

УДК 620.17

Т.В. Третьякова, Е.М. Спаскова

Пермский национальный исследовательский политехнический университет,
Пермь, Россия

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРЕДЕЛЬНЫХ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННЫХ СОСТОЯНИЙ КВАЗИХРУПКОГО МАТЕРИАЛА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДА КОРРЕЛЯЦИИ ЦИФРОВЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ

Рассмотрено получение экспериментальных данных (совокупность значений компонент тензора деформаций, соответствующих напряженно-деформированному состоянию в точке максимальной концентрации деформаций для пластин с проточкой различной ориентации), необходимых для построения критериев прочности, с помощью бесконтактной трехмерной цифровой оптической системы и метода корреляции цифровых изображений, экспериментальное исследование предельного напряженно-деформированного состояния квазихрупкого материала, а именно оргстекла, предшествующего разрушению.

Исследована эволюция неоднородных полей деформаций в телах с концентраторами, проведен анализ конфигурации неоднородных полей деформаций в образцах с концентраторами. В работе автором осуществлена регистрация продольной и поперечной деформации с использованием дополнительного модуля программного обеспечения видеосистемы «виртуальный экстензометр», отражены основные преимущества «виртуального экстензометра».

Показана высокая эффективность применения цифровой оптической системы для изучения напряженно-деформированного состояния квазихрупкого материала, математический аппарат данной системы основан на методе корреляции цифровых изображений.

Ключевые слова: экспериментальная механика, метод корреляции цифровых изображений, концентрация напряжений, критерий прочности, напряженно-деформированное состояние, органическое стекло.

T.V. Tretyakova, E.M. Spaskova

Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation

**EXPERIMENTAL STUDY OF LIMIT STRESS-STRAIN
STATE QUASI-BRITTLE MATERIAL USING CORRELATION
TECHNIQUES DIGITAL IMAGES**

Receiving experimental data (set of values a component of a tensor of deformations corresponding intense to the deformed condition in a point of the maximum concentration of deformations for plates with a pro-point of various orientation), criteria of durability necessary for creation, by means of contactless three-dimensional digital optical system and a method of correlation of digital images, a pilot study of the limit intense deformed condition of a quasifragile material, namely the plexiglas, previous destruction is considered.

Evolution of non-uniform fields of deformations in bodies with concentrators is investigated, the analysis of a configuration of non-uniform fields of deformations in samples with concentrators is carried out. In this paper the author is registered are the longitudinal and transverse strain using the optional software video "virtual extensometer", a reflection of the main advantages of "virtual extensometer."

The high efficiency of digital optical system to study the stress-strain state of the material quasi-brittle the mathematical apparatus of the system is based on digital image correlation method.

Keywords: experimental mechanics, digital image correlation method, the stress concentration, strength criterion, the stress-strain state, organic glass.

В области механики деформируемого твердого тела одной из актуальных задач является исследование влияния различных типов концентраторов напряжений на поведение элементов конструкций при проектировании и отработке прочности конструкций. Построение критериев прочности требует определения значений констант материала по результатам испытаний при различных видах напряженно-деформированных состояний, реализуемых с использованием специальных нагружающих систем. Возможно также применение расчетно-экспериментальных методик определения предельных напряженно-деформированных состояний в окрестности концентраторов напряжений [1]. Для анализа напряженно-деформированного состояния деформируемых элементов машин и конструкций широко применяются оптические методы, такие как поляризационно-оптические методы, геометрический и интерференционный муар, голографическая и лазерная спекл-интерферометрия, теневой оптический метод каустик, а также метод корреляции цифровых изображений (КЦИ) [2]. На основе использования метода КЦИ возможен анализ образцов с различной геометрией

концентраторов, в которых реализуются сложные напряженно-деформированные состояния материала в условиях одноосного нагружения, при этом проведение подобных экспериментов не требует применения специальных испытательных машин.

