

УДК 620.172

**П.С. Бажуков, В.Э. Вильдеман**

Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь, Россия

**ВЛИЯНИЕ ДОПОЛНИТЕЛЬНЫХ ЦИКЛИЧЕСКИХ  
ВОЗДЕЙСТВИЙ НА РАВНОВЕСНЫЙ РОСТ ТРЕЩИН  
ПРИ КВАЗИСТАТИЧЕСКОМ НАГРУЖЕНИИ**

Рассматриваются вопросы экспериментального изучения поведения алюминиевого сплава Д16Т в зависимости от режимов нагружения. Производилось одноосное нагружение плоских образцов с предварительно пророщенной усталостной трещиной. Приведены диаграммы деформирования. Испытания выполнены на сервогидравлической испытательной машине Instron 8850. Для замера длины трещины использовался цифровой микроскоп Dino-Lite Digital Microscope AM4013MTL Series. Высказано предположение о влиянии дополнительных циклических воздействий на механическое поведение алюминиевого сплава Д16Т при квазистатическом нагружении и произведена его экспериментальная проверка.

**Ключевые слова:** квазистатическое нагружение, плоские образцы с центральным надрезом, нагружение с дополнительными циклическими воздействиями.

**P.S. Bazhukov, V.E. Vil'deman**

Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation

**INFLUENCE OF ADDITIONAL CYCLIC EFFECTS  
ON THE EQUILIBRIUM CRACK GROWTH UNDER  
QUASISTATIC LOADING**

The questions of experimental study of the behavior of the aluminum alloy D16T depending on the loading conditions is discussed. It produces uniaxial loading of flat samples with previously germinated fatigue crack. Diagrams of deformation are shown. The tests carried out on servohydraulic testing machine Instron 8850. To measure the length of a crack digital microscope Dino-Lite Digital Microscope AM4013MTL Series is used. It is suggested that the influence of the additional cyclical effects on the mechanical behavior of aluminum alloy D16T under quasistatic loading and its experimental verification is produced.

**Keywords:** quasistatic loading, flat samples with a central cut, loading with the additional cyclic effects.

Для обеспечения долговечности конструкций актуальным является исследование закономерностей роста дефектов в них, в частности трещин. Экспериментальные исследования характеристик роста тре-

щин 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, например, на условия перехода от равновесного роста дефекта к динамическому разрушению [4]. 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 [5].

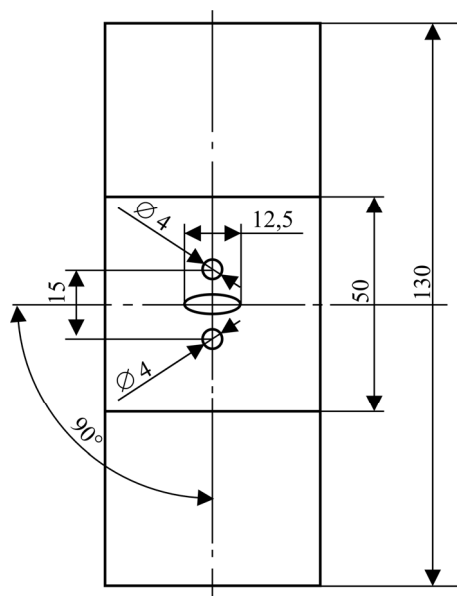


Рис. 1. Эскиз образца для испытаний на трещиностойкость с длиной рабочей части 50 мм

Два отверстия диаметром 4 мм созданы в образцах с целью крепления навесных призм, на которые ставится датчик раскрытия трещины.

Пророщенные трещины выращивались в соответствии с требованиями 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  $0,025W$ , где  $W$  – ширина образца, равная 50 мм. В соответствии со стандартами были замерены и углы отклонения усталостной трещины от осевой линии, линии симметрии образца (таблица).

Результаты испытаний серии с рабочей частью 50 мм  
по прорастиванию трещины

Номер образца	$2l_0$ , мм	$l_{0R}$ , мм	$l_{0L}$ , мм	$ l_{0R} - l_{0L} $ , мм	Допустимое значение	Допустимое значение
					$ l_{0R} - l_{0L} $ по ГОСТу	$ l_{0R} - l_{0L} $ по ASTM
1 50	23,734	11,658	12,076	0,418	1,1658	1,25
2 50	20,259	10,142	10,117	0,025	1,0117	1,25
3 50	20,255	10,147	10,108	0,039	1,0108	1,25
4 50	19,695	9,524	10,171	0,647	0,9524	1,25
5 50	21,588	10,912	10,676	0,236	1,0676	1,25
6 50	20,824	10,119	10,705	0,586	1,0119	1,25
7 50	19,518	9,832	9,686	0,146	0,9686	1,25
8 50	19,201	9,751	9,45	0,301	0,9450	1,25

Замер длины трещины выполнялся с использованием цифрового микроскопа Dino-Lite Digital Microscope AM4013MTL Series. Для съемки производилась калибровка микроскопа. Снимок образца приведен на рис. 2.

