



УДК 69.04

DOI 10.22363/2312-8143-2017-18-1-48-57

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕХНИЧЕСКИХ ТКАНЕЙ С ПОКРЫТИЕМ ДЛЯ МЯГКИХ ОБОЛОЧЕЧНЫХ КОНСТРУКЦИЙ

А.А. Кустов

Национальный исследовательский
Московский государственный строительный университет
Ярославское шоссе, 26, Москва, Россия, 129337

В данной статье описаны лабораторные испытания, выполненные с целью исследования механических свойств технической ткани с покрытием. Эксперименты включали в себя одноосные испытания при растяжении материала в направлении нитей основы и утка. Для измерения перемещений и деформаций на поверхности образца использовался метод корреляции цифровых изображений. Была построена численная модель материала и выполнен расчет, имитирующий проведенные эксперименты. Показана хорошая сходимости между результатами лабораторных и численных испытаний.

Ключевые слова: техническая ткань с покрытием, лабораторные испытания, численное моделирование, корреляция цифровых изображений

В настоящее время вновь обретают популярность мягкие оболочечные конструкции (рис. 1). Уникальность свойств подобных сооружений заключается в их многофункциональности, достаточной простоте производства и относительно небольшой стоимости, а также в малой массе и низкой материалоемкости, быстроте монтажа и демонтажа, многократной оборачиваемости, возможности полной заводской готовности, высокой стойкости к динамическим и сейсмическим нагрузкам, малом объеме в транспортном состоянии и возможности их доставки любым видом транспорта на любые расстояния.

Многочисленные отечественные и зарубежные исследования и разработки, в которых рассматриваются мягкие оболочечные конструкции, вопросы численного моделирования технической ткани с покрытием, создания и улучшения свойств материала и т.п., а также увеличение строительства подобных сооружений по всему миру являются ярким тому свидетельством [1; 3; 5; 6].

Данный материал используется в самых разных сферах строительной деятельности (опалубка, боновые ограждения, тканевые плотины, резервуары, домкраты, спасательные средства и многое другое), а также и в текстильной архитектуре (воздухоопорные и тентовые конструкции).

Основные компоненты технической ткани с покрытием представлены текстильной основой, чаще всего состоящей из синтетических нитей (полиэфирных, полипропиленовых, полиамидных и др.), и защитным полимерным покрытием из поливинилхлорида (ПВХ), полиуретана (ПУ), политетрафторэтилена (ПТФЭ) и др.

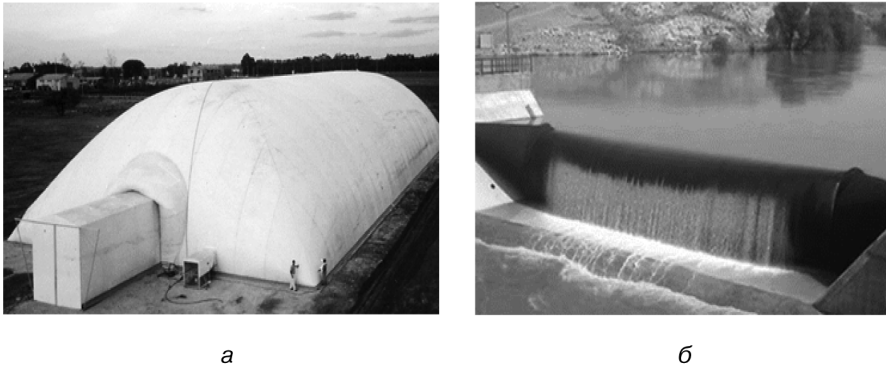


Рис. 1. Мягкие оболочечные конструкции:
а) воздухоопорное сооружение; б) тканевая плотина
[Tensile structures: a) air dome; b) tissue dam]

Лабораторные испытания были проведены в Костромском государственном университете (КГУ). Экспериментальное оборудование (рис. 2) представляет собой разрывную машину, состоящую из станины, модулей линейного перемещения, металлических планок-зажимов и сервопривода, включающего инкрементный преобразователь угловых перемещений (инкрементный энкодер), электродвигатель с редуктором, блок питания и управления. Испытательная машина подключена к персональному компьютеру и управляется с помощью программы STRAIN.

