

УДК 620.172

Д.С. Лобанов, М.С. Темерова

Пермский национальный исследовательский политехнический университет,
Пермь, Россия

ОСОБЕННОСТИ КВАЗИСТАТИЧЕСКИХ ИСПЫТАНИЙ НИТЕЙ И ТКАНЕЙ

Работа посвящена анализу методических вопросов механических испытаний нитей и тканей, которые являются армирующими элементами при создании композиционных материалов. Представлены методики проведения статических испытаний на растяжение кремнеземной ткани КТ-11-ТОА и стеклянных нитей с определением механических свойств. На образцах ткани определено значение максимальной разрушающей нагрузки, проведен статистический анализ, посчитан коэффициент вариации, построены диаграммы деформирования. На образцах стеклянных нитей получены значения максимальной нагрузки, максимальной удельной нагрузки, упругого модуля и относительного удлинения при разрыве. Построены диаграммы деформирования, проведена статистическая обработка по 60 образцам и получены средние значения механических характеристик и коэффициенты вариации. Испытания проводились на универсальной электро-механической испытательной системе Instron 5965 с использованием бесконтактного видеоэкстензометра AVE.

Ключевые слова: испытание на растяжение, экспериментальная механика, армирующий элемент, стеклянная нить, кремнеземная ткань.

D.S. Lobanov, M.S. Temerova

Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation

FEATURES OF QUASISTATIC TESTS OF THREADS AND FABRICS

This paper devoted to analyzes the methodological issues of mechanical testing of filaments and fabrics, which are the reinforcing elements to create composite materials. In this paper static tensile tests techniques silica fabric CT-11-TOA and glass filaments with determination of mechanical properties develop and approved. On samples of fabric value of the maximum ultimate load is defined, the statistical analysis is carried out, the variation coefficient is counted, deformation charts are constructed. On samples of glass threads values of the maximum loading, the maximum specific loading, the elastic module and relative elongation at a gap. The diagrams of deformation carried out statistical analysis of 60 samples were obtained and the average values of the mechanical characteristics and the coefficients of variation. Tests were carried out on the electromechanical Instron 5965 testing system with use of the contactless video extensometer AVE.

Keywords: tension test, experimental mechanics, reinforced element, glass thread, silica fabric.

Введение

При создании и проектировании изделий из композитов актуальным вопросом является исследование свойств исходных компонентов, в частности армирующих элементов, обеспечивающих качество создаваемого материала [1–2].

В данной работе объектами исследования являются кремнеземная стеклянная ткань КТ 11 ТОА и стеклянные нити, которые используются для создания композитов и конструкций из них. Кремнеземные ткани изготавливаются из суровых тканей, выработанных из стеклянных комплексных крученых нитей переплетением сатин 8/3 или полотняным переплетением. Для получения ткани КТ 11 ТОА производится кислотная обработка, термическая обработка и аппретирование суровых тканей. Аппретирование осуществляется водным раствором продукта АГМ-9 или АДЭ-3.

Цель работы – отработка методик экспериментального определения механических свойств нитей и тканей как армирующих элементов композиционных материалов.

1. Оборудование

Экспериментальные исследования проводились на базе Центра экспериментальной механики Пермского национального исследовательского политехнического университета на универсальной электро-механической испытательной системе Instron 5965 с использованием бесконтактного видеоэкстензометра Instron AVE [3–4].

Универсальная электромеханическая испытательная система Instron 5965 предназначена для квазистатических испытаний. К основным характеристикам относятся: скорость испытания (варьируется от 0,001 до 3000 мм/мин), допустимая максимальная нагрузка ± 5 кН. Точность измерения нагрузки составляет 0,4 % от измеряемой величины в диапазоне 1–100 % номинальной мощности датчика нагрузки и 0,5 % от измеряемой величины в диапазоне 0,2–1 % номинальной мощности датчика нагрузки. Для увеличения точности измерений в данную испытательную систему также включены сменные динамометрические элементы номиналом ± 100 Н и ± 5 Н. Общий вид системы Instron 5965 представлен на рис. 1.