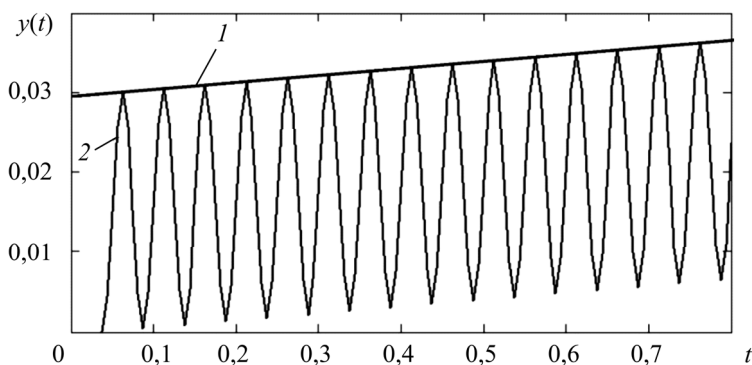


Рис. 2. Участок сгенерированного массива данных:  
1 – без пульсации; 2 – с пульсацией

После калибровки микроскопа определялись границы трещины и проводилось ее измерение. Образцы подготавливались для проверки предположения о влиянии дополнительных циклических воздействий на

равновесный рост трещин. Предполагается, что циклические воздействия обеспечат более продолжительный равновесный рост трещин [6]. Для траектории кинематического нагружения с пульсациями был выбран синусоидальный вид, показанный на рис. 2. Из рисунка видно, что максимальные значения синусоиды совпадают с графиком линейной зависимости перемещений от времени при кинематическом нагружении.

Результаты испытаний сравнивались с кинематическим нагружением без пульсации, в соответствии с длиной рабочей части образцов. Для образцов с длиной рабочей части 50 мм результаты представлены на рис. 3, 4. Частота нагружения во время испытаний соответствовала значению 16 Гц, а амплитуда изменения положения равнялась 0,015 мм.

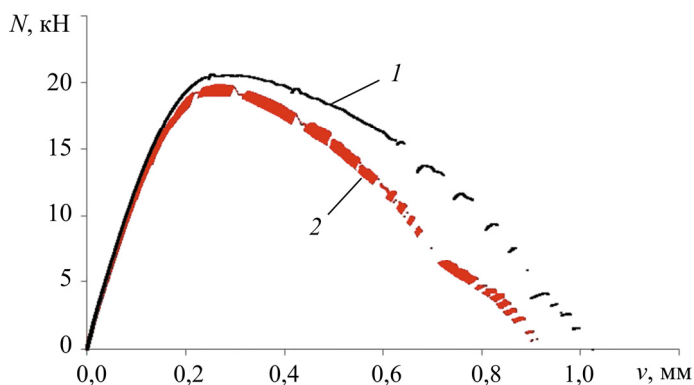


Рис. 3. Диаграмма нагружения образцов с длиной рабочей части 50 мм: 1 – без пульсации; 2 – с пульсацией

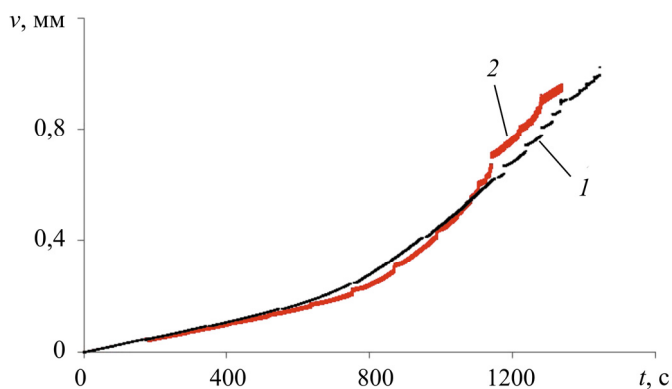


Рис. 4. Зависимость величины смещения берегов трещины от времени для образцов с длиной рабочей части 50 мм: 1 – без пульсации; 2 – с пульсацией

Следует отметить, скорость нагружения с пульсациями была несколько больше по сравнению с нагружением без пульсаций. Это связано со сложностью задания траектории нагружений с пульсацией.

Из рис. 4 видно, что равновесный рост трещины при нагружении с дополнительными циклическими воздействиями наблюдается на большую длину, чем при нагружении без них. Это длина составила 7 % от всей величины раскрытия берегов трещины. Для образцов с длиной рабочей части 100 мм результаты представлены на рис. 5, 6.