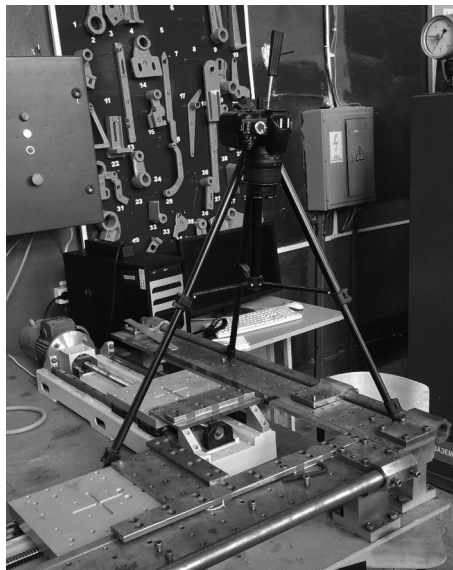


Рис. 2. Общий вид испытательного оборудования
[General view of the test equipment]

Для установления зависимости усилий на электродвигателе и растягивающими усилиями в образце (на зажимах) была произведена тарировка испытательного оборудования в обоих направлениях с помощью динамометра ДПУ-0.5-2. Также была выполнена тарировка линейных перемещений данных модулей.

Для измерения полей перемещений и деформаций на поверхности технической ткани с покрытием был выбран один из самых популярных и эффективных оптических методов на сегодняшний день — метод корреляции цифровых изображений (digital image correlation).

«Корреляция цифровых изображений — это эффективный бесконтактный метод измерения полей перемещений и деформаций на поверхности исследуемого объекта путем сравнения цифровых фотографий, снятых в течение нагружения образца. Идея данного метода заключается в возможности определения поля смещений с высокой точностью путем отслеживания изменений на поверхности» [4].

В экспериментах для съемки цифровых фотографий был использован зеркальный фотоаппарат Nikon D3100 с разрешением 14,8 мегапикселей, который был жестко закреплен на штативе для исключения колебаний объектива камеры в ходе эксперимента. Для обработки фотографий испытаний технической ткани с покрытием с целью построения полей перемещений и деформаций было использовано программное обеспечение GOM Correlate. На рисунке 3 представлен пример измерения полей перемещений на поверхности образца в GOM Correlate.

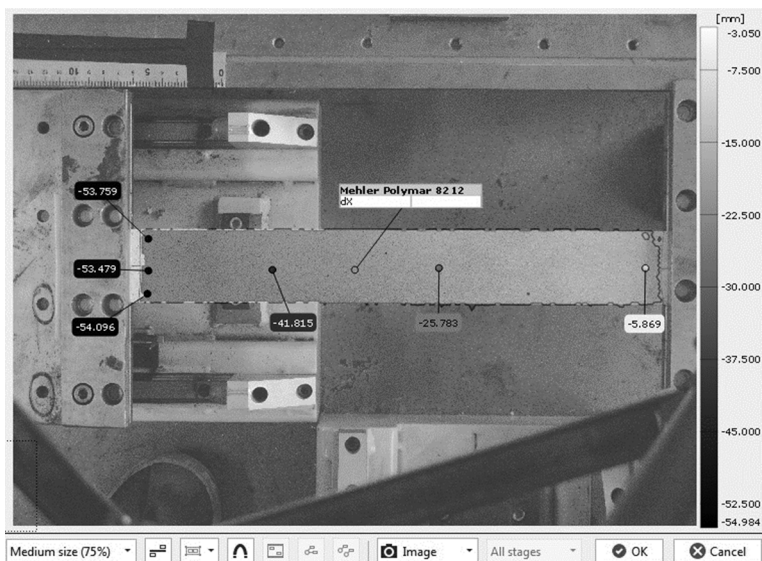


Рис. 3. Измерение полей перемещений на поверхности образца в программе GOMCorrelate [Measurement of displacement fields on the sample surface in the GOM Correlate]

Опытные образцы были отобраны из одной партии материала, произведенного двумя компаниями — немецкой Mehler и французской Serge Ferrari, что уменьшает вероятность разброса механических свойств у материала. Главное отличие заключалось в том, что техническая ткань с покрытием компании Serge Ferrari была изготовлена с технологией Precontraint (сбалансированное и постоянное натяжение нитей основы и утка перед нанесением полимерного покрытия на текстильную основу).