В данной работе рассмотрено применение бесконтактной трехмерной цифровой оптической системы Vic-3D с целью получения экспериментальных данных для построения критериев прочности, изучение предельного напряженно-деформированного состояния материала [3–5], предшествующее разрушению, в точке возникновения трещины [6, 7], исследования эволюции неоднородных полей деформаций в телах с концентраторами [8–10]. Математический аппарат видеосистемы основан на методе КЦИ. Цифровая оптическая система Vic-3D предназначена для определения полей перемещений и деформаций на поверхности плоских и цилиндрических образцов, в области концентраторов различной геометрии, а также на элементах реальных конструкций. Вопросы использования цифровой оптической системы Vic-3D рассмотрены в работах [11–16].

В качестве материала исследования выбрано органическое стекло (ТУ 2216-001-81057157–2010). Механические характеристики (модуль Юнга и коэффициент Пуассона) определялись на стандартных образцах в форме двухсторонних лопаток (ГОСТ 11262–80, ширина рабочей части 11,4 мм, длина рабочей части 63 мм, толщина 2,9 мм) в испытаниях на одноосное растяжение при постоянной скорости кинематического нагружения 1 мм/мин. Испытания проводились на универсальной электромеханической испытательной системе Instron 5882. Регистрация продольной и поперечной деформации осуществлялась с использованием дополнительного модуля программного обеспечения видеосистемы «виртуальный экстензометр». Принцип его действия аналогичен навесному экстензометру и заключается в отслеживании взаимного смещения между двумя точками на поверхности образцов в соответствии с прикладываемым усилием. Основными преимуществами использования «виртуального экстензометра» являются: бесконтактная регистрация деформаций, благодаря чему исключается механическое воздействие на поверхность образца; возможность использования нескольких экстензометров на одном образце, что, в свою очередь, повышает точность регистрируемых данных. На рис. 1 представлен обра-

зец, на котором «установлены» 3 продольных и 3 поперечных «виртуальных экстензометра».

