

УДК 620.17

**В.Э. Вильдеман, Т.В. Третьякова, Д.С. Лобанов**Пермский национальный исследовательский  
политехнический университет, Пермь, Россия**УЧЕТ ЖЕСТКОСТИ НАГРУЖАЮЩЕЙ СИСТЕМЫ  
ПРИ ИСПЫТАНИЯХ ПОЛУНАТУРНЫХ ОБРАЗЦОВ  
КРУПНОЯЧЕИСТОГО КОМПОЗИЦИОННОГО МАТЕРИАЛА**

Отмечена важность понятия «нагружающая система» с точки зрения исследования процессов деформирования и разрушения материалов. Представлена методика, которая позволяет определять и учитывать коэффициент жесткости нагружающей системы при проведении испытаний крупногабаритных, полунатурных или нестандартных образцов на базе использования бесконтактной цифровой оптической системы анализа полей перемещений и деформаций, математический аппарат которой основан на методе корреляции цифровых изображений. Приведены временные зависимости удлинения образцов и частей нагружающей системы по данным встроенного динамометрического датчика испытательной машины, а также полученные с помощью оптического метода. Проведена качественная и численная оценка степени влияния специальных захватных приспособлений на податливость всей нагружающей системы, представлены результаты расчета характеристик жесткости.

**Ключевые слова:** экспериментальная механика, композиционный материал, коэффициент жесткости, нагружающая система, метод корреляции цифровых изображений.

**V.E. Vildeman, T.V. Tretyakova, D.S. Lobanov**

Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation

**ACCOUNTING OF LOADING SYSTEM STIFFNESS IN TESTS  
ON SCALED-DOWN WIDE-MESHED COMPOSITE SPECIMENS**

The importance of 'loading system' was noticed in terms of investigations of deformation and material damage processes. The paper presents a technique, which allows accounting of loading system stiffness coefficient in tests on large-size, scaled-down or nonstandard specimens by using noncontact digital optical displacement and strain fields measuring system, its software is based on digital image correlation technique. Time-curves of specimens and the loading system elongation, counted by load cell of test system and by using optic method. Qualitative and numerical assessments were carried out for influence identification of special gripping devices on loading system stiffness. Stiffness coefficients are presented as well.

**Keywords:** experimental mechanics, postcritical deformation, composite material, stiffness coefficient, loading system, digital image correlation.

## **Введение**

Несмотря на то, что современные испытательные системы обеспечивают высокие жесткостные характеристики, в процессе нагружения на любой испытательной машине деформация образца сопровождается упругой деформацией частей машины, включая раму, тяги, муфты, хватные приспособления, силоизмерительное устройство и т.п. Чем больше эта деформация, тем податливее «нагружающая система», под которой понимается совокупность всех тел, деформирующихся в результате передачи нагрузки рассматриваемой области. Важность понятия «нагружающая система» с точки зрения исследования процессов деформирования и разрушения была отмечена в работах многих авторов [1–11].

При экспериментальном изучении закономерностей поведения материалов и определении механических характеристик необходимо учитывать тесную связь податливости нагружающей системы с кинетикой и локальностью процесса разрушения [3, 4]. При изменении состояния, например повреждении среды в исследуемой области, внешняя по отношению к ней нагрузка изменяется в зависимости от упругих свойств и конструктивного устройства нагружающей системы. В связи с этим граничные условия, не учитывающие изменений внешних нагрузок, связанных с изменением конфигурации тела в процессе деформирования и повреждения, не вполне соответствуют реальным условиям работы элементов конструкций и производимых испытаний [7]. С этой точки зрения для более адекватного описания процессов деформирования, накопления повреждений и разрушения в работах [9–11] предложено и обосновано использование граничных условий третьего рода, позволяющих при помощи моделей механики закритического деформирования (деформационного разупрочнения) расширить физическую базу имеющихся моделей механики деформируемых тел, уточнить прочностные оценки, определить резервы несущей способности и прогнозировать катастрофичность разрушения конструкций [12].

Основная трудность при экспериментальном построении полных диаграмм состоит в создании достаточной жесткости системы нагружения элемента материала. С этой целью разработаны устройства для увеличения жесткости стандартных машин [8], а также специальные образцы усложненной геометрии [13–15].

Квазистатический опыт на растяжение является одним из наиболее распространенных методов механических испытаний. Именно применительно к этому способу испытаний относится основанный на многочисленных экспериментах вывод о существенной роли жесткости нагружающего устройства [1, 2, 4, 8 и др.].