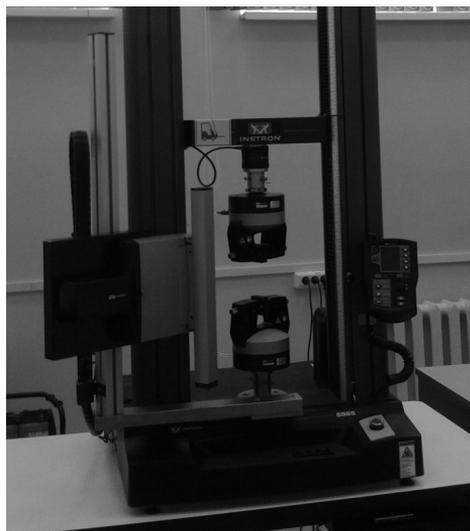


Рис. 1. Электромеханическая испытательная система Instron 5965 с бесконтактным видеоэкстензометром AVE Instron

Для бесконтактного измерения деформации существуют различные оптические системы, основанные на определении перемещений точек. Примером такой оптической системы является видеоэкстензометр AVE Instron, который активно используется при испытаниях композиционных материалов с неоднородной структурой (см. рис. 1, слева, на колонне испытательной системы) [5–7].

Принцип работы AVE основан на точном определении меток измерительной базы при помощи цифровой видеокамеры с высоким разрешением. Цифровая камера содержит двумерный видеодатчик. При проведении эксперимента камера постоянно получает изображение испытываемого образца. Скорость оцифровки видеосигнала составляет один кадр информации в 20 мкс, т.е. один раз в 20 мкс в памяти сохраняется и обновляется один кадр информации, выдаваемой камерой. Для установки различных полей зрения, соответствующих удлинению разных образцов, возможна замена объектива камеры. Для AVE допускается использование объективов с полем зрения 60, 200 и 500 мм.

2. Испытание стеклоткани

При проведении испытаний учитывались рекомендации стандарта ГОСТ 6943.10–79, который регламентирует методы определения разрывной нагрузки и удлинения при разрыве текстильных

стеклянных материалов. В то же время можно отметить, что данный стандарт имеет ряд недостатков. При определении удлинения при разрыве не учитывается проскальзывание образца в захватах. Деформация измеряется не на образце, а по перемещению захватов, что значительно снижает точность измерения значения деформации материала. Современное испытательное оборудование позволяет решить данные проблемы.

Во время испытания деформации измерялись на образце при помощи бесконтактного видеоэкстензометра. На образцы наносились специальные метки, перемещения которых отслеживалось и фиксировалось видеоэкстензометром. Для фиксации разрушающей нагрузки использовался датчик с диапазоном измерений до 5 кН. При подготовке образцов в соответствии с ГОСТом количество нитей в образцах контролировалось, и было одинаковым (по основе 22 нити, по утку 20 нитей). Образцы закреплялись пневматическими захватами, при этом ленты в захватных частях обклеивались бумагой для того, чтобы образец не проскальзывал в захватах. Длина поперечных нитей превышала ширину рабочей части образца для того, чтобы продольные нити относительно оси нагружения не сыпались по кромкам и сохраняли целостность образца (рис. 2).

Образцы из стеклоткани вырезались в виде лент, вдоль основы и вдоль утка, длиной 220 мм и шириной 25 мм. Расстояние между захватами составляло 100 мм. Испытания проводились при скорости подвижного захвата 100 мм/мин до полного разрушения образца.

Всего на растяжение было испытано 10 образцов стеклоткани, по 5 в каждом направлении. На рис. 3 представлены аппроксимации диаграмм растяжения. Для сравнения на графиках приведены ап-

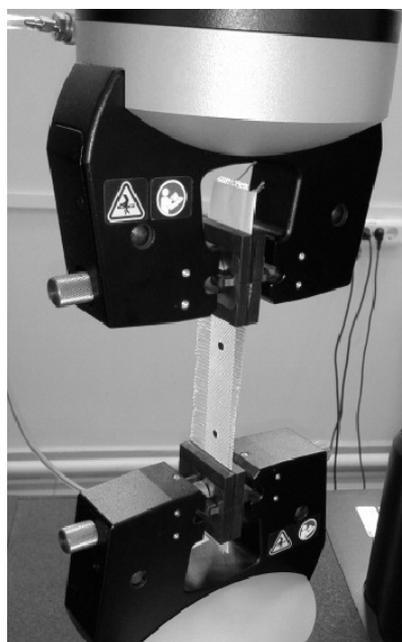


Рис. 2. Образец ленты стеклянного тканого материала, закрепленный пневматическими захватами испытательной системы

проксимации диаграмм, построенные по видеоэкстензометру и по встроенному датчику перемещений. В табл. 1 приведены полученные в ходе испытания значения максимальной разрушающей нагрузки P и перемещений (u) – удлинение рабочей части образца.