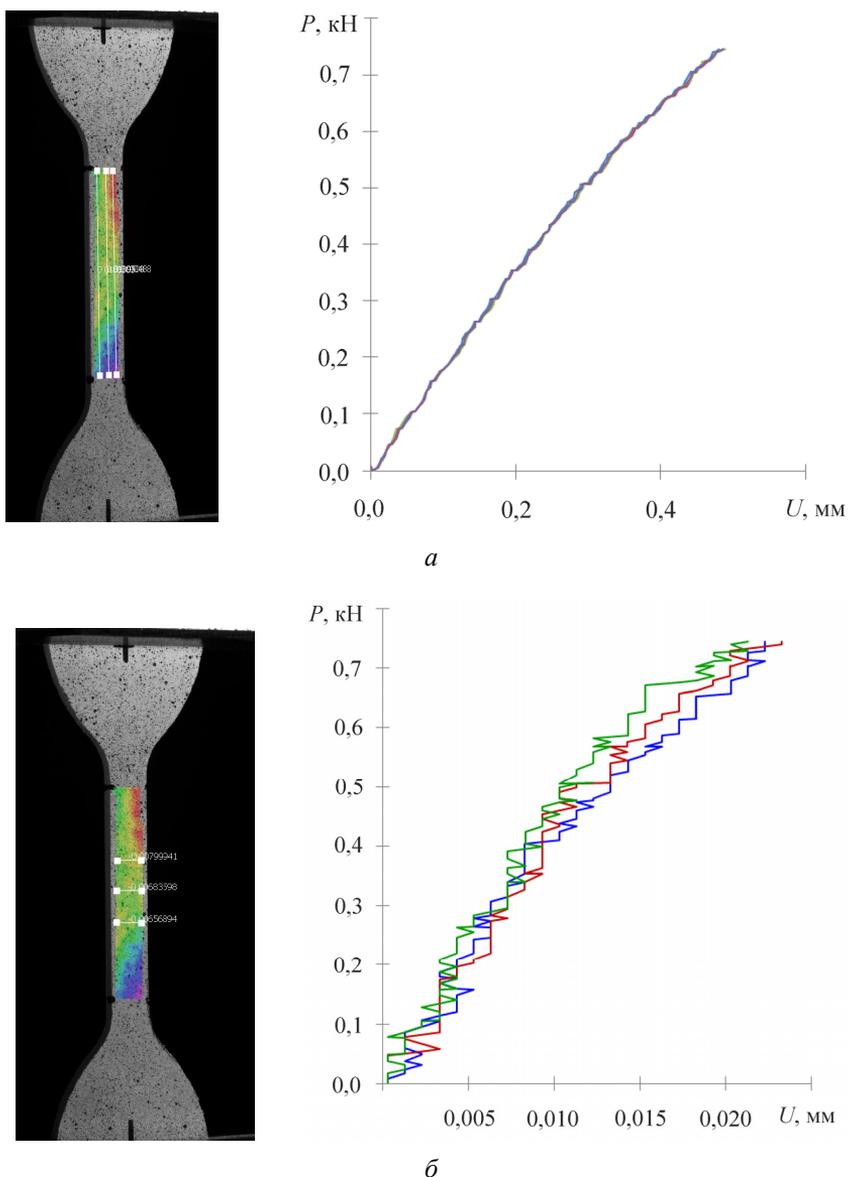


Рис. 1. Регистрация продольной (а) и поперечной деформации (б) в процессе нагружения с использованием дополнительного модуля программного обеспечения оптической системы «виртуальный экстензометр»

По результатам испытаний образцов органического стекла получены следующие механические характеристики: модуль Юнга 3,01 ГПа и коэффициент Пуассона 0,36.

Экспериментальное исследование предельных напряженно-деформированных состояний квазихрупкого материала проводилось на плоских образцах в форме пластин (ширина и длина рабочей части 50 мм, толщина 2,9 мм) с проточками длиной 20 мм и различной ориентации 0, 15, 45, 60, 90°. Механические испытания на одноосное растяжение также проводились на испытательной системе Instron 5882 со скоростью удлинения 1,0 мм/мин, совместно с использованием цифровой оптической системы Vic-3D (рис. 2).

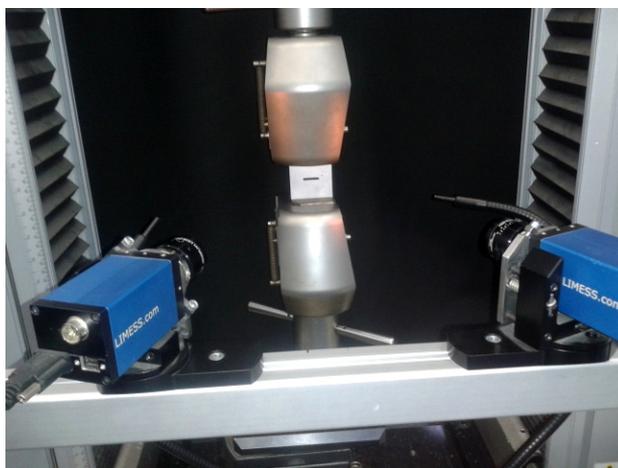


Рис. 2. Испытание на одноосное растяжение пластины с проточкой с регистрацией полей деформаций

В результате проведения испытаний на растяжение пластин построены поля поперечной, продольной, сдвиговой деформаций (ϵ_{xx} , ϵ_{yy} , ϵ_{xy}), а также интенсивности деформаций (ϵ_i). В качестве примера на рис. 3 представлены неоднородные поля деформаций при максимальном уровне нагрузки 3,731 кН перед разрушением материала на поверхности пластины, в которой угол наклона проточки составляет 45° с осью нагружения.

Ниже представлены поля интенсивности деформаций (ϵ_i) для пластин с проточками различной ориентации 0, 15, 60, 90° (рис. 4).