Некоторые характеристики технических тканей с покрытием Mehler Polymar 8212 и Serge Ferrari 402 Precontraint приведены в табл. 1.

Характеристики технических тканей

Материал	Вес, г/м ²	Толщина, мм	Тип ткацкого переплетения	Разрывная нагрузка, Н/ 5 см (основа/уток)
Mehler Polymar 8212	650	0,5	Рогожка 2/2	2500/2500
Serge Ferrari 402 Precontraint	490	0,4	Рогожка 2/2	2500/2500

Подготовка образцов и методика проведения испытаний были выполнены в соответствии с ГОСТ 30303-95 «Ткани с резиновым или пластмассовым покрытием. Определение разрывной нагрузки и удлинения при разрыве». В работе [2] рассмотрены современные отечественные и зарубежные методики, а также представлены результаты испытаний технических тканей с покрытием. В связи с особенностями данной разрывной машины общий размер образцов составил 50 × 400 мм, рабочий размер — 50 × 300 мм, что на 100 мм длиннее образцов по ГОСТ 30303-95. Материал был подвергнут растяжению с постоянной скоростью 100 мм/мин. (рис. 4). Испытания проводились до разрушения образцов (рис. 5). На поверхность материала была нанесена (распылена) черная краска для возможности использования оптического метода корреляции цифровых изображений.

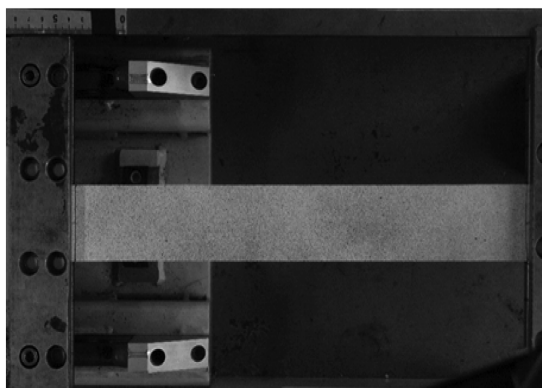


Рис. 4. Лабораторное испытание материала при одноосном растяжении
[Laboratory test material under uniaxial tension]

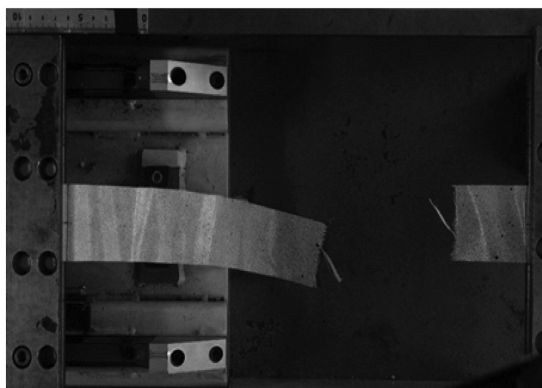


Рис. 5. Разрушение технической ткани с покрытием при одноосном растяжении
[The destruction of the technical coated with the uniaxial tension]

При подготовке образцов из Mehler Polymar 8212 в направлении нитей утка, а потом и при первых испытаниях материала в этом же направлении был установлен важный факт. При нанесении полимерного покрытия на ткань нити утка искривились на небольшой угол относительно нитей основы и стали не перпендикулярны к ним. Обычно предполагается, что угол между нитями основы и утка составляет 90° . В нашем случае у материала Mehler отклонение от прямого угла составило около 3° . В соответствии с обнаруженной особенностью образцы технической ткани с покрытием Mehler в направлении нитей утка вырезались из общего полотна не перпендикулярно нитям основы, как этого требует ГОСТ 30303-95, а под небольшим углом так, чтобы количество нитей утка по торцам образца было одинаково.