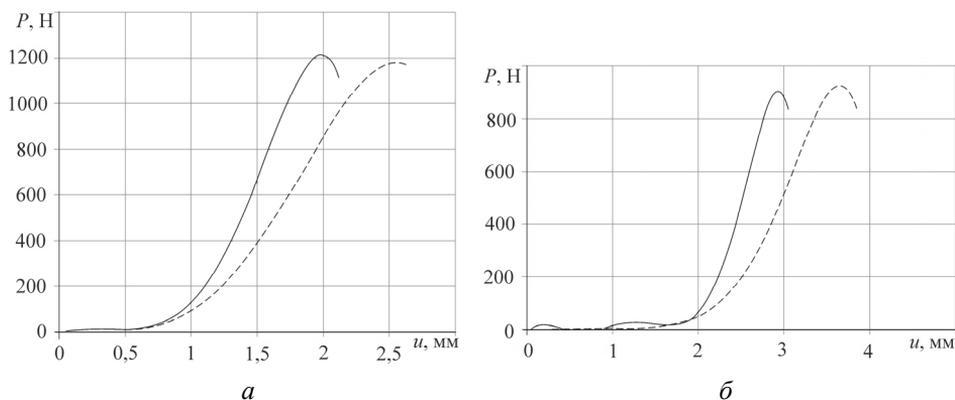


Рис. 3. Аппроксимации диаграмм деформирования стеклоткани, вырезанной в направлении основы (а) и утка (б): сплошная линия – линия аппроксимации зависимости нагрузки от перемещения, полученного при помощи бесконтактного видеоэкстензометра, пунктирная линия – линия аппроксимации зависимости нагрузки от перемещения, полученного со встроенного датчика

Как видно из рис. 3, диаграммы, построенные по видеоэкстензометру (сплошная линия) и встроенному датчику (пунктирная линия), имеют существенное отличие по значениям удлинения. Аналогичный вопрос исследовался в работе [8]. Начальный участок диаграммы деформирования объясняется не проскальзыванием в захватах, а раскручиванием и выпрямлением нитей, так как удлинение при разрыве измерялось непосредственно на образце при помощи видеоэкстензометра. Данную особенность деформирования тканых материалов следует учитывать при проектировании конструкций и прогнозировании прочностных свойств.

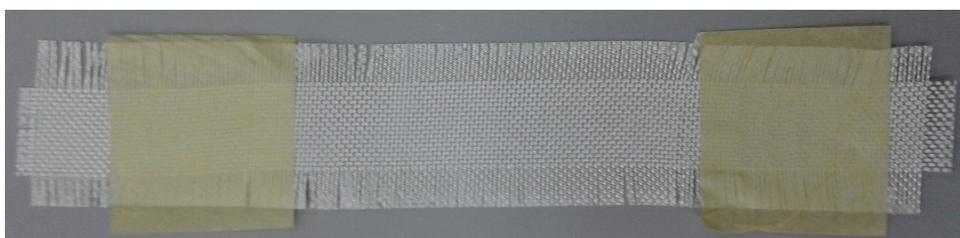
На рис. 4 показан образец стеклоткани до и после испытания на растяжение.

Таблица 1

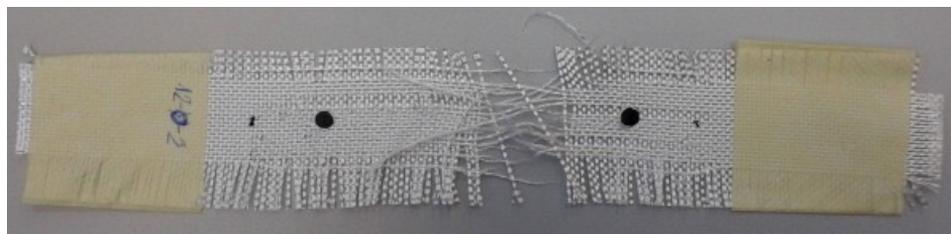
Результаты испытаний на растяжение образцов стеклоткани
в направлении основы и утка