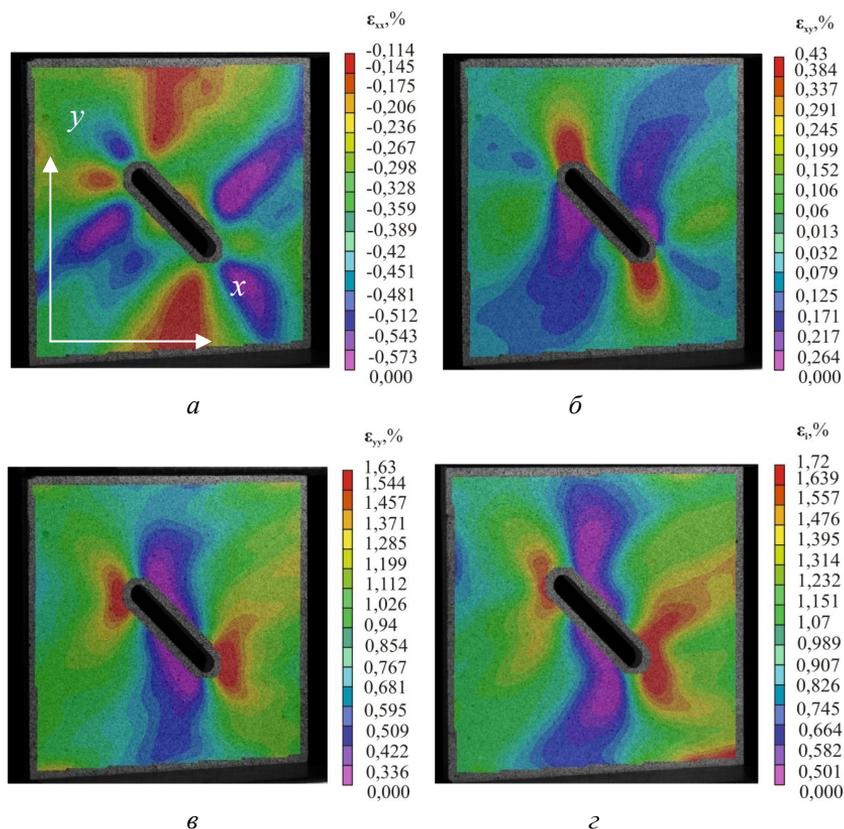


Рис. 3. Поля поперечных ϵ_{xx} (а), сдвиговых ϵ_{xy} (б); продольных деформаций ϵ_{yy} (в) и интенсивности деформаций ϵ_i (г) на поверхности пластины ($\alpha=45^\circ$) при нагрузке 3,731 кН (см. также с. 191)

В ряде случаев разрушение пластин происходило в два этапа, сначала с одной стороны концентратора, что сопровождалось резким спадом уровня нагрузки порядка 50 %. При дальнейшем нагружении происходило незначительное увеличение значения нагрузки и полное разрушение пластины. Представляется интересным анализ конфигурации неоднородных полей деформаций в образцах для вышеуказанного случая. В качестве примера на рис. 5–6 представлены результаты для пластины с $\alpha=60^\circ$. На диаграмме нагружения (см. рис. 5) отмечены точки 1–3, для которых приведены поля деформаций при соответствующих напряженно-деформированных состояниях (см. рис. 6).