Казалось бы, такая небольшая погрешность в угле между нитями основы и утка должна была дать небольшое отклонение в значениях свойств технической ткани с покрытием. Однако при испытаниях материала Mehler, вырезанного по ГОСТ 30303-95, было обнаружено, что его свойства более характерны для внеосевых испытаний под углом 5° к нитям утка, чем к осевым испытаниям.

Тем не менее следует отметить, что технология Preconstraint всего лишь минимизирует эффект искривления нитей утка относительно нитей основы, но не убирает его полностью. В образцах технической ткани с покрытием Serge Ferrari, вырезанным согласно ГОСТ 30303-95, также наблюдалось искривление нитей утка, впрочем, это не оказало сильного влияния на результат.

По результатам обработки экспериментальных данных были построены кривые зависимостей напряжений от деформаций, в которых наглядно прослеживается физическая нелинейность материала (рис. 6). Также было установлено, что коэффициент Пуассона не является постоянной величиной. На рисунке 7 показана нелинейная зависимость коэффициента Пуассона от напряжений в материале.

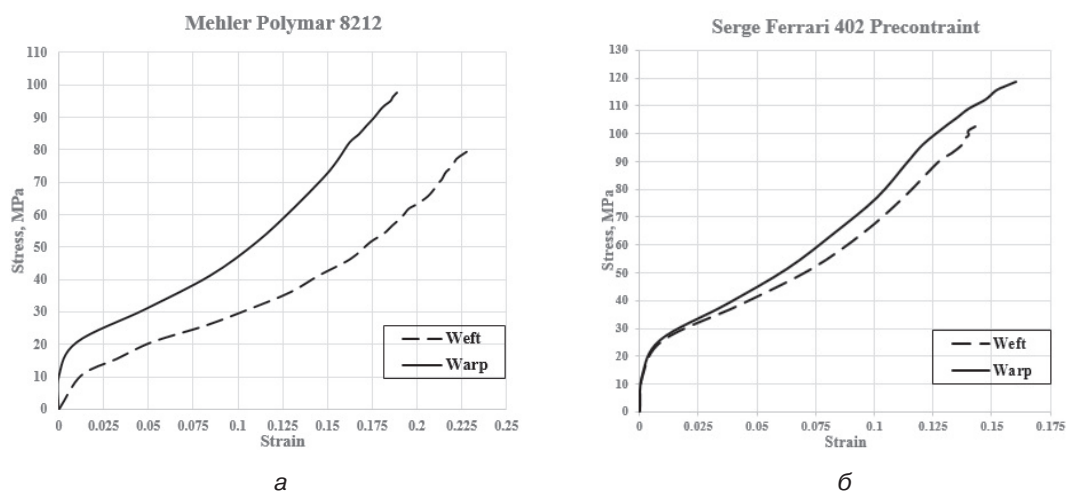


Рис. 6. Кривые зависимостей напряжений от деформаций при одноосном растяжении материала:
 а) Mehler Polymar 8212; б) Serge Ferrari 402 Preconstraint
 [The curves of the stress-strain under uniaxial tensile material:
 а) Mehler Polymar 8212; б) Serge Ferrari 402 Preconstraint]