Номер образца	Удлинение при разрыве u (мм)*		Максимальная разрушающая нагрузка P (Н)		Среднее значение максимальной разрушающей нагрузки $\overline{P}_{\text{раз}}$ (Н)		Средне-квадратичное отклонение $\langle S \rangle$ (Н)		Коэффициент вариации V (%)	
	по основе	по утку	по основе	по утку	по основе	по утку	по основе	по утку	по основе	по утку
1	2,120	3,122	1262,215	1106,256	1250,6	1015,8	29,57	50,92	2,36	5,01
2	1,841	3,063	1143,453	1126,276						
3	2,042	2,906	1313,366	1051,809						
4	1,777	2,917	1245,957	862,116						
5	1,972	3,056	1264,224	934,439						

* Значения удлинения при разрыве измерялись на образце бесконтактным видеоэкстензометром AVE.



а



б

Рис. 4. Образец стеклоткани до испытания (а) и после испытания с характерным видом разрушения (б)

3. Испытание стеклянных нитей

При разработке методики испытания стеклянных нитей учитывались рекомендации ГОСТ 6611.2–73, ГОСТ 6943.5–79 и опыт проведения экспериментального исследования механических свойств нитей, опубликованный в работе [9]. Данные стандарты регламентируют методы определения разрывной нагрузки и удлинения при разрыве нити. Аналогично ГОСТ 6943.10–79 для испытания нитей также не учитывает проскальзывание образца в захватах при определении удлинения. Деформация измеряется не на образце, а по перемещению захватов, что значительно снижает точность измерения значений деформации испытываемого материала. Для фиксации разрушающей нагрузки использовался датчик с диапазоном измерений до 5 кН, для измерения деформаций – объектив с полем зрения 500 мм. Образцы стеклянных

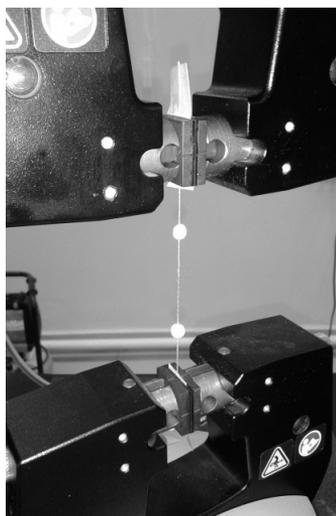


Рис. 5. Образец стеклянной нити, закрепленный пневматическими захватами испытательной системы

нитей закреплялись пневматическими захватами так, чтобы расстояние между метками составляло 100 мм. Захватные части образцов обклеивались бумагой для обеспечения отсутствия проскальзывания в захватах и равномерного обжатия образцов. Испытания проводились при скорости подвижного захвата 10 мм/мин до разрушения. Расчетная линейная плотность стеклянной нити равна 176,5 текс (единица линейной плотности – гр/км). Для измерения деформаций на образце использовался бесконтактный видеоэкстензометр. Внешний вид испытательного оборудования образца стеклянной нити с установленными метками для бесконтактного измерения деформаций представлен на рис. 5.

Результаты испытания стеклянных нитей представлены на рис. 6. В табл. 2 приведены полученные в ходе испытания значения максимальной разрушающей нагрузки, максимальной удельной нагрузки, модуля и относительного удлинения при разрыве для 60 образцов стеклянных нитей.

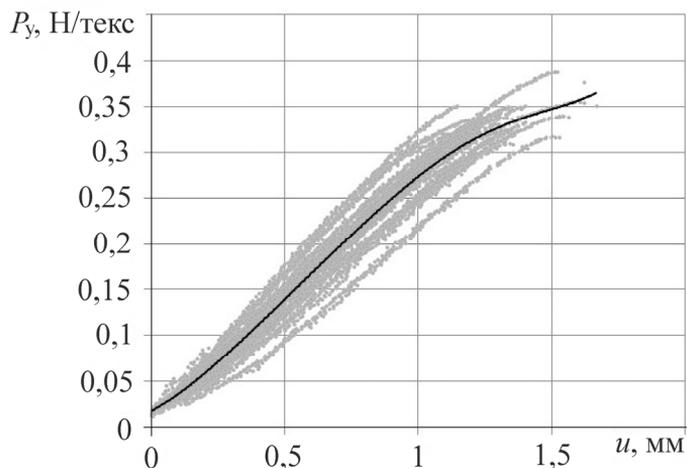


Рис. 6. Диаграммы деформирования образцов стеклянной нити при испытаниях на одноосное растяжение

Диаграммы деформирования образцов выходят не из нуля, так как перед началом испытания проводилось предварительное нагружение до значения по нагрузке, равное 1 Н, что регламентировано стандартом. Из графика виден достаточно большой статистический разброс по нагрузке и, соответственно, по удельной нагрузке, что необходимо учитывать при расчетах конструкций из композиционных материалов. Важным фактором является масштабный эффект.