При стандартных испытаниях влияние нагружающей системы может быть учтено путем использования различных систем тензометрирования, таких как наклеиваемые тензодатчики, навесные или бесконтактные экстензометры, которые позволяют получать данные о деформации материала непосредственно в рабочей зоне образца [16].

При испытаниях крупногабаритных или нестандартных образцов применяются различные дополнительные элементы крепления, которые оказывают существенное влияние на податливость всей нагружающей цепи. В данном случае коэффициент жесткости всей нагружающей системы будет существенно снижен вследствие податливости элементов захватных приспособлений и крепежных элементов, а также возможного проскальзывания в узлах, выборки технологических зазоров, что приведет к дополнительным перемещениям, регистрируемым встроенным датчиком испытательной установки.

## **1. Учет жесткости нагружающей системы**

В Центре экспериментальной механики Пермского национального исследовательского политехнического университета проведена серия испытаний по определению деформационных и прочностных характеристик полунатурных образцов крупноячеистого композиционного материала с использованием специализированных захватных приспособлений (рис. 1) [17].

Экспериментальные исследования полунатурных образцов проводились на универсальной электромеханической испытательной системе Instron 5882. Испытательная система включает основание, две стойки, траверсу и верхнюю плиту. Эта конструкция образует замкнутую раму с высокой жесткостью для уменьшения прогиба нагружающей рамы при приложении нагрузки. Согласно техническим характеристикам фирмы-изготовителя при максимальной нагрузке 100 кН средняя жесткость нагружающей рамы Instron 5882 составляет 255 кН/мм.

Современное программное обеспечение испытательных установок, например WaveMatrix и Bluehill, позволяет учесть жесткость нагружающей системы и произвести корректировку регистрируемых данных. Податливость нагружающей системы определяется путем проведения испытания с использованием нерабочего образца, жесткость которого должна быть, насколько это возможно, более высокой по сравнению с реальным образцом. В ходе данного испытания система формирует «файл податливости», содержащий значения нагрузки и удлинения. При нагружении реального образца программное обеспечение использует файл податливости для корректировки значений деформации и удлинения, регистрируемых во время этого испытания. В случае когда коэффициент жесткости нагружающей системы известен заранее, программное обеспечение также позволяет внести автоматическую корректировку регистрируемых данных.

Встроенные датчики перемещений испытательной машины фиксируют и позволяют контролировать при кинематическом нагружении удлинение всей нагружающей цепи  $u_0(t)$ , включая удлинение образца  $u(t)$  и перемещения, обусловленные упругой деформацией нагруженных частей испытательной машины. Следовательно, в общем случае удлинение образца

$$u(t) = u_0(t) - S(t) \frac{1}{R_{nc}}, \quad (1)$$

где  $S(t)$  – прикладываемая нагрузка;  $R_{nc}$  – жесткость нагружающей системы.

Поскольку при проведении испытаний полунатурных образцов из крупноячеистого композиционного материала использованы специальные захватные приспособления, при определении податливости всей нагружающей системы следует учитывать как податливость ис-

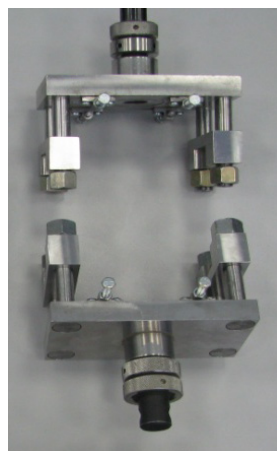


Рис. 1. Специальное захватное приспособление для испытания полунатурных образцов из композиционных материалов на растяжение

пытательной машины  $R_M$ , включая нагружающую раму, тяги и встроенный силоизмерительный датчик, так и податливость захватного приспособления  $R_{зп}$ :

$$\frac{1}{R_{нс}} = \frac{1}{R_M} + \frac{1}{R_{зп}}. \quad (2)$$

Следует отметить, что действительная скорость удлинения рабочей зоны образца  $\dot{i}$  также отличается от номинально заданной скорости кинематического нагружения  $\dot{i}_0$  и может быть определена по формуле

$$\dot{i} = \frac{\dot{i}_0}{1 + H_{обр}/R_{нс}}, \quad (3)$$

где  $H_{обр}$  – жесткость рабочей зоны образца, которая определяется модулем упругости материала  $E$ , площадью поперечного сечения рабочей зоны образца  $F$  и длиной рабочей зоны образца  $l_0$ :  $H_{обр} = EF/l_0$ .

