

УДК 620.172

**П.С. Бажуков, В.Э. Вильдеман, А.В. Ильиных, М.П. Третьяков**Пермский национальный исследовательский политехнический университет,  
Пермь, Россия**ВЛИЯНИЕ ЖЕСТКОСТИ НАГРУЖАЮЩЕЙ СИСТЕМЫ  
НА РАВНОВЕСНЫЙ РОСТ ТРЕЩИН  
ПРИ КВАЗИСТАТИЧЕСКОМ НАГРУЖЕНИИ**

Рассматриваются вопросы экспериментального изучения поведения алюминиевого сплава Д16Т в зависимости от режимов нагружения и жесткости нагружающей системы. Показаны особенности роста трещины при кинематическом и силовом нагружении. Производилось одноосное нагружение плоских образцов с предварительно пророщенной усталостной трещиной и разной длиной рабочей части. Приведены диаграммы деформирования. Испытания выполнены на сервогидравлической испытательной машине Instron 8850, определены условный предел текучести и предел прочности для исследуемого материала. Для замера длины трещины использовался цифровой микроскоп Dino-Lite Digital Microscope AM4013MTL Series. Показано существенное влияние жесткости нагружающей системы на механическое поведение алюминиевого сплава Д16Т при квазистатическом нагружении.

**Ключевые слова:** одноосное растяжение, плоские образцы с центральным надрезом, жесткость нагружающей системы, силовое и кинематическое нагружения.

**P.S. Bazhukov, V.E. Vildeman, A.V. Ilinykh, M.P. Tretyakov**

Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation

**EFFECT OF STIFFNESS LOADING SYSTEM  
ON THE EQUILIBRIUM OF THE CRACK GROWTH  
UNDER QUASI-STATIC LOADING**

The problems of the experimental study of the behavior of aluminum alloy D16T, depending on the mode of loading and stiffness of the loading system. The features of the crack growth in the kinematic and force loading. Produced uniaxial loading of flat samples with pre-germinated fatigue crack and different length of the working part. Shows stress-strain diagram. Tests performed on the servohydraulic testing machine Instron 8850, identifies yield strength and ultimate strength of the material. To measure the crack length was used Digital Microscope Dino-Lite Digital Microscope AM4013MTL Series. A significant effect of the rigidity of the loading system on the mechanical behavior of an aluminum alloy D16T under quasi-static loading.

**Keywords:** uniaxial stretching, flat samples with a central notch, toughness of loading system, the force and kinematic loading.

Для обеспечения живучести конструкций необходимо исследование закономерностей роста дефектов в них, в частности трещин. Экспериментальные исследования характеристик роста трещин в твердых телах связаны с рядом технических трудностей. Важные методологические особенности экспериментальной механики разрушения твердых тел отражены, в частности, в работах [1–4]. Важным представляется изучение влияния различных факторов на характер роста трещин, в частности на условия перехода от равновесного роста дефекта к динамическому разрушению. В данной работе рассматривается влияние режимов нагружения и нагружающей системы на равновесный рост трещин. Важность понятия «нагружающая система» с точки зрения исследования процессов деформирования и разрушения была отмечена в [5, 6]. При этом в ряде работ отмечена ключевая роль нагружающей системы в переходе от стадии равновесного накопления повреждений к неравновесной, лавинообразной стадии [7–10].

Сопротивление разрушению на закритической стадии деформирования, соответствующей ниспадающей ветви диаграммы деформирования, зависит от жесткости нагружающей системы [11]. Процессы структурного разрушения и трещинообразования отражаются на диаграмме деформирования, приводя к ее нелинейности, а на заключительной стадии являются причиной разупрочнения [12, 13].

Экспериментальные исследования зависимости предельных состояний от жесткости нагружающей системы, а также экспериментальные данные о механизмах развития трещин в частности, описаны в [14].