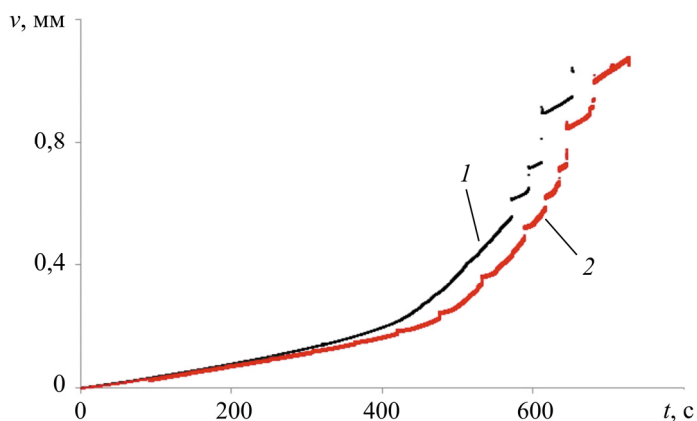


Рис. 5. Зависимость величины смещения берегов трещины от времени для образцов с длиной рабочей части 100 мм: 1 – без пульсации; 2 – с пульсацией

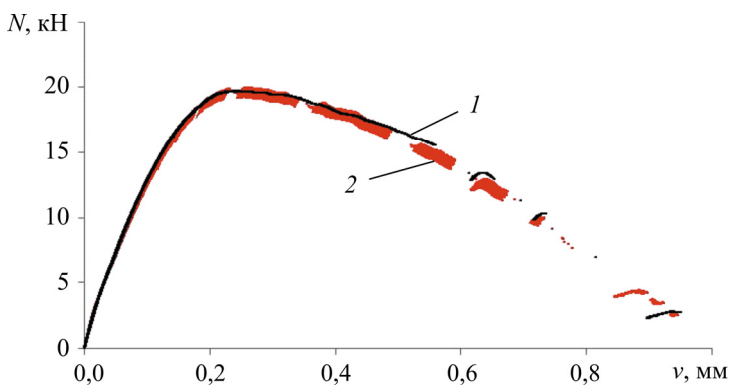


Рис. 6. Диаграмма нагружения образцов с длиной рабочей части 100 мм: 1 – без пульсации; 2 – с пульсацией

Как видно из рис. 5, разрушение образца происходит в несколько этапов. Равновесный рост трещины переходит в динамический рост, а затем снова фиксируется равновесный рост трещины. Эта особенность наблюдалась несколько раз за испытание. При уменьшении жесткости нагружающей системы число таких переходов уменьшается.

Для образцов с длиной рабочей части 150 мм результаты представлены на рис. 7, 8.

Подобным образом были проведены испытания для образцов с длиной рабочей части 200 и 300 мм.

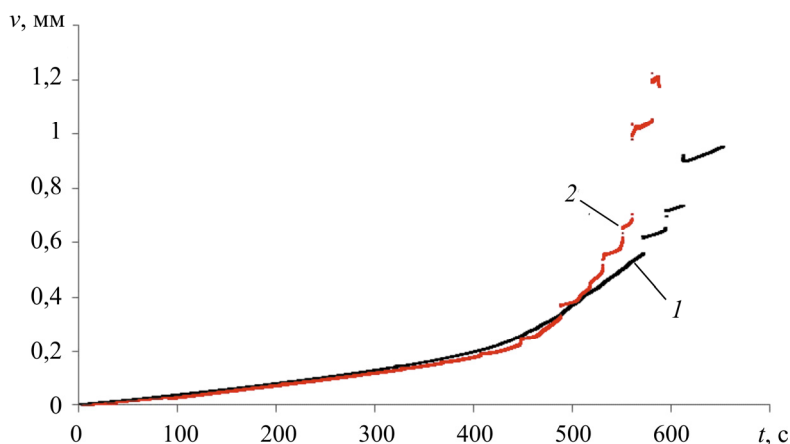


Рис. 7. Зависимость величины смещения берегов трещины от времени для образцов с длиной рабочей части 150 мм: 1 – без пульсации; 2 – с пульсацией

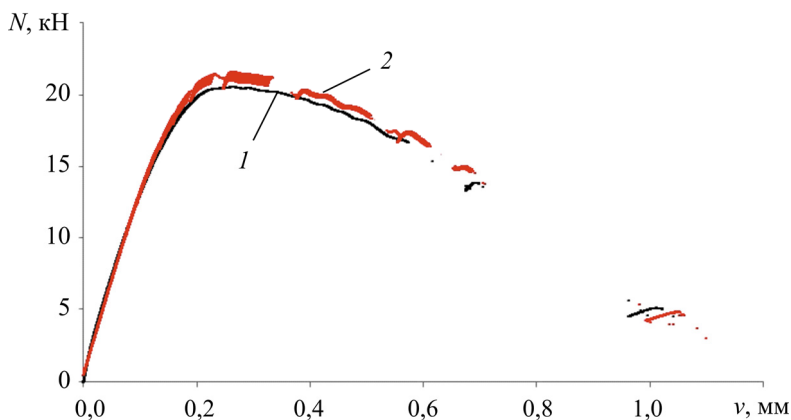


Рис. 8. Диаграмма нагружения образцов с длиной рабочей части 150 мм: 1 – без пульсации; 2 – с пульсацией

Таким образом, дополнительные циклические воздействия оказывают стабилизирующее влияние на характер роста трещины при высокой жесткости нагружающей системы. Это отражается в увеличении равновесного роста трещин.