## **2. Применение метода корреляции цифровых изображений для определения жесткости нагружающей системы**

При проведении испытаний крупногабаритных, полунатурных или нестандартных образцов целесообразно использовать современные оптические системы. На базе использования бесконтактной трехмерной цифровой оптической системы Vic-3D предложена методика для определения и учета жесткости нагружающей системы. Видеосистема предназначена для регистрации полей перемещений и деформаций на поверхности плоских, цилиндрических образцов и элементов конструкций независимо от типа исследуемого материала [15, 16, 18–20]. Математический аппарат видеосистемы основан на методе корреляции цифровых изображений (КЦИ), в зарубежной литературе известном как «digital image correlation technique» [21].

Идея предложенной методики заключается в регистрации полей перемещений на поверхности как самого полунатурного композитного образца, так и на поверхности элементов захватного приспособления (рис. 2). Применение видеосистемы позволяет получить экспериментальные данные о процессе деформирования материала в рабочей зоне

образцов, оценить жесткость конкретной испытательной установки с учетом встроенного динамометрического устройства и тяг, а также проанализировать степень влияния податливости дополнительного захватного приспособления на жесткость всей нагружающей системы.

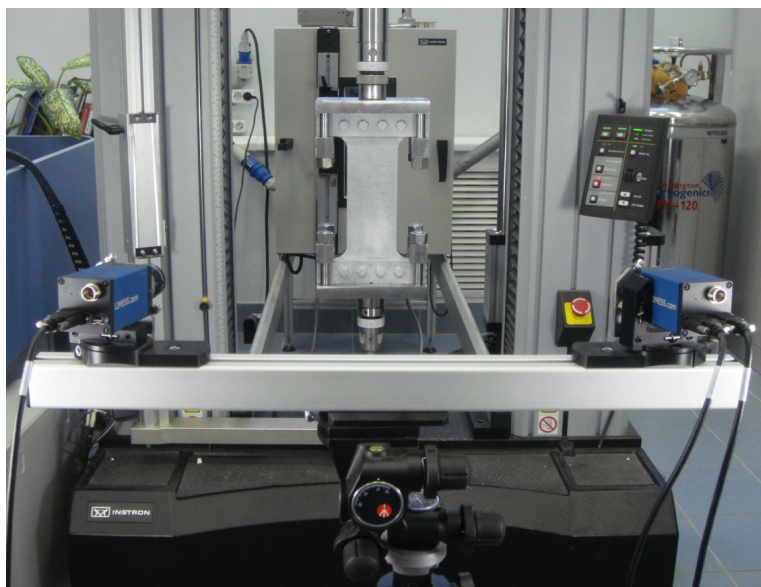


Рис. 2. Испытательная и оптическая системы для регистрации полей перемещений на поверхности образца и захватного приспособления методом корреляции цифровых изображений в опыте на одноосное растяжение

В состав цифровой оптической системы входят две цифровые монохромные CCD-камеры с максимальным разрешением 4,0 МПкс и скоростью съемки от 8 до 15 кадр/с (в зависимости от установленного разрешения), система подсветки, блок синхронизации с испытательной системой, а также специальное программное обеспечение для настройки и управления процессом съемки (Vic-Snap) и последующей математической обработки изображений (Vic-3D).

В связи с тем что для анализа полей перемещений методом КЦИ требуется предварительная подготовка поверхности исследуемых объектов, на поверхность композитного образца, металлических накладок и тяг испытательной системы нанесено контрастное мелкодисперсное покрытие (см. рис. 2). Удлинение образца и податливость нагружающей системы регистрировались с помощью дополнительного модуля

программного обеспечения видеосистемы «виртуальный экстензометр», краткое описание которого приведено в [19].

### 3. Результаты экспериментов

Регистрация удлинений на поверхности рабочей зоны образцов и элементов нагружающей системы осуществлялась с помощью оптического метода анализа полей перемещений согласно схеме, приведенной на рис. 3.