### **1. Особенности роста трещины при кинематическом и силовом нагружениях**

Для проведения испытаний по исследованию особенностей роста трещин выбран тип образцов в соответствии с ГОСТ 25.506–85 «Методы механических испытаний металлов. Определение характеристик трещиностойкости (вязкости разрушения) при статическом нагружении». Эскиз образца представлен на рис. 1.

Необходимо отметить, что для дальнейших испытаний длина рабочей части образца менялась. В испытаниях использовались образцы с рабочей частью 50, 100, 150, 200 и 300 мм и, как следствие, менялась общая длина образца 130, 180, 230, 280 и 380 мм. Два отверстия диаметром 4 мм созданы в образцах с целью крепления навесных призм, на которые ставится датчик раскрытия трещины. Для определения

стартовой нагрузки при прорастивании исходной усталостной трещины проведены испытания образцов на растяжение в соответствии с ГОСТ 1497–84 «Металлы. Методы испытаний на растяжения».

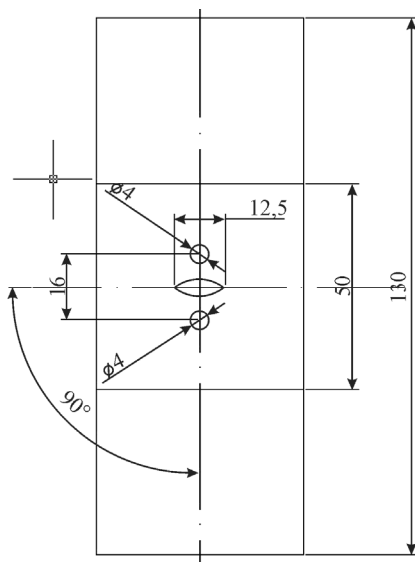


Рис. 1. Образец для испытаний на трещиностойкость с длиной рабочей части 50 мм

Испытания проведены на электромеханической системе INSTRON 5882. Эскиз образцов на растяжение представлен на рис. 2.

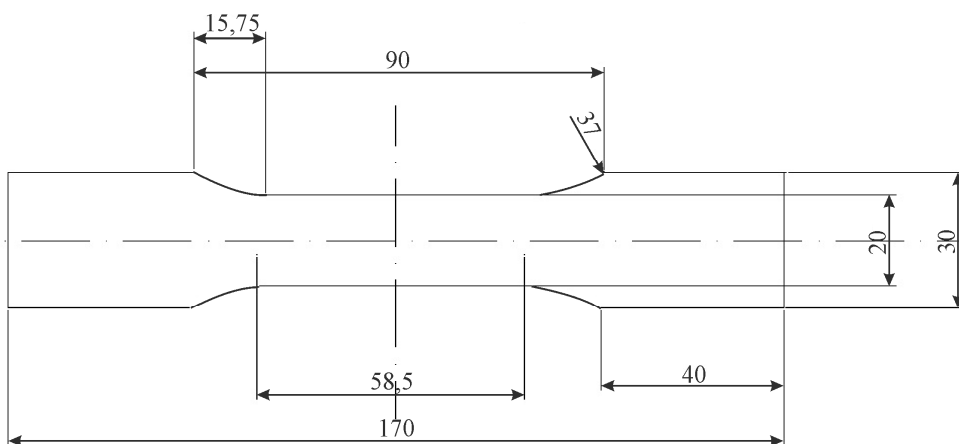


Рис. 2. Образец для испытаний на растяжение

Диаграмма деформирования представлена на рис. 3, где  $\varepsilon$  – деформация, определенная с использованием навесного экстензометра INSTRON 2620-603.