*Работа выполнена в Пермском национальном исследовательском политехническом университете при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант РФФИ 14-08-31531 мол\_а) и с использованием результатов работ по гранту Российского фонда фундаментальных исследований № 13-08-00304-а.*

### **Список литературы**

1. 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.

2. Чаусов Н.Г. Полная диаграмма деформирования как источник информации о кинетике накопления повреждений и трещиностойкости материалов // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 2004. – Т. 70, № 7. – С. 42–49.

3. Слепян Л.И. Механика трещин. – Л.: Судостроение, 1981. – 295 с.

4. Вильдеман В.Э., Третьякова Т.В., Лобанов Д.С. Учет жесткости нагружающей систем при испытании полунатурных образцов крупночистого композиционного материала // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. – 2012. – № 2. – С. 34–49.

5. Влияние жесткости нагружающей системы на равновесный рост трещин при квазистатическом нагружении / П.С. Бажуков, В.Э. Вильдеман, А.В. Ильиных, М.П. Третьяков // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. – 2013. – № 2. – С. 7–20.

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

## References

1. Kershtein I.M., Kliushnikov V.D., Lomakin E.V., Shesterikov S.A. Osnovy eksperimental'noi mekhaniki razrusheniia [Based on experimental fracture mechanics]. Moscow: Moskovskii gosudarstvennyi universitet, 1989. 140 p.

2. Chausov N.G. Polnaia diagramma deformirovaniia kak istochnik informatsii o kinetike nakopleniia povrezhdenii i treshchinostoikosti materialov [Full diagram of deformation as a source of information on the kinetics of damage accumulation and fracture of materials]. *Zavodskaia laboratorii. Diagnostika materialov*, 2004, vol. 70, no. 7, pp. 42-49.

3. Slepian L.I. Mekhanika treshchin [Mechanics of cracks]. Leningrad: Sudostroenie, 1981. 295 p.

4. Vil'deman V.E., Tret'iakova T.V., Lobanov D.S. Uchet zhestkosti nagruzhaiushchei sistem pri ispytanii polunaturnykh obraztsov krupnoiacheistogo kompozitsionnogo materiala [Accounting stiffness load on the system during the test HIL coarse composite samples]. *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Mekhanika*, 2012, no. 2, pp. 34-49.

5. Bazhukov P.S., Vil'deman V.E., Il'inykh A.V., Tret'iakov M.P. Vliianie zhestkosti nagruzhaiushchei sistemy na ravnovesnyi rost treshchin pri kvazistaticheskom nagruzhении [Influence of stiffness loading system on the equilibrium crack growth under quasi-static loading]. *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Mekhanika*, 2013, no. 2, pp. 7-20.

6. Vil'deman V.E., Tret'iakov M.P., Tret'iakova T.V., Bul'bovich R.V., Slovikov S.V., Babushkin A.V., Il'inykh A.V., Lobanov D.S., Ipatova A.V. Eksperimental'nye issledovaniia svoistv materialov pri slozhnykh termomekhanicheskikh vozdeistviakh [The experimental study of the properties of materials under complex thermo-mechanical effects]. Moscow: FIZMATLIT, 2012. 212 p.

Получено 10.11.2015

## Об авторах

**Бажуков Павел Сергеевич** (Пермь, Россия) – аспирант кафедры «Механика композиционных материалов и конструкций» Пермского национального исследовательского политехнического университета



(614990, Пермь, Комсомольский пр., 29, e-mail: 964197975cem.@gmail.com).

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

#### **About the authors**

**Pavel S. Bazhukov** (Perm, Russian Federation) – Postgraduate Student, Department of Mechanics of Composite Materials and Designs, Perm National Research Polytechnic University (29, Komsomolsky av., Perm, 614990, Russian Federation, e-mail: 964197975cem.@gmail.com).

**Valerii E. Vil'deman** (Perm, Russian Federation) – Doctor of Physics and Mathematics, Professor, Department of Mechanics of Composite Materials and Designs, Head of the Center of Experimental Mechanics, Perm National Research Polytechnic University (29, Komsomolsky av., Perm, 614990, Russian Federation, e-mail: wildemann@pstu.ru).