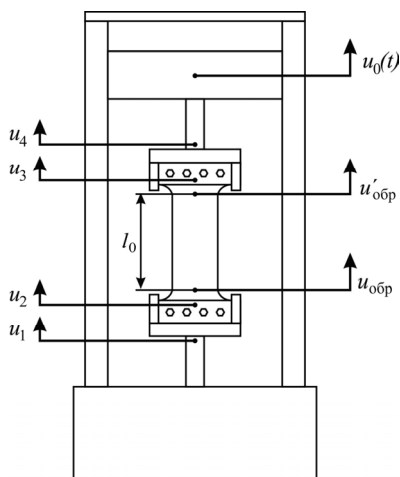


Рис. 3. Схема регистрации удлинения рабочей зоны образца и элементов нагружающей системы

На рис. 4 представлены временные зависимости удлинения образца и всей нагружающей системы, построенные на основании данных встроенного динамометрического датчика испытательной машины –  $u_0(t)$ , удлинения образца и части нагружающей системы, включающей специальное захватное приспособление:

$$u_{\text{нс}}(t) = u_4 - u_1 \quad (4)$$

и удлинения рабочей зоны образца

$$u(t) = u'_{\text{обр}} - u_{\text{обр}} \quad (5)$$

Отличие удлинения всего образца ( $u_3 - u_2$ ), включая области перехода от рабочей зоны к захватным частям, при нагрузке 17,8 кН составило 9,76 % ( $\Delta u = 0,293$  мм) от удлинения рабочей зоны образца.

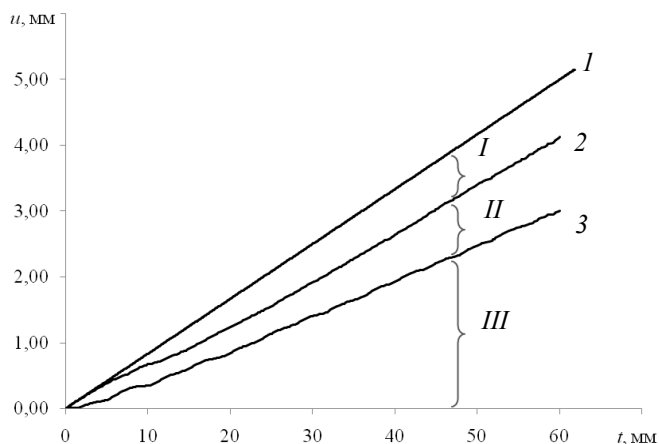


Рис. 4. Временные зависимости удлинения образца и всей нагружающей системы  $u_0(t)$  по встроенному датчику перемещений (1), образца и части нагружающей системы  $u_{nc}(t)$ , включающей специальное захватное приспособление (2), и удлинение рабочей зоны образца  $u(t)$  (3)

На рис. 4 показано перемещение, обусловленное упругой деформацией нагруженных частей испытательной машины (1); перемещение, обусловленное упругой деформацией захватных приспособлений и нерабочих частей образца (II), а также удлинение рабочей зоны образца (III).

На основе полученных экспериментальных данных проведена качественная и численная оценка степени влияния специальных захватных приспособлений на податливость всей нагружающей системы, результаты расчета характеристик жесткости приведены на рис. 5. Можно также сделать вывод о значительном влиянии встроенного динамометрического датчика и тяг испытательной машины на характеристику жесткости.

#### Значения средней жесткости элементов нагружающей системы

Средняя жесткость нагружающей рамы Instron 5882	Средняя жесткость испытательной машины Instron 5882, включая тяги и датчик нагрузки ( $\pm 100$ кН)	Средняя жесткость нагружающей системы, включая специальные захватные приспособления на растяжение
255 кН/мм	20 кН/мм	9,3 кН/мм



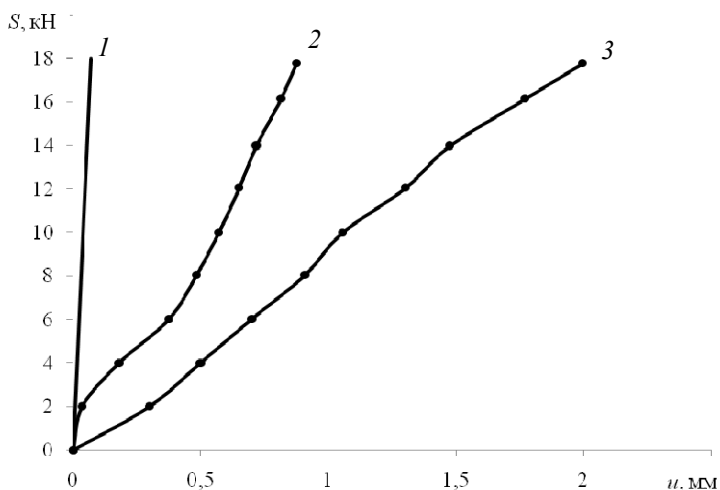


Рис. 5. Характеристика жесткости нагружающей рамы (1), испытательной системы, включая нагружающую раму, тяги и встроенного датчика нагрузки (2) и всей нагружающей системы, включая захватные приспособления (3)