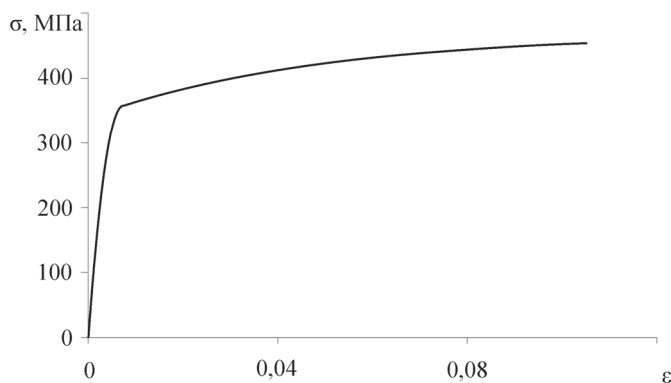


Рис. 3. Диаграмма деформирования при испытании плоских образцов

В результате испытаний определены условный предел текучести и предел прочности для исследуемого материала: 393 МПа и 453 МПа соответственно. Половина условного предела текучести в соответствии с ГОСТ 25.506–85 определяет нагрузку для инициации роста исходной усталостной трещины. Прорастивание трещины делилось на три этапа, при переменном растяжении с коэффициентом асимметрии цикла  $R = 0,1$ . С каждым этапом коэффициент интенсивности напряжений уменьшался. Результаты испытаний серии с рабочей частью 100 мм приведены в таблице, где  $2l_0$  – общая длина трещины,  $l_{0R}$ ,  $l_{0L}$  – длины трещин с каждой стороны от концентратора.

Пророщенные трещины соответствуют требованиям ГОСТ 25.506–85 и ASTM E647-05. Standard Test Method for Measurement of Fatigue Crack Growth Rates. В ГОСТе требования регламентируются следующим образом: разница между трещинами с одной и с другой стороны образца не более 10 % от длины наименьшей трещины. ASTM устанавливает следующие требования: измерения проводятся по осевой линии образца для двух трещин (для каждой трещины используется среднее по замерам с передней и с задней поверхности), и они не должны отличаться более чем на  $0,025 W$ , где  $W = 50$  мм, ширина образца. В соответствии со стандартами были замерены и углы отклонения усталостной трещины от осевой линии, линии симметрии образца, По требованиям ГОСТа угол не должен превышать  $10^\circ$  от горизон-

тальной линии симметрии образца, а по требованиям ASTM не более  $20^\circ$  на длине трещины  $0,001 W$ .

Результаты испытаний серии с рабочей частью 100 мм  
по проращиванию трещины

Номер образца	$2l_0$ , мм	$l_{0R}$ , мм	$l_{0L}$ , мм	$ l_{0R} - l_{0L} $ , мм	Допустимое значение $ l_{0R} - l_{0L} $ по ГОСТу	Допустимое значение $ l_{0R} - l_{0L} $ по ASTM
1 100	23,734	11,658	12,076	0,418	1,1658	1,25
2 100	20,259	10,142	10,117	0,025	1,0117	1,25
3 100	20,255	10,147	10,108	0,039	1,0108	1,25
4 100	19,695	9,524	10,171	0,647	0,9524	1,25
5 100	21,588	10,912	10,676	0,236	1,0676	1,25
6 100	20,824	10,119	10,705	0,586	1,0119	1,25
7 100	19,518	9,832	9,686	0,146	0,9686	1,25
8 100	19,201	9,751	9,45	0,301	0,9450	1,25

Измерения производились и для образцов других серий. Замер длины трещины производился с использованием цифрового микроскопа Dino-Lite Digital Microscope AM4013MTL Series, который имеет функцию съемки при увеличении. Для съемки производилась калибровка микроскопа. Снимок образца приведен на рис. 4.



Рис. 4. Исходная усталостная трещина образцов с длиной рабочей части 100 мм

После калибровки микроскопа производилось оптическое определение границ трещины, затем строился отрезок для определения длины трещины.

## 2. Результаты экспериментов

Испытания проведены на двухосевой сервогидравлической испытательной системе INSTRON 8850. Для задания программы испытаний использовалось программное обеспечение WaveMatrix. Задавалась программа одноосного растяжения. В зависимости от длины рабочей зоны скорость нагружения изменялась и составила для серии 100 мм 0,1 мм/мин; для серии 50 мм 0,05 мм/мин. Регистрация удлинений на поверхности рабочей части образцов осуществлялась с помощью датчика раскрытия трещины INSTRON 2670-122, который закреплялся на образце с помощью навесных призм. Установленный в испытательной машине образец с закрепленным экстензометром представлен на рис. 5.