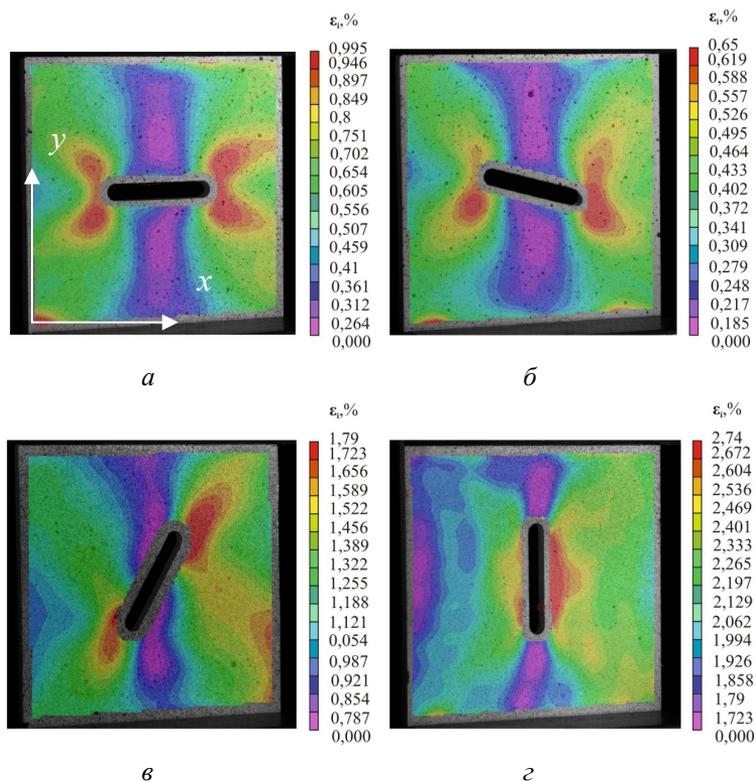


Рис. 4. Поля интенсивности деформаций ϵ_i на поверхности пластин, ось выреза составляла со стороной пластины 0° (*a*), 15° (*б*), 60° (*в*), 90° (*г*)

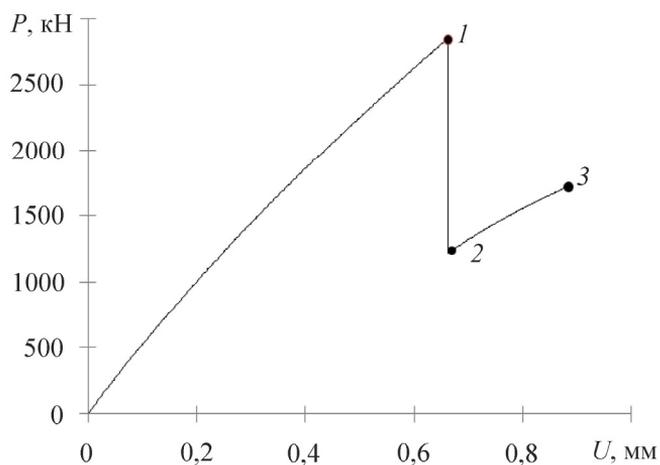


Рис. 5. Диаграмма нагружения для образца, где ось выреза составляла со стороной пластины 60°

В точке 1 (рис. 5) уровень нагрузки достигает значения 2,837кН, после чего происходит разрушение части пластины (рис. 6, б), при этом наблюдается резкое падение действующей нагрузки с 2,837 до 1,243 кН. Точка 3 (см. рис. 5) соответствует предельному состоянию пластины с трещиной (рис. 6, в) при нагрузке 1,713 кН. Фотография разрушенного образца приведена на рис. 6, г.

В результате экспериментов была получена совокупность значений компонент тензора деформаций. В таблице приведены данные значения ε_{xx} , ε_{yy} , ε_{xy} , соответствующие напряженно-деформированному состоянию в точке максимальной концентрации деформаций для пластин с проточкой различной ориентации.