Результаты демонстрируют, насколько важно учитывать влияние жесткостных характеристик нагружающей системы при проведении экспериментальных исследований механических и прочностных свойств материалов и что отсутствие должной корректировки регистрируемых данных может привести к значительной ошибке при определении деформационных характеристик. Как видим, использование в испытаниях дополнительных элементов крепления и специальных захватных приспособлений может привести к значительному удлинению кинематической цепи и существенному снижению жесткостных характеристик нагружающей системы в целом.

На рис. 6 построены диаграммы нагружения полунатурного образца из крупноячеистого композиционного материала. Из рисунка видно, что кривые 1 и 2, построенные по данным цифровой оптической системы Vic-3D и встроенного датчика перемещений соответственно, отличаются существенно. Так, например, при нагрузке 17,8 кН различие данных по перемещению составило 66,43 % ( $\Delta u = 1,995$  мм) от удлинения рабочей зоны образца.

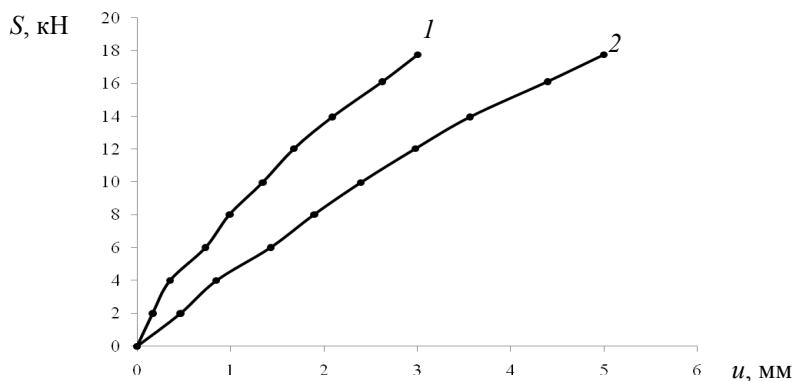


Рис. 6. Диаграммы нагружения полунатурного образца из крупноячеистого композиционного материала, построенные по данным цифровой оптической системы Vic-3D (1), по встроенному датчику перемещений (2)

Следует отметить, что использование оптического метода анализа полей перемещений позволяет провести контроль правильности проведения экспериментов за счет выявления возможных недочетов позиционирования крупногабаритных образцов при их закреплении в специальных захватных приспособлениях, а также в случае возникновения перекосов в процессе нагружения, повышая тем самым точность регистрируемых экспериментальных данных.

### Заключение

Таким образом, реальная жесткость нагружающих систем при проведении испытаний в силу использования динамометрических датчиков, тяг, захватных приспособлений и других устройств существенным образом отличается от регламентируемых значений жесткости нагружающей рамы испытательной системы. Это может коренным образом повлиять не только на значения определяемых деформационных характеристик, но и, как было показано во многих исследованиях, на кинетику разрушения материала. Исследование данных вопросов применительно к конкретному виду испытаний, в особенности при нестандартных опытах с использованием сложной оснастки, может быть осуществлено на базе применения современных оптических методов и аппаратуры анализа полей перемещений и деформаций.