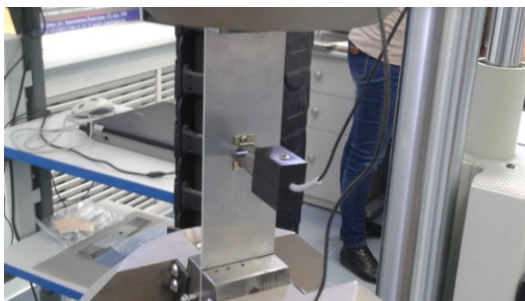


Рис. 5. Образец, установленный в захватах, и закрепленный на нем экстензометр

В результате экспериментов получены диаграммы при силовом и кинематическом нагружении, которые представлены на рис. 6–9. Здесь  $v$  – смещение берегов надрезов образца на основании показаний экстензометра.

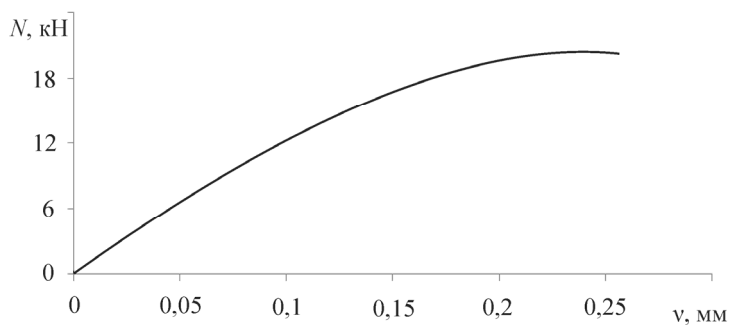


Рис. 6. Диаграмма силового нагружения образца с длиной рабочей части 100 мм

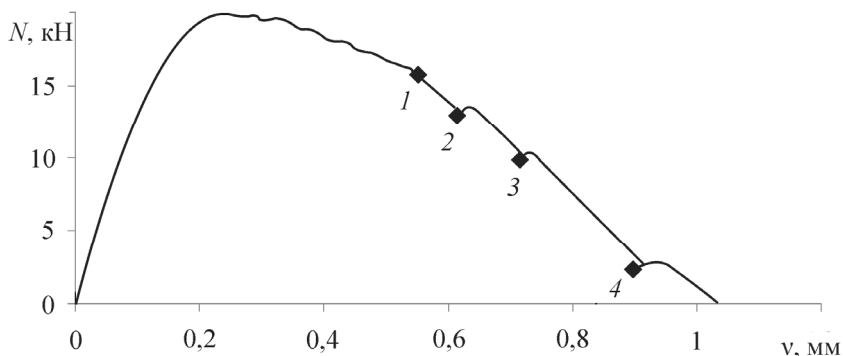


Рис. 7. Диаграмма кинематического нагружения образца с длиной рабочей части 100 мм

Как видно из рис. 6, 7, при кинематическом нагружении удастся построить более полную диаграмму деформирования, чем при силовом, однако на ней находятся срывы, резкие и неконтролируемые падения нагрузки на определенное значение. Заметим, что нагрузка в этот момент линейно зависит от перемещения. На рис. 7 они видны при нагрузке, равной 16 кН, которой соответствует точка 1 на диаграмме, 13, 11 и 3 кН – это соответственно точки 2, 3 и 4. После срывов происходило накопление энергии для дальнейшего роста трещины. Когда необходимая энергия накапливалась, трещина прорастала на определенное значение, что повторялось несколько раз вплоть до разрушения образца

Диаграмма на рис. 6 обрывается в наивысшей точке при нулевой жесткости нагружающей системы, то есть при «мягком» (силовом) нагружении [11]. Каждая точка на ниспадающей ветви может соответствовать моменту потери несущей способности в зависимости от условий нагружения. Потеря несущей способности представляет собой переход от стабильной к неравновесной стадии процесса структурного разрушения на закритической стадии.