Таблица 2

Результаты испытаний на растяжение стеклянных нитей

№ п/п	Максимальная нагрузка P (Н)	Максимальная удельная нагрузка P_y (Н/текс)	Модуль, E (Н/текс)	Относительное удлинение при разрыве ε (%)
1	54,6	0,30937	27,875	1,19
2	60,1	0,34028	22,5	1,56
3	58,53	0,33165	27,5	1,3
4	60,6	0,34335	31,25	1,31
5	56,04	0,31756	20	1,53
6	52,84	0,29939	23,75	1,24
7	58,06	0,32897	29,375	1,24
8	61,84	0,35038	29,375	1,35
9	56,69	0,32118	33,125	1,12
10	56,71	0,32131	29,375	1,22

Продолжение табл. 2

№ п/п	Максимальная нагрузка P (Н)	Максимальная удельная нагрузка P_v (Н/текс)	Модуль, E (Н/текс)	Относительное удлинение при разрыве ε (%)
11	54,84	0,31074	22,5	1,36
12	49,98	0,28315	19,375	1,24
13	56,3	0,319	30,625	1,22
14	45,84	0,25972	25	1,03
15	56,61	0,32071	26,25	1,21
16	52,73	0,29876	30	1,38
17	59,78	0,33871	25	1,42
18	59,01	0,33436	31,25	1,24
19	63,2	0,35808	33,125	1,21
20	52,04	0,29483	27,5	1,18
21	59,6	0,33767	35	1,35
22	62,78	0,3557	27,5	1,67
23	68,63	0,38885	28,125	1,51
24	56,8	0,32179	25	1,41
25	62,52	0,35421	28,75	1,47
26	59,18	0,33528	25	1,44
27	57,23	0,32426	28,75	1,37
28	62,22	0,35251	30	1,38
29	59,47	0,33692	33,125	1,22
30	61,75	0,34986	26,25	1,52
31	48,48	0,27466	25	1,15
32	56,6	0,32069	27,5	1,059
33	54,97	0,31147	27,5	1,32
34	59,96	0,33974	23,75	1,68
35	58,97	0,3341	27,5	1,33
36	57,46	0,32557	26,25	1,43
37	59,1	0,33484	25	1,58
38	54,63	0,30954	27,5	1,17
39	45,44	0,25745	31,25	0,65
40	56,51	0,32018	27,5	1,34
41	62,66	0,35505	28,75	1,45
42	58,92	0,33384	25	1,39
43	60,09	0,34045	26,25	1,45
44	61,06	0,34596	29,375	1,48
45	61,64	0,34922	27,5	1,46
46	58,37	0,33068	30	1,28
47	65,46	0,3709	28,75	1,44
48	59,39	0,33651	26,25	1,45

Окончание табл. 2

№ п/п	Максимальная нагрузка P (Н)	Максимальная удельная нагрузка P_y (Н/текс)	Модуль, E (Н/текс)	Относительное удлинение при разрыве ϵ (%)
49	59,94	0,33961	30	1,29
50	59,79	0,33877	26,25	1,63
51	61,85	0,35042	26,25	1,48
52	55,32	0,31342	31,25	1,27
53	61,05	0,34592	26,25	1,51
54	54,48	0,30864	26,25	1,24
55	59,05	0,33454	30	1,47
56	52,77	0,29898	25	1,26
57	58,95	0,33402	28,75	1,34
58	58,03	0,32878	27,5	1,46
59	61,99	0,35122	22,5	1,63
60	54,63	0,30951	26,875	1,08

На рис. 7 показан характерный вид разрушения образцов стеклянной нити во время испытаний на одноосное растяжение.