### **Библиографический список**

1. Зилова Т.К., Фридман Я.Б. О механических испытаниях с переменной податливостью нагружения // Заводская лаборатория. – 1956. – Т. 22, № 6. – С. 712–717.
2. Савицкий Ф.С., Вандышев Б.А. Жесткость испытательных машин и ее влияние на спадающий участок диаграммы растяжения и изгиба // Заводская лаборатория. – 1956. – Т. 22, № 6. – С. 717–721.
3. Фридман Я.Б. Оценка опасности разрушения машиностроительных материалов // Теоретические основы конструирования машин. – М.: Гос. науч.-техн. изд-во машиностр. лит., 1957. – С. 257–281.
4. Фридман Я.Б. Механические свойства металлов. Ч.2. Механические испытания. Конструкционная прочность. – М.: Машиностроение. – 1974. – 368 с.
5. Зилова Т.К., Петрухина Н.И., Фридман Я.Б. О закономерностях кинетики деформации в зависимости от податливости нагружения // Докл. АН СССР. – 1959. – Т. 124, № 6. – С. 1236–1239.
6. Дроздовский Б.А., Фридман Я.Б. Влияние трещин на механические свойства конструкционных сталей. – М.: Metallurgizdat, 1960. – 260 с.
7. Волков С.Д. Проблема прочности и механика разрушения // Пробл. прочности. – 1978. – № 7. – С. 3–10.
8. Лебедев А.А., Чаусов Н.Г. Установка для испытания материалов с построением полностью равновесных диаграмм деформирования // Пробл. прочности. – 1981. – № 12. – С. 104–106.
9. Вильдеман В.Э., Соколкин Ю.В., Ташкинов А.А. Краевая задача механики деформирования и разрушения поврежденных тел с зонами разупрочнения // ПМТФ. – 1995. – № 6. – С. 122–132.
10. Вильдеман В.Э., Соколкин Ю.В., Ташкинов А.А. Механика неупругого деформирования и разрушения композиционных материалов / под ред. Ю.В. Соколкина. – М.: Наука, Физматлит, 1997. – 288 с.
11. Вильдеман В.Э. О решениях упругопластических задач с граничными условиями контактного типа для тел с зонами разупрочнения // Прикладная математика и механика. – 1998. – Т. 62, вып. 2. – С. 304–312.
12. Вильдеман В.Э. Механика закритического деформирования и вопросы прочностного анализа // International Journal for Computational Civil and Structural Engineering/ Международный журнал по расчету гражданских и строительных конструкций. – 2008. – Т. 4, № 2. – С. 43–44.

13. Лебедев А.А., Чаусов Н.Г., Евецкий Ю.Л. Методика построения полных диаграмм деформирования листовых материалов // Пробл. прочности. – 1986. – № 9. – С. 29–32.

14. Вильдеман В.Э., Чаусов Н.Г. Условия деформационного разрушения материала при растяжении образца специальной конфигурации // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 2007. – № 10. – С. 55–59.

15. Вильдеман В.Э., Третьякова Т.В., Лобанов Д.С. Методика экспериментального исследования закритического деформирования на образцах специальной усложненной конфигурации с применением метода корреляции цифровых изображений // Вестник ПГТУ. Механика. – Пермь: Изд-во Перм. гос. техн. ун-та, 2011. – № 4. – С. 15–28.

16. Экспериментальные исследования свойств материалов при сложных термомеханических воздействиях / В.Э. Вильдеман, М.П. Третьяков, Т.В. Третьякова, Р.В. Бульбович, С.В. Словиков, А.В. Бабушкин, А.В. Ильиных, Д.С. Лобанов, А.В. Ипатова / под ред. В.Э. Вильдемана. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2012. – 212 с.

17. Зуйко В.Ю., Лобанов Д.С., Аношкин А.Н. Методики определения предела прочности полунатурных образцов-панелей из композиционных материалов при статических испытаниях на растяжение, сжатие и сдвиг // Вестник ПНИПУ. Механика. – Пермь: Изд-во Перм. нац. исслед. политехн. ун-та, 2012. – № 2.

18. Вильдеман В.Э., Санникова Т.В., Третьяков М.П. Экспериментальное исследование закономерностей деформирования и разрушения материалов при плоском напряженном состоянии // Проблемы машиностроения и надежности машин. – 2010. – № 5. – С. 106–111.

19. Третьякова Т.В., Третьяков М.П., Вильдеман В.Э. Оценка точности измерений с использованием видеосистемы анализа полей перемещений и деформаций // Вестник ПГТУ. Механика. – Пермь: Изд-во Перм. гос. техн. ун-та, 2011. – № 2. – С. 92–100.

20. Вильдеман В.Э., Ипатова А.В., Третьяков М.П., Третьякова Т.В. Механика закритического деформирования и нелокальность условий разрушения // Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского. – 2011. – № 4, ч. 5. С. 2063–2065.

21. Sutton M.A., J.-J. Ortu, H. Schreier. Image Correlation for Shape, Motion and Deformation Measurements // University of South Carolina. – Columbia, SC, USA, 2009. – 364 p.