С целью получения результатов для сравнения с образцами с длиной рабочей части 100 мм силовому и кинематическому нагружению подверглись два образца с длиной рабочей части 50 мм.

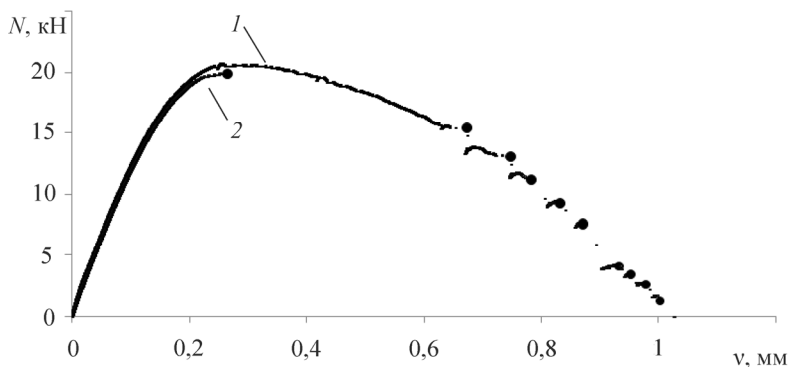


Рис. 8. Диаграммы растяжения: 1 – диаграмма кинематического нагружения образца с длиной рабочей части 50 мм; 2 – диаграмма силового нагружения образца с длиной рабочей части 50 мм

Точками на диаграмме отмечены моменты, связанные с переходом к динамическому разрушению. Как видно из рис. 8, для образцов с длиной рабочей части 50 мм первый срыв на диаграмме происходит несколько позднее, число срывов гораздо выше, а падение нагрузки при этом значительно меньшее по сравнению с образцом с длиной рабочей части 100 мм.

### 3. Влияние жесткости нагружающей системы на равновесный характер роста трещины

Как уже говорилось, для проведения испытаний по исследованию влияния жесткости нагружающей системы выбраны различные длины рабочей части (см. рис. 9). В зависимости от длины рабочей части образца скорость нагружения меняется и составляет для базы 100 мм 0,1 мм/мин; для базы 50 мм 0,05 мм/мин; для базы 150 мм 0,15 мм/мин; для базы 200 мм 0,2 мм/мин; для базы 300 мм 0,3 мм/мин.

Каждая из 5 диаграмм строилась до тех пор, пока шел равновесный рост трещины. Кривые 2–5 приведены со смещением равным 0,4 мм. Следует отметить, и это видно по рис. 9, что чем больше длина рабочей части образца, тем раньше происходит обрыв диаграммы, в этой точке заканчивается равновесный рост трещины.

Точками на диаграмме (рис. 10) показаны моменты завершения равновесного роста трещины, соответствующие конечным точкам диаграмм на рис. 9. На графиках видно, что чем больше длина рабочей части, тем раньше происходит прекращение равновесного роста трещины.



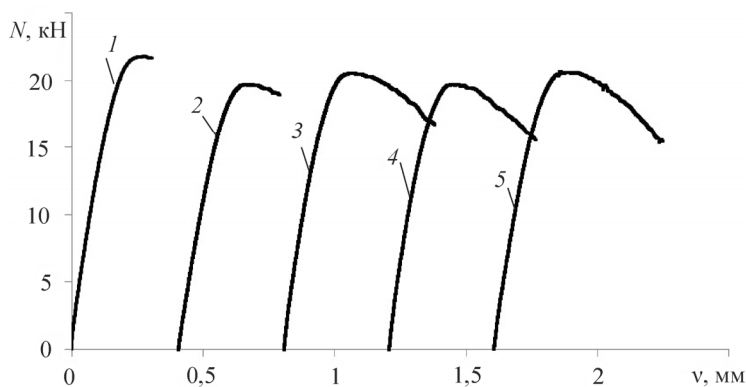


Рис. 9. Диаграммы растяжения для образцов с различной длиной рабочей части: 1 – 300 мм; 2 – 200 мм; 3 – 150 мм; 4 – 100 мм; 5 – 50 мм

