Composite Material Design for 3D Printing. Master Thesis. South Dakota State University.– 2017.
22. Mirzaani M.J. Using Bio-Inspired design elements in the fabrication of cellular materials with special properties and functionalities. doctoral dissertation. Politecnico di Milano, Department of Mechanical Engineering. – Milano, Italia, 2017.
23. Darvishani-Fikouhi S. Honeycomb Topologies; Design Rationalization of a free-form space frame structure. Master Thesis. – University College London. 2009.
24. Thompson D.A.W. On growth and form // Cambridge University Press. – Cambridge, 1992.
25. Rudneva T.V. Development of a method for designing garments based on the principle of the structure of natural shells: Dis. ... cand. tech. Sciences. – M.: MGUDT, 2015.
26. Rudneva T.V., Bazaev E.M. Reinforcement of composites according to the principle of the structure of natural shells // *Sat. report International scientific-practical Conf.: Integration of science and education*. - Ufa: RIO "Omega Science", 2014. S. 162 ... 164.
27. Milwich M., Speck T., Speck O., Stegmaier T., Planck H. Biomimetics and technical textiles: solving engineering problems with the help of nature's wisdom // *American Journal of Botany*. – Vol.93(10), 2006. P.1455...1465.
28. Pochel T. Simple Model for the Growth of Ramified Leaf Structures // *Chaos, Solitons & Fractals*. – Vol. 4, No. 10, 1994. P. 1883...1888.
29. Dimcic M. Structural Optimization of Grid Shells based on Genetic Algorithms. Institute fuer Tragkonstruktionen und Konstruktives Entwerfen. – Stuttgart, 2011. ISBN 978-3-922302-32-2
30. Saraptzian K. Irregular structural grid systems: The design of non-standard architectural forms with structural complexity. – PhD Thesis. Aristotle University of Thessaloniki, School of Architecture, Thessaloniki, 2017.
31. Makhmudova G., Rudneva T.V., Bazaev E.M., Stakhanova S.I., Tashpulatov S.Sh., Suleimenova U.T. Development of a classification of the characteristics of the structure of natural reinforcing shells // *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii, Seriya Tekhnologiya Tekstil'noi Promyshlennosti*. - 2018, No. 1. P. 85...88.

Поступила 25.10.21.