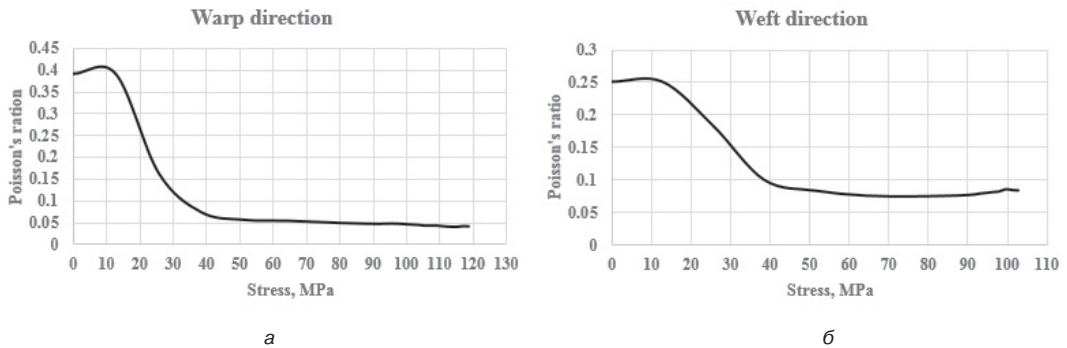


Рис. 7. Зависимость коэффициентов Пуассона от напряжений в материале Serge Ferrari 402 Precontraint в направлении: а) нитей основы; б) нитей утка [Dependence of the Poisson's ratios of the stresses in the material Serge Ferrari 402 Precontraint in the direction: a) warp; b) weft]

Нелинейный характер коэффициента Пуассона можно объяснить особенностью структуры, которая характерна для технической ткани с покрытием, и ортотропностью материала. В целом, техническая ткань с покрытием является композитным материалом.

По результатам экспериментов можно говорить об удовлетворительной схожести между разрывными характеристиками материала, полученными при лабораторных испытаниях, и нормативными значениями, приведенными в технических каталогах на техническую ткань с покрытием (табл. 2). Разницу приблизительно в 20% между предельными разрывными характеристиками материала в направлении нитей утка у обоих типов технической ткани с покрытием можно попытаться объяснить неизбежными погрешностями в проведении лабораторных испытаний; возможным завышением прочности на растяжение технической ткани с покрытием в направлении нитей утка производителями материала.

Таблица 2

	Предельная прочность на растяжение, Н / 5 см	Mehler Polymar 8212	Serge Ferrari 402 Precontraint
Основа	Нормативное значение	2 500	2 500
	Фактическое значение	2 373,55	2 283,74
Разница, %		4,03	8,65
Уток	Нормативное значение	2 500	2 500
	Фактическое значение	2 001,48	2 014,31
Разница, %		19,94	19,43

Для численного моделирования проведенных лабораторных испытаний в MSC Patran были созданы плоские конечно-элементные модели технической ткани с покрытием Mehler и Serge Ferrari (КЭ-модель). КЭ-модель была создана с размером конечных элементов 5 мм, с общим количеством узлов — 671, элементов — 600. В модели использовались следующие единицы измерения: линейные размеры — мм, вынужденные перемещения — мм, напряжения и модули деформации — Н/мм² (МПа).

Для создания моделей использовались плоские конечные элементы (2D) типа Shell с топологией в форме квадратов (quad) со следующими опциями: thin, homogeneous, standard formulation [7]. Материал задавался изотропным и физически нелинейным. Нагрузка задавалась вынужденным перемещением, моделирующим лабораторные испытания при одноосном растяжении. В качестве решателя был выбран Nast ran с типом решателя nonlinear static (sol 106). Расчет выполнялся с учетом физической и геометрической нелинейности. На рисунках 8—10 представлены некоторые результаты численного моделирования.

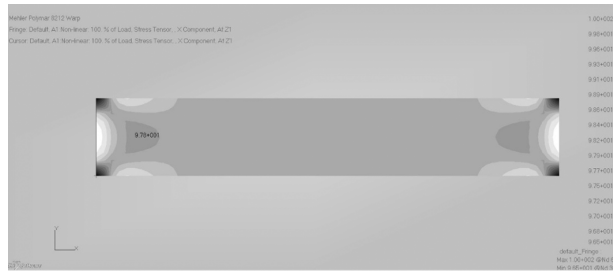
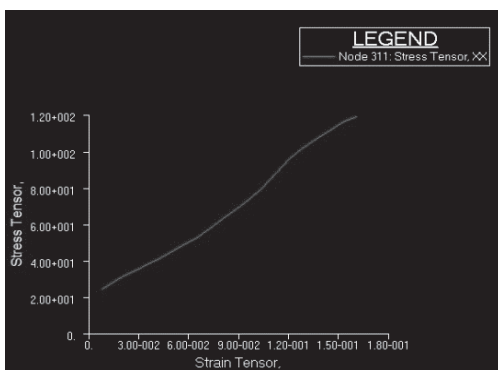