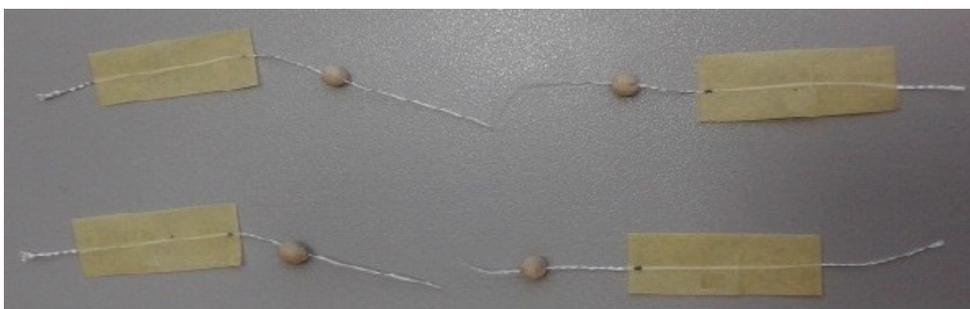


Рис. 7. Разрушенные образцы стеклянной нити с установленными шарообразными метками для бесконтактного измерения деформации на образце

Было испытано 60 образцов стеклянных нитей, статистически достоверно определены упругий модуль $E = (27,496 \pm 0,398)$ Н/текс, максимальная нагрузка $\overline{P}_{\text{раз}} = (57,901 \pm 0,553)$ Н, максимальная удельная нагрузка $P_y = (0,328 \pm 0,003)$ Н/текс с доверительной вероятностью 0,95.

Таким образом, были отработаны методики испытаний на растяжение кремнеземной стеклоткани с использованием современного научного оборудования. Были определены механические свойства стеклянных нитей, стеклоткани по основе и по утку. С высокой точностью

определена максимальная разрушающая нагрузка, проведен статистический анализ, посчитан коэффициент вариации, построены диаграммы деформирования.

Из испытаний на растяжение армирующих элементов – нитей из стеклоткани – получены значения максимальной нагрузки, максимальной удельной нагрузки, упругого модуля и относительного удлинения при разрыве с измерением деформации на образце при использовании бесконтактного видеозкстензометра. Построены диаграммы деформирования, проведена статистическая обработка по 60 образцам и получены средние значения механических характеристик и коэффициенты вариации.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 12-08-31336мол_а, № 13-08-00304 а) и РФФИ-Урал 13-08-96016.

Библиографический список

1. Гарнопольский Ю.М., Жигун И.Г., Поляков В.А. Пространственно-армированные композиционные материалы: справочник. – М.: Машиностроение, 1987. – 224 с.

2. Гарнопольский Ю.М., Кинцис Т.Я. Методы статических испытаний армированных пластиков. – М.: Химия, 1981. – 272 с.

3. Экспериментальные исследования свойств материалов при сложных термомеханических воздействиях / под ред. В.Э. Вильдемана. – М.: Физматлит, 2012. – 204 с.

4. Механика материалов. Методы и средства экспериментальных исследований: учеб. пособие / В.Э. Вильдеман [и др.]; под ред. В.Э. Вильдемана. – Пермь: Изд-во Перм. нац. исслед. политехн. ун-та, 2011. – 165 с.

5. Бабушкин А.В., Вильдеман В.Э., Лобанов Д.С. Испытание на растяжение однонаправленного высоконаполненного стеклопластика при нормальных и повышенных температурах // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 2010. – № 7. – С. 57–59

6. Лобанов Д.С., Бабушкин А.В. Методика испытаний на одноосное растяжение однонаправленных композиционных материалов при пониженных температурах // Вестник Перм. нац. исслед. политехн. ун-та. Механика. – 2012. – № 4. – С. 33–41.

7. Экспериментальные исследования деформационных и прочностных свойств наномодифицированных стеклотекстолитов / В.Э. Вильдеман, А.В. Бабушкин, С.М. Никулин, М.П. Третьяков [и др.] // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 2012. – Т. 78, № 7. – С. 57–61.

8. Вильдеман В.Э., Третьякова Т.В., Лобанов Д.С. Учет жесткости нагружающей системы при испытаниях полунатурных образцов крупноячеистого композиционного материала // Вестник Перм. нац. исслед. политехн. ун-та. Механика. – 2012. – № 2. – С. 34–49.

9. Экспериментальное исследование механических свойств современных хирургических рассасывающихся шовных материалов / А.Е. Федоров, В.А. Самарцев, В.А. Гаврилов, В.Э. Вильдеман [и др.] // Российский журнал биомеханики. – Т. 13, № 4 (46). – 2009. – С. 78–84.

References

1. Tarnopolsky Y.M., ZHigun I.G., Polyakov V.A. Prostranstvenno-armirovannye kompozicionnye materialy [Spatial-reinforced composite materials]. Moscow: Mashinostroenie, 1987. 224 p.