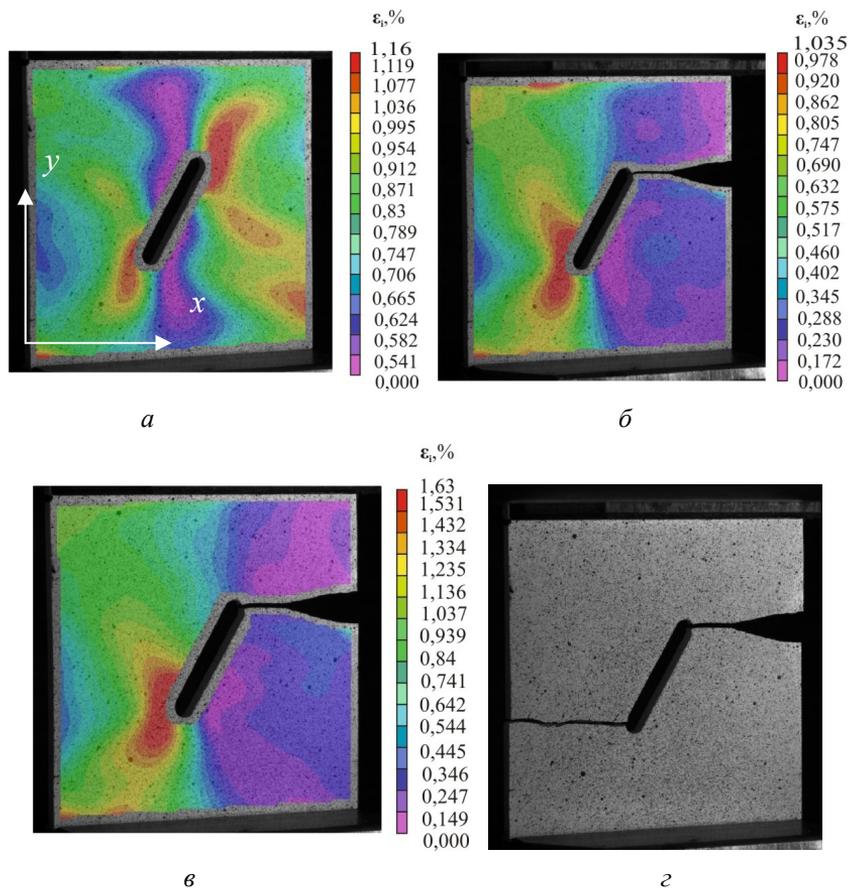


Рис. 6. Поля интенсивности деформаций ε_i на поверхности образца, где ось выреза составила со стороной пластины 60° при нагрузке $P_1 = 2,837$ кН (а); $P_2 = 1,243$ кН (б); $P_3 = 1,713$ кН (в); фото разрушенного образца (г)

Значения компонент деформаций для пластин
с проточкой различной ориентации

Номер образца	Угол α	ϵ_{xx} , %	ϵ_{yy} , %	ϵ_{xy} , %
1	90°	-1,404	2,046	0,155
2	90°	-1,053	3,0	-0,099
3	60°	-0,159	1,893	0,159
4	60°	-0,419	1,698	0,106
5	45°	-0,417	1,584	0,116
6	45°	-0,357	1,916	-0,291
7	15°	-0,843	2,998	-0,065
8	15°	-0,157	2,394	-0,205
9	0°	-0,173	0,625	0,39

Далее необходимо перейти к компонентам тензора напряжений и в дальнейшем использовать полученные экспериментальные данные для проверки того или иного критерия прочности для исследуемого материала и определения соответствующих констант, входящих в состав критерия. В этом случае видеосистема позволяет обойтись без сложных испытательных систем, достаточно проведения испытания на одноосное растяжение образцов с концентраторами. Полученные результаты можно использовать для построения поверхности прочности.

Таким образом, на основе использования цифровой оптической системы Vis-3D возможен анализ образцов с различной геометрией концентраторов, в которых реализуются сложные напряженно-деформированные состояния материала. Кроме того, видеосистема обладает дополнительным преимуществом, так как позволяет зафиксировать эволюцию полей деформаций, оценить характер неоднородности полей, отследить процессы деформирования материала, протекающие на поверхности образца, а дополнительный модуль программного обеспечения видеосистемы «виртуальный экстензометр» может быть использован при определении механических характеристик материала.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 13-08-00304 а), а также в рамках исполнения государственного задания Министерства образования и науки РФ высшим учебным заведениям (шифр проекта 1.3166.2011).