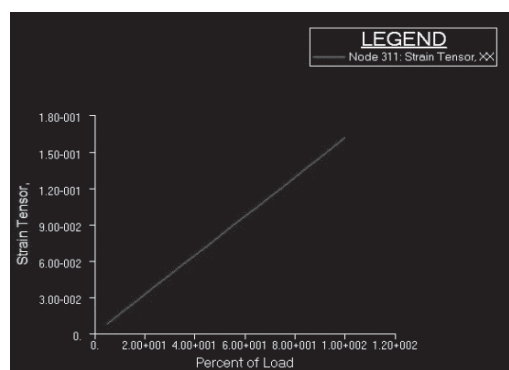
Рис. 8. Напряжения в материале Mehler Polymer 8212 в направлении основы, МПа [Stresses in Mehler Polymer 8212 material in the warp direction, MPa]



Рис. 9. Деформации материала Serge Ferrari 402 Precontraint в направлении утка [Warp material Serge Ferrari Precontraint 402 in the weft direction]



а



б

Рис. 10. Техническая ткань с покрытием SergeFerrari 402 Precontraint:
 а) график зависимости напряжений (МПа) от деформаций;
 б) график зависимости деформаций от процента приложенной нагрузки
 [Technical coated fabric Serge Ferrari 402 Precontraint: a) plot of stress (MPa) of the deformation;
 b) a plot of the strain on the percentage of the applied load]

В таблице 3 приведены результаты сравнения напряжений и деформаций в технической ткани с покрытием между лабораторными и численными испытаниями.

Таблица 3

	Материал	Направление	Напряжения, МПа	Деформации
Лабораторные испытания	Mehler Polymar 8212	Основа	97,508	0,189
		Уток	80,829	0,23
Численное моделирование	Mehler Polymar 8212	Основа	97,796	0,189
		Уток	80,928	0,231
Разница (основа / уток), %			0,3 / 0,12	0 / 0,4
Лабораторные испытания	Serge Ferrari 402 Precontraint	Основа	118,678	0,16
		Уток	102,64	0,143
Численное моделирование	Serge Ferrari 402 Precontraint	Основа	118,92	0,161
		Уток	103,26	0,143
Разница (основа / уток), %			0,2 / 0,6	0,63 / 0

В заключение можно сделать следующие выводы.

Оптический метод корреляции цифровых изображений может успешно применяться в испытаниях при одноосном растяжении технической ткани с покрытием для измерения полей перемещений и деформаций на поверхности образца.

При проведении лабораторных испытаний технических тканей с покрытием, у которых отсутствует технология Precontraint, необходимо более внимательно подходить к подготовке образцов.

Если при визуальном осмотре технической ткани с покрытием заметна неперпендикулярность нитей основы и утка или при проведении экспериментов при одноосном растяжении поведение материала несколько отличается от поведения при осевых испытаниях, то образцы в направлении нитей утка следует подготавливать определенным образом, отличающимся от приведенной методики в нормативных документах.

Показана возможность создания и расчета численной модели материала с физической и геометрической нелинейностью в программном комплексе MSC Patran с отличием в результатах между лабораторными и численными испытаниями менее чем на 1%.

В целом, как выявлено в лабораторных испытаниях, техническая ткань с покрытием является ортотропным и физически нелинейным материалом, что подтверждается множеством других исследований.

© Кустов А.А., 2017

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- [1] *Кривошапко С.Н.* Пневматические конструкции и сооружения // *Строительная механика инженерных конструкций и сооружений*. 2015. № 3. С. 45—53.
- [2] *Кустов А.А., Ибрагимов А.М.* Методики и результаты натурных испытаний технических тканей с покрытием. Ч. 1. Обзор проведенных исследований // *Строительные материалы*. 2016. № 11. С. 41—45.
- [3] *Скопенко В.А.* Тентовая архитектура вчера, сегодня, завтра // *Академический вестник Уралниипроект РААСН*. 2010. С. 30—36.