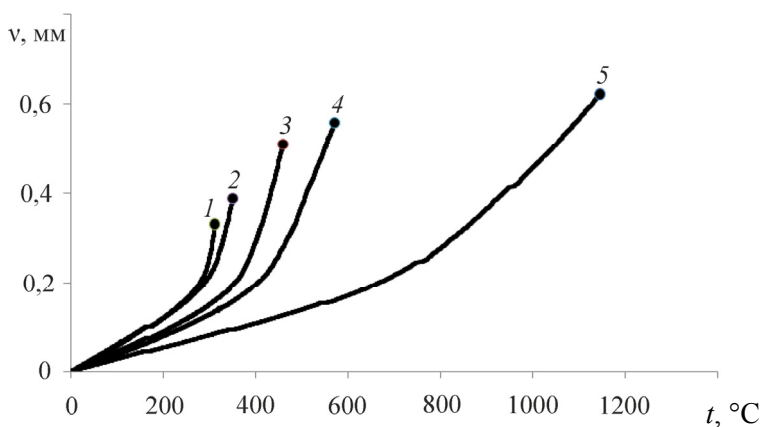


Рис. 10. Зависимость смещения берегов надрезов образца от времени: 1 – образец с длиной рабочей части 300 мм; 2 – 200 мм; 3 – 150 мм; 4 – 100 мм; 5 – 50 мм

На основе полученных экспериментальных данных для алюминиевого сплава Д16Т можно сделать вывод, что при испытаниях на квазистатическое растяжение образцов с предварительно выращенной трещиной жесткость нагружающей системы оказывает значительное влияние на её равновесный рост, что отражается в большем значении величины раскрытия трещины к моменту разрушения при повышении жесткости нагружающей системы.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (13-08-00304-а), в рамках исполнения государственного задания Министерства образования и науки РФ высшим учебным заведениям (шифр проекта 1.3166.2011).

### **Библиографический список**

1. Ковчик С.Е., Морозов Е.М. Механика разрушения и прочность материалов. Т. 3. Характеристики кратковременной трещиностойкости материалов и методы их определения. – Киев: Наук. думка, 1988. – 436 с.
2. Хеллан К. Введение в механику разрушения / под ред. Е.М. Морозова. – М.: Мир, 1988. – 364 с.
3. Основы экспериментальной механики разрушения / И.М. Керштейн, В.Д. Ключников, Е.В. Ломакин, С.А. Шестериков. – М.: Изд-во Моск. ун-та, 1989. – 140 с.
4. Пестриков В.М., Морозов Е.М. Механика разрушения на базе компьютерных технологий: практикум. – СПб.: БХВ-Петербург, 2007. – 464 с.
5. Механика закритического деформирования и нелокальность условий / В.Э. Вильдеман, А.В. Ипатова, М.П. Третьяков, Т.В. Третьякова // Вестник Нижегород. ун-та им. Н.И. Лобачевского. – 2011. – № 4. – С. 158–163.
6. Вильдеман В.Э. Закономерности и модели процессов накопления повреждений, закритического деформирования и структурных разрушений композиционных материалов // Вестник Перм. гос. техн. ун-та. Динамика и прочность машин. – 2001. – № 2. – С. 37–45.
7. Чаусов Н.Г. Полная диаграмма деформирования, как источники информации о кинетике накопления повреждений и трещиностойкости материалов // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 2004. – Т. 70, № 7. – С. 42–49.
8. Зилова Т.К., Фридман Я.Б. О механических испытаниях с переменной податливостью нагружения // Заводская лаборатория. – 1956. – Т. 22, № 6. – С. 712–717.
9. 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.
10. Волков С.Д. Проблема прочности и механика разрушения // Пробл. прочности. – 1978. – № 7. – С. 3–10.