2. Tarnopolsky Y.M., Kintsis T.Y. Metody staticheskikh ispytaniy armirovannykh plastikov [Methods of static tests of reinforced plastics. Chemistry]. Moscow: Khimija, 1981. 272 p.

3. Eksperimentalnye issledovaniya svojstv materialov pri slozhnykh termomekhanicheskikh vozdeystviyakh [Experimental investigations of the materials properties under complex thermomechanical influences]. Ed. V.E. Vildeman. Moscow: Fizmatlit, 2012. 204 p.

4. V.E. Vildeman [et al.] Mehanika materialov. Metody i sredstva eksperimental'nyh issledovaniy: uchebnoe posobie [Mechanics of materials. Methods and means of experimental research: tutorial]. Ed. V.E. Vildeman. *Permskiy natsionalniy issledovatel'skiy polytekhnicheskiy universitet*, 2011, 165 p.

5. Babushkin A.V., Wildemann V.E., Lobanov D.S. Ispytaniya na rastyazhenie odnonapravlennoy vysokonapolnennoy stekloplastika pri normalnoy i povyshennoy temperaturakh [Tensile tests of unidirectional high-filled fiberglass composite at normal and high temperatures]. *Zavodskaya laboratoriya. Diagnostika materialov*, 2010, vol. 76, no. 7, pp. 57–59.

6. Lobanov D.S., Babushkin A.V. Metodika ispytaniy na odnoosnoe rastyazhenie odnonapravlennykh kompozitsionnykh materialov pri ponizhennykh temperaturakh [Technique of unidirectional composite materials at low temperatures tensile tests]. *Vestnik Permskogo natsionalnogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Mekhanika*, 2012, no. 4, pp. 33–41.

7. Vildeman V.E., Babushkin A.V., Nikulin S.M., Tret'yakov M.P., Lobanov D.S., Struk N.V. Eksperimentalnye issledovaniya deformatsionnykh i prochnostnykh svoystv nanomodificirovannykh steklotekstolitov [Experimental research of deformation and strength properties of nano-modified glass fiber laminate]. *Zavodskaya laboratoriya. Diagnostika materialov*, 2012, vol. 78, no. 7, pp. 57–61.

8. Vildeman V.E., Tretyakova T.V., Lobanov D.S. Uchjot zhjostkosti nagruzhajushhej sistemy pri ispytaniyah polunaturnykh obrazcov krupnojacheistogo kompozicionnogo materiala [Accounting of loading system stiffness in tests on scaled-down wide-meshed composite specimens]. *Vestnik Permskogo natsionalnogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Mekhanika*, 2012, no. 2.

9. Fedorov A.E., Samartsev V.A., Gavrilov V.A., Vil'deman V.E., Slovikov S.V. Eksperimental'noe issledovanie mekhanicheskikh svoystv sovremennykh khirurgicheskikh rassasyvayushhikhshya shovnykh materialov [Experimental investigation the mechanical properties of the contemporary surgical resorbable suture materials]. *Rossijskij zhurnal biomekhaniki*, 2009, vol. 13, no. 4 (46), pp. 78–84

Об авторах

Лобанов Дмитрий Сергеевич (Пермь, Россия) – аспирант, младший научный сотрудник, инженер Центра экспериментальной механики Пермского национального исследовательского политехнического университета (614990, г. Пермь, Комсомольский пр., 29, e-mail: cem.lobanov@gmail.com).

Темерова Мария Сергеевна (Пермь, Россия) – студентка кафедры механики композиционных материалов и конструкций Пермского национального исследовательского политехнического университета (614990, г. Пермь, Комсомольский пр., 29, e-mail: cem.temerova@gmail.com).

About the authors

Lobanov Dmitry Sergeevich (Perm, Russian Federation) – Graduate student, Junior Scientific Associate and Engineer of the Center of Experimental Mechanics, Perm National Research Polytechnic University (29, Komsomolsky av., Perm, 614990, Russian Federation, e-mail: cem.lobanov@gmail.com).

Temerova Maria Sergeevna (Perm, Russian Federation) – Student of chair of the Mechanics for Composite Materials and Structures Department Perm National Research Polytechnic University (29, Komsomolsky av., Perm, 614990, Russian Federation, e-mail: cem.temerova@gmail.com).

Получено 24.04.13