- [4] Третьякова Т. В., Вильдеман В.Э. Исследование развития трещин при сложных режимах нагружения методом корреляции цифровых изображений // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2012. № 6. С. 54—58.
- [5] Ambroziak A. Mechanical properties of PVDF-coated fabric under tensile tests // J. Polym. Eng. 2015. Т. 35. № 4. С. 210—224.
- [6] Cherif C. Textile materials for lightweight constructions: technologies — methods — materials — properties // Springer-Verlag Berlin Heidelberg. 2016. 686 с.
- [7] MSC Patran 2013 User's Guide — MSC. Software Corporation, 2013.

История статьи:

Дата поступления в редакцию: 18 декабря 2016

Дата принятия к печати: 22 января 2017

Для цитирования:

Кустов А.А. Моделирование технических тканей с покрытием для мягких оболочечных конструкций // *Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования.* 2017. Т. 18. № 1. С. 48—57.

Сведения об авторе:

Кустов Алексей Андреевич, аспирант, ассистент кафедры металлических и деревянных конструкций, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет. *Сфера научных интересов:* лабораторные испытания и численное моделирование технических тканей с покрытием. *Контактная информация:* e-mail: AlexeyKustov@outlook.com.

MODELING OF TECHNICAL COATED FABRICS FOR TENSILE STRUCTURES

A.A. Kustov

Moscow State University of Civil Engineering (MGSU)
Jaroslavskoe shosse, 26, Moscow, Russia, 129337

In this article, the laboratory tests executed with a research objective of mechanical properties of technical coated fabric are described. Experiments included uniaxial tensile tests in the warp and weft directions. For measurement of displacements and deformations on a surface of a sample the method of digital images correlation has been used. The numerical simulation of material has been constructed and calculated to simulate the experiments. Good convergence between results of laboratory and numerical researches is shown

Key words: technical located fabrics, laboratory tests, numerical simulation, digital image correlation

REFERENCES

- [1] Krivoshapko S.N. Pneumatic structures and buildings. Structural Mechanics of Engineering Constructions and Buildings. 2015. № 3. P. 45—53.

- [2] Kustov A.A., Ibragimov A.M. Procedures and Results of Full-Scale Tests of Technical Fabrics with Coating. Part 1. Review of Conducted Studies. *Stroitel'nye materialy*. 2016. № 11. С. 41–45.
- [3] Skopenko V.A. Tentovaya arkhitektura vchera, segodnya, zavtra. *Akademicheskii vestnik Uralniiproekt RAASN*. 2010. S. 30–36.
- [4] Tret'yakova T.V., Vil'deman V.E. Issledovanie razvitiya treshchin pri slozhnykh rezhimakh nagruzheniya metodom korrelyatsii tsifrovyykh izobrazheniy. *Zavodskaya laboratoriya. Diagnostika materialov*. 2012. № 6. S. 54–58.
- [5] Ambroziak A. Mechanical properties of PVDF-coated fabric under tensile tests. *J. Polym. Eng.* 2015. T. 35. № 4. S. 210–224.
- [6] Cherif C. *Textile materials for lightweight constructions: technologies — methods — materials — properties*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2016. 686 c.
- [7] *MSC Patran 2013 User's Guide — MSC. Software Corporation*, 2013.

Article history:

Received: 18 December 2016

Accepted: 22 January 2017

For citation:

Kustov A.A. (2017) Modeling of technical coated fabrics for tensile structures. *RUDN Journal of Engineering Researches*, 18(1), 48–57.

Bio Note:

Alexey A. Kustov, postgraduate student, assistant of department steel and wood construction, National Research Moscow State University of Civil Engineering. *Research Interests*: laboratory tests and numerical simulation of technical coated fabrics. *Contact information*: e-mail: AlexeyKustov@outlook.com.