Библиографический список

1. Кургузов В.Д., Демешкин А.Г., Корнев В.М., Зарождение трещин в окрестности концентраторов напряжений в квазихрупких материалах // Тез. IV Рос. науч.-техн. конф., г. Екатеринбург, 26–28 мая 2009 г. – Екатеринбург, 2009. – С. 94.
2. Кобаяси А. Экспериментальная механика. Кн. 1. – М.: Мир, 1990. – 616 с.
3. Колосов Г.В. Применение комплексной переменной к теории упругости. – М.: ОНТИ, 1935. – 227 с.
4. Лурье А.И. Концентрации напряжений в области отверстия на поверхности кругового цилиндра // ПММ. – 1946. – Т. 10. – № 3. – С. 397–406.
5. Бухаринов Г.Н. Пластинка, ослабленная круговыми отверстиями // Материалы конференции по оптическому методу изучения напряжений. – М.: ОНТИ, 1937. – С. 114–122.
6. Мусхелишвили Н.И. Некоторые основные задачи математической теории упругости. – М.: Наука, 1966. – 1016 с.
7. Нейбер Г. Концентрации напряжений. – М.; Л.: ОГИЗ, 1968. – 888 с.
8. Савин Г.Н. Распределения напряжений около отверстий. – Киев: Наук. думка, 1968. – 891 с.
9. Фильштинский Л.А. Напряжения и смещения в упругой плоскости, ослабленной двоякопериодической системой отверстий // ПММ. – 1964. – № 3. – С. 430–441.
10. Koiter W.T. Stress distribution in an infinite elastic sheet with a double-periodic set of equal holes. Boundary problems of different equation. – Madison: Univ. Wisconsin Press, 1940. – P. 191–213.
11. 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.
12. Третьякова Т.В., Третьяков М.П., Вильдеман В.Э. Оценка точности измерений с использованием видеосистемы анализа полей перемещений и деформаций // Вестник Перм. гос. техн. ун-та. Механика. – 2011. – № 2. – С. 92–100.
13. 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 Перм. гос. техн. ун-та. Механика. – 2011. – № 4. – С. 15–28.

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

15. Третьякова Т.В., Вильдеман В.Э. Экспериментальное исследование механизмов развития трещин при сложных режимах нагружения методом корреляции цифровых изображений // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 2012. – Т. 78, № 6. – С. 54–58.

16. Tretiakova T.V., Vildeman V.E. Relay-race deformation mechanism during uniaxial tension of cylindrical samples of carbon steel: using digital image correlation technique // Fracture and Structural Integrity. – 2013. – No. 24. – P. 1–6. Doi: 10.3221/IGF-ESIS.24.01.

References

1. Kurguzov V.D., Demeshkin A.G., Kornev V.M., Zarozhdenie treshhin v okrestnosti kontsentratorov napryazhenij v kvazikhрупких materialakh [Nucleation of cracks in the vicinity of stress concentrators in quasi-brittle materials]. *Tezisy IV Rossijskoj nauchno-tekhnicheskoy konferentsii*. Ekaterinburg, 26-28 maya 2009. 94 p.

2. Kobayasi A. Eksperimental'naya mekhanika [Experimental mechanics]. Moscow: Mir, 1990, 616 p.

3. Kolosov G.V. Primenenie kompleksnoj peremennoj k teorii uprugosti [The use of a complex variable to the theory of elasticity]. Moscow: ONTI, 1935, 227 p.

4. Lur'e A.I. Kontsentratsii napryazhenij v oblasti otverstiya na poverkhnosti krugovogo tsilindra [Stress concentration in the area of the holes on the surface of a circular cylinder]. *PMM*, 1946, vol. 10, no. 3, pp. 397-406.

5. Bukharinov G.N. Plastinka, oslablennaya krugovymi otverstiyami [Plate, weakened by a circular hole]. *Materialy konferentsii po opticheskomu metodu izucheniya napryazhenij*. Moscow: ONTI, 1937, pp. 114-122.

6. Muskhelishvili N.I. Nekotorye osnovnye zadachi matematicheskoy teorii uprugosti [Some basic problems of the mathematical theory of elasticity]. Moscow: Nauka, 1966, 1016 p.