## References

1. Zilova T.K., Fridman Ja.B. O mehanicheskikh ispytaniyah s peremennoj podatlivost'ju nagruzhenija [About mechanical tests with variable loading compliance]. *Zavodskaya laboratorija*, 1956. Vol. 22, no. 6, pp. 712–717.
2. Savickij F.S., Vandyshev B.A. Zhjostkost' ispytatel'nyh mashin i ee vlijanie na spadajuwij uchastok diagrammy rastjazhenija i izgiba [Stiffness of test machines and its influence on drop-down part of stress-strain and bending diagrams]. *Zavodskaya laboratorija*. 1956. Vol. 22, no. 6, pp. 717–721.
3. Fridman Ja.B. Ocenka opasnosti razrushenija mashinostroitel'nyh materialov [Damage risk estimation of engineering materials]. *Teoreticheskie osnovy konstruirovaniya mashin*. Moscow: Gos. nauchn.-teh. izd-vo mashinost. lit., 1957, pp. 257–281.
4. Fridman Ja.B. Mehanicheskie svojstva metallov. Ch.2. *Mehaničeskie ispytaniya. Konstrukcionnaja prochnost'*. [Mechanical tests. Structural strength] Moscow: Mashinostroenie, 1974. 368 p.
5. Zilova T.K., Petruhina N.I., Fridman Ja.B. O zakonomernostjakh kinetiki deformacii v zavisimosti ot podatlivosti nagruzhenija [About kinetics of deformation depending on loading compliance]. *Dokl. AN SSSR*, 1959. Vol. 124, No. 6. Pp. 1236–1239.
6. Drozdovskij B.A., Fridman Ja.B. Vlijanie trevin na mehanicheskie svojstva konstrukcionnyh stalej [Crack influence on mechanical properties of constructional steel]. Moscow: Metallurgizdat, 1960. 260 p.
7. Volkov S.D. Problema prochnosti i mehanika razrushenija [Problem of strength and fracture mechanics]. *Problemy prochnosti*. 1978, no. 7, pp. 3–10.
8. Lebedev A.A., Chausov N.G. Ustanovka dlja ispytaniya materialov s postroeniem polnost'ju ravnovesnyh diagramm deformirovaniya [System for material test with plotting of totally equilibrium deformation curves]. *Problemy prochnosti*. 1981, no. 12, pp. 104–106.
9. Vil'deman V.Je., Sokolkin Ju.V., Tashkinov A.A. Kraevaja zadacha mehaniki deformirovaniya i razrushenija povrezhdennyh tel s zonami razuprochnenija [Boundary-value problem of deformation and fracture mechanics for damaged bodies with strain-softening zones]. *PMTF*, 1995, no. 6, pp. 122–132.
10. Vil'deman V.Je., Sokolkin Ju.V., Tashkinov A.A. Mehanika neuprugogo deformirovaniya i razrushenija kompozicionnyh materialov [Me-

chanics of inelastic deformation and failure of composite materials]. pod red. Ju.V. Sokolkina. Moscow: Nauka, Fizmatlit, 1997, 288 p.

11. Vil'deman V.Je. O reshenijah uprugoplasticheskikh zadach s granichnymi uslovijami kontaktnogo tipa dlja tel s zonami razuprochnenija [On the solution of elastic-plastic problems with contact-type boundary conditions for solids with loss-of-strength zones]. *Prikladnaja matematika i mehanika*, 1998. Vol. 62, Js. 2, pp. 304–312.

12. Vil'deman V.Je. Mehanika zakriticheskogo deformirovanija i vo-prosy prochnostnogo analiza [Mechanics of postcritical deformation and questions of strength analysis]. International Journal for Computational Civil and Structural Engineering. *Mezhdunarodnyj zhurnal po raschetu grazhdanskih i stroitel'nyh konstrukcij*. 2008. Vol. 4, no. 2, pp. 43–44.

13. Lebedev A.A., Chausov N.G., Eveckij Ju.L. Metodika postroenija polnyh diagramm deformirovanija listovyh materialov [Method of constructing full strain diagrams of sheet materials]. *Problemy prochnosti*, 1986, no. 9, pp. 29–32.

14. Vil'deman V.Je., Chausov N.G. Uslovija deformacionnogo razuprochnenija materiala pri rastjazhenii obrazca special'noj konfiguracii [Conditions of strain softening of material on tensile specimen with special configuration]. *Zavodskaja laboratorija. Diagnostika materialov*. 2007, no. 10, pp. 55–59.

15. Vil'deman V.Je., Tret'jakova T.V., Lobanov D.S. Metodika jeksperimental'nogo issledovanija zakriticheskogo deformirovanija na obrazcah special'noj uslozhnennoj konfiguracii s primeneniem metoda korreljacii cifrovych izobrazhenij [Technique of experimental investigation of postcritical deformation on test samples with special complicated configuration by using digital image correlation]. *Vestnik Permskogo gosudarstvennogo tehničeskogo universiteta. Mehanika*, 2011, no. 4, pp. 15–28.