11. Вильдеман В.Э., Соколкин Ю.В., Ташкинов А.А. Механика неупругого деформирования и разрушения композиционных материалов. – М.: Наука: Физматлит, 1997. – 288 с.

12. Вильдеман В.Э., Соколкин Ю.В., Ташкинов А.А. Краевая задача механики деформирования и разрушения поврежденных тел с зонами разупрочнения // Прикладная механика и техническая физика. – 1995. – № 6. – 122 с.

13. Вильдеман В.Э. О решениях упругопластических задач с граничными условиями контактного типа для тел с зонами разупрочнения // Прикладная математика и механика. – 1998. – Т. 62, № 2. – С. 304–320.

14. Экспериментальные исследования свойств материалов при сложных термомеханических воздействиях / В.Э. Вильдеман, М.П. Третьяков, Т.В. Третьякова, Р.В. Бульбович [и др.] / под ред. В.Э. Вильдемана. – М.: Физматлит, 2012. – С. 212.

### References

1. Kovchik S.E., Morozov E.M. *Mehanika razrushenija i prochnost' materialov*; Т. 3. *Harakteristiki kratkovremennoj treshhinostojkosti materialov i metody ih opredelnija* [Fracture mechanics and strength of materials; vol. 3 features a short-term crack resistance of materials and methods for their opredelnnye]. Kiev: Naukova dumka, 1988. 436 p.

2. Hellan K. *Vvedenie v mehaniku razrushenija* [Introduction to fracture mechanics]. Ed. E.M. Morozov. Moscow: Mir, 1988. 364 p.

3. Kershteyn I.M., Klyushnikov V.D., Lomakin E.V., Shesterikov S.A. *Osnovy jeksperimental'noj mehaniki razrushenija* [Fundamentals of Experimental Fracture Mechanics]. Moscovskiy gosudarstvenniy universitet, 1989, 140 p.

4. Pestrikov V.M., Morozov E.M. *Mehanika razrushenija na baze komp'yuternyh tehnologij. Praktikum* [Fracture Mechanics on the basis of computer technology. Workshop]. St. Petersburg, 2007. 464 p.

5. Vildeman V.E., Ipatova A.V., Tretyakov M.P., Tretyakov T.V., *Mehanika zakriticheskogo deformirovanija i nelokal'nost' uslovij* [Mechanics of deformation and non-locality of the supercritical conditions]. *Vestnik Nizhegorodskogo universiteta imeni N.I. Lobachevskogo*, 2011, no. 4, pp. 158-163.

6. Vildeman V.E. Zakonomernosti i modeli processov nakoplenija povrezhdenij, zakriticheskogo deformirovanija i strukturnyh razrushenij kompozicionnyh materialov [Zakonomernosti and process model of damage accumulation, supercritical deformation and damage of structural composites]. *Vestnik Permskogo gosudarstvennogo tehničeskogo universiteta. Dinamika i prochnost' mashin*, 2001, no. 2, pp. 37-45.

7. Chausov N.G. Polnaja diagramma deformirovanija, kak istochniki informacii o kinetike nakoplenija povrezhdenij i treshhinostojkosti materialov [Full stress-strain diagram, as sources of information on the kinetics of accumulation of damage and fracture of materials]. *Zavodskaja laboratorija. Diagnostika materialov*, 2004, vol. 70, no. 7, pp. 42-49.

8. Zilova T.K., Friedman J.B. O mehanicheskikh ispytaniyah s peremnoju podatlivost'ju nagruženija [On the mechanical tests with variable loading pliability]. *Zavodskaja laboratorija*, 1956, vol. 22, no. 6, pp. 712-717.

9. Sawicki F.S., Vandyshev B.A. Zhestkost' ispytatel'nyh mashin i ee vlijanie na spadajushhij uchastok diagrammy rastjazhenija i izgiba [Stiffness testing machines and its effect on the falling part of the diagram stretching and bending]. *Zavodskaja laboratorija*, 1956, vol. 22, no. 6, pp. 717-721.