7. Nejber G. Kontsentratsii napryazhenij [Stress concentration]. Moscow; Leningrad: OGIZ, 1968, 888 p.

8. Savin G.N. Raspredeleniya napryazhenij okolo otverstij [Stress distribution around the holes]. Kiev: Naukova dumka, 1968, 891 p.

9. Fil'shtinskij L.A. Napryazheniya i smeshheniya v uprugoj ploskosti, oslablennoj dvoyakoperiodicheskoj sistemoj otverstij [Stresses and displacements in an elastic plane weakened by a doubly periodic system of holes]. *PMM*, 1964, no. 3. pp. 430–441.

10. Koiter W.T. Stress distribution in an infinite elastic sheet with a double-periodic set of equal holes. Boundary problems of different equation. Madison: Univ. Wisconsin Press, 1940, pp. 191-213.

11. Vil'deman V.Je., Sannikova T.V., Tret'yakov M.P. Eksperimental'noe issledovanie zakonomernostej deformirovaniya i razrusheniya materialov pri ploskom napryazhennom sostoyanii [Experimental studies of deformation and fracture of materials under plane stress]. *Problemy mashinostroeniya i nadezhnosti mashin*, 2010, no. 5, pp. 106-111.

12. Tret'yakova T.V., Tret'yakov M.P., Vil'deman V.Je. Otsenka tochnosti izmerenij s ispol'zovaniem videosistemy analiza polej peremeshhenij i deformatsij [Assessment of the accuracy of measurements using video analysis fields of displacements and deformations]. *Vestnik Permskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Mehanika*, 2011, no. 2. pp. 92-100.

13. Vil'deman V.Je., Tret'yakova T.V., Lobanov D.S. Metodika eksperimental'nogo issledovaniya zakriticheskogo deformirovaniya na obraztsakh spetsial'noj uslozhnennoj konfiguratsii s primeneniem metoda korrelyatsii tsifrovyykh izobrazhenij [Methods of experimental study of supercritical strain on samples of special complicated configuration using digital image correlation method]. *Vestnik Permskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Mehanika*, 2011, no. 4, pp. 15-28.

14. Vil'deman V.Je., Ipatova A.V., Tret'yakov M.P., Tret'yakova T.V. Mehanika zakriticheskogo deformirovaniya i nelokal'nost' uslovij razrusheniya [Mechanics of supercritical conditions of deformation and destruction of non-locality]. *Vestnik Nizhegorodskogo universiteta imeni N.I. Lobachevskogo*, 2011, no. 4, iss. 5. pp. 2063-2065.

15. Tret'yakova T.V., Vil'deman V.Je. Eksperimental'noe issledovanie mekhanizmov razvitiya treshhin pri slozhnykh rezhimakh nagruzheniya metodom korrelyatsii tsifrovyykh izobrazhenij [Experimental study of the mechanisms of development of cracks in complex loading conditions using

digital image correlation]. *Zavodskaya laboratoriya. Diagnostika materialov*, 2012, vol. 78, no. 6, pp. 54-58.

16. Tretiakova T.V., Vildeman V.E. Relay-race deformation mechanism during uniaxial tension of cylindrical samples of carbon steel: using digital image correlation technique. *Fracture and Structural Integrity*, 2013, no. 24, pp. 1-6. Doi: 10.3221/IGF-ESIS.24.01.

Сведения об авторах

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.).

Спаскова Елена Михайловна (Пермь, Россия) – студентка кафедры механики композиционных материалов и конструкций Пермского национального исследовательского политехнического университета (614990, г. Пермь, Комсомольский пр., 29, e-mail: cem.spaskova@mail.ru).

About the authors

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

Spaskova Elena Mikhailovna (Perm, Russian Federation) – a student of Department of Mechanics of Composite Materials and structures, Perm National Research Polytechnic University (29, Komsomolsky av., 614990, Perm, Russian Federation, e-mail: cem.spaskova@mail.ru).

Получено 24.04.2013