16. Vil'deman V.Je., Tret'jakov M.P., Tret'jakova T.V., Bul'bovich R.V., Slovikov S.V., Babushkin A.V., Il'inyh A.V., Lobanov D.S., Ipatova A.V. pod red. V.Je. Vil'demana. Jeksperimental'nye issledovanija svojstv materialov pri slozhnyh termomechanicheskikh vozdejstvijah [Experimental investigations of materials properties at combined thermo-mechanics influences]. Moscow: FIZMATLIT, 2012, 212 p.

17. Zujko V.Ju., Lobanov D.S., Anoshkin A.N. Metodiki opredelenija predela prochnosti polunaturalnyh obrazcov-panelej iz kompozicionnyh materialov pri staticheskikh ispytaniyah na rastjazhenie, szhatie i sdvig [Technique

of experimental determination ultimate strength composite materials sandwich-panel specimens of under static tests by tensile, compression and shear]. *Vestnik Permskogo nacional'nogo issledovatel'skogo politehnicheskogo universiteta. Mehanika*, 2012, no. 2.

18. Vil'deman V.Je., Sannikova T.V., Tret'jakov M.P. Jeksperimental'noe issledovanie zakonomernostej deformirovanija i razrushenija materialov pri ploskom naprjazhennom sostojanii [Experimental investigation of material deformation and fracture laws on plane stress state]. *Problemy mashinostroenija i nadezhnosti mashin*, 2010, no. 5, pp. 106–111.

19. Tret'jakova T.V., Tret'jakov M.P., Vil'deman V.Je. Ocenka tochnosti izmerenij s ispol'zovaniem videosistemy analiza polej peremewenij i deformatsij [Estimate of measurements accuracy by using video-system of displacement and strain fields analysis]. *Vestnik Permskogo gosudarstvennogo tehničeskogo universiteta. Mehanika*, 2011, no. 2, pp. 92–100.

20. Vil'deman V.Je., Ipatova A.V., Tret'jakov M.P., Tret'jakova T.V. Mehanika zakritičeskogo deformirovanija i nelokal'nost' uslovij razrushenija [Mechanics of postcritical deformation and no locality of damage conditions]. *Vestnik Nizhegorodskogo universiteta im. N.I.Lobachevskogo*, 2011, no. 4, part 5, pp. 2063–2065.

21. Sutton M.A., J.-J. Orteu, H. Schreier. Image Correlation for Shape, Motion and Deformation Measurements, *University of South Carolina, Columbia, SC, USA*, 2009. 364 p.

### Сведения об авторах

**Вильдеман Валерий Эрвинович** (Пермь, Россия) – директор Центра экспериментальной механики, профессор кафедры механики композиционных материалов и конструкций, доктор физико-математических наук, профессор Пермского национального исследовательского политехнического университета (614990, г. Пермь, Комсомольский пр., 29, e-mail: wildemann@pstu.ru).

**Третьякова Татьяна Викторовна** (Пермь, Россия) – инженер, младший научный сотрудник Центра экспериментальной механики Пермского национального исследовательского политехнического университета (614990, г. Пермь, Комсомольский пр., 29, e-mail: cem.tretyakova@gmail.com.).

**Лобанов Дмитрий Сергеевич** (Пермь, Россия) – инженер, младший научный сотрудник Центра экспериментальной механики

Пермского национального исследовательского политехнического университета (614990, г. Пермь, Комсомольский пр., 29, e-mail: cem\_lobanov@mail.ru).

### **About the authors**

**Vildeman Valery Ervinovich** (Perm, Russian Federation) – Director of The Center of Experimental Mechanics, Professor of Department of Mechanics of Composite Materials and Structures, Perm National Research Polytechnic University, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor Perm National Research Polytechnic University (614990 Perm, Russian Federation, 29, Komsomolsky av., e-mail: wildemann@pstu.ru).

**Tretyakova Tatiana Victorovna** (Perm, Russian Federation) – Junior Scientific Associate and Engineer of the Center of Experimental Mechanics of Perm National Research Polytechnic University (614990 Perm, Russian Federation, 29, Komsomolsky av., e-mail: cem.tretyakova@gmail.com).

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

Получено 15.05.2012