10. Volkov S.D. Problema prochnosti i mehanika razrushenija [The problem of strength and fracture mechanics]. *Problemy prochnosti*, 1978, no. 7, pp. 3-10.

11. Vildeman V.E., Sokolkin U.V., Tashkinov A.A. Mehanika neuprugogo deformirovanija i razrushenija kompozicionnyh materialov [Mechanics of inelastic deformation and fracture of composite materials]. Moscow: Nauka, Fizmatlit, 1997. 288 p.

12. Vildeman V.E., Sokolkin U.V., Tashkinov A.A. Kraevaja zadacha mehaniki deformirovanija i razrushenija povrezhdennyh tel s zonami razuprochnenija [The boundary value problem of deformation and fracture mechanics of bodies with damaged areas of weakness]. *Prikladnaja mehanika i tehničeskaja fizika*, 1995, no. 6, pp. 122-140.

13. Vildeman V.E. O reshenijah uprugoplastičeskikh zadach s granichnymi uslovijami kontaktnogo tipa dlja tel s zonami razuprochnenija. [Solutions of problems of boundary conditions for the contact-type bodies with zones of weakness]. *Prikladnaja matematika i mehanika*, 1998, vol. 62, no. 2, pp. 304-320.

14. Vildeman V.E., Tretyakov M.P., Tretyakov T.V., Bulbovich R.V., Slovic S.V., Babushkin A., Ilyin A.V., Lobanov D.S., Ipatova A.V. Jeksperimental'nye issledovanija svojstv materialov pri slozhnyh termomechanicheskikh vozdeystvijah [Experimental studies of the properties of materials under complex thermomechanical effects]. Ed. V.E. Vildeman. Moscow: Fizmatlit, 2012. 212 p.

### **Сведения об авторах**

**Бажуков Павел Сергеевич** (Пермь, Россия) – студент кафедры механики композиционных материалов и конструкций Пермского национального исследовательского политехнического университета (614990, Пермь, Комсомольский пр., 29, e-mail: Bazhukov@yandex.com).

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

**Ильиных Артем Валерьевич** (Пермь, Россия) – кандидат технических наук, доцент кафедры механики композиционных материалов и конструкций Пермского национального исследовательского политехнического университета (614990, Пермь, Комсомольский пр., 29, e-mail: ilinih@yandex.com).

**Третьяков Михаил Павлович** (Пермь, Россия) – младший научный сотрудник Центра экспериментальной механики Пермского национального исследовательского политехнического университета (614990, Пермь, Комсомольский пр., 29, e-mail: cem\_tretyakov@mail.ru).

### **About the authors**

**Bazhukov Pavel Sergeevich** (Perm, Russian Federation) – student of the mechanics of composite materials and construction of the Perm National Research Polytechnic University (29, Komsomolskiy av., 614990, Perm, Russian Federation, e-mail: Bazhukov@yandex.com).

**Vildeman Valery Ervinovich** (Perm, Russian Federation) – Director of the Center for Experimental Mechanics, professor of mechanics of composite materials and structures, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor of Perm National Research Polytechnic University (29, Komsomolskiy av., 614990, Perm, Russian Federation, e-mail: wildemann@pstu.ru).

**Ilinykh Artem Valerevich** (Perm, Russian Federation) – Ph.D. in Technical Sciences, Lektor, Department of Mechanics of Composite Materials and Structures, Perm National Research Polytechnic University (29, Komsomolskiy av., 614990, Perm, Russian Federation, e-mail: [ilinih@yandex.com](mailto:ilinih@yandex.com)).

**Tretyakov Mikhail Pavlovich** (Perm, Russian Federation) – Junior Scientific Associate and Engineer of the Center of Experimental Mechanics of Perm National Research Polytechnic University (29, Komsomolskiy av., 614990, Perm, Russian Federation, e-mail: [cem\\_tretyakov@mail.ru](mailto:cem_tretyakov@mail.ru)).

Получено 24.04.13