

УДК 620.178.32

**И.В. Сафонов, М.П. Третьяков, В.Э. Вильдеман**Пермский национальный исследовательский политехнический университет,  
Пермь, Россия**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ  
УСТАЛОСТНОЙ ДОЛГОВЕЧНОСТИ АЛЮМИНИЕВОГО  
СПЛАВА ПРИ РАСТЯЖЕНИИ С КРУЧЕНИЕМ**

Работа посвящена экспериментальному исследованию циклической долговечности алюминиевого сплава Д16Т в испытаниях на сложное нагружение при растяжении с кручением. Представлены результаты испытаний при осевом циклическом нагружении в условиях наличия постоянной составляющей касательного напряжения. Величина постоянной составляющей касательного напряжения  $\tau$  по отношению к пределу текучести при кручении  $\tau_{03}$ , определенному в статических испытаниях, изменялась в диапазоне от 0 до 0,7. Испытания выполнены на двух уровнях амплитуды осевых напряжений (250 МПа и 280 МПа). Получены экспериментальные данные зависимости числа циклов до разрушения при различной величине постоянной составляющей касательного напряжения. Отмечено, что при увеличении амплитуды осевого напряжения влияние постоянной составляющей касательного напряжения снижается.

**Ключевые слова:** экспериментальная механика, усталостная долговечность, сложное нагружение.

**I.V. Safonov, M.P. Tretyakov, V.E. Vildeman**

Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation

**EXPERIMENTAL STUDY OF FATIGUE LIFE  
OF ALUMINUM ALLOY IN TENSION WITH TORSION**

The work is devoted to experimental investigation of the number of cycles to failure of aluminum alloy Д16Т in the combined loading tests at tension with torsion. The experimental results under uniaxial cyclic loading with an additional component of the constant shear stress are presented. The value of constant component of shear stress  $\tau$  with respect to shear yield stress  $\tau_{03}$  which were determined in static tests was changed from 0 to 0.7. The tests were carried out on two levels of axial stress amplitude (250 MPa and 280 MPa). The experimental data of the number of cycles to failure under different value of the additional component of the constant shear stress were obtained. It is noted that with increase of the axial stress amplitude the effect of the constant component of the shear stress is reduced.

**Keywords:** experimental mechanics, fatigue life, complex loading.

Влияние различных видов напряженного состояния на статическую и циклическую прочность является актуальным направлением теоретических и экспериментальных исследований. Развитие методов

оценки прочности и долговечности высоконагруженных элементов конструкций, работающих в сложных условиях термомеханического нагружения, предполагает использование экспериментально установленных закономерностей статической и циклической прочности в условиях сложного напряженного состояния [1–7]. На циклическую долговечность влияют различные факторы, в том числе частота нагружения [8], вид напряженно-деформированного состояния [9].

В работе представлены результаты экспериментальных исследований, проведенных в Центре экспериментальной механики Пермского национального исследовательского политехнического университета, при циклическом нагружении в условиях сложного напряженного состояния. Проведено экспериментальное исследование влияния дополнительного касательного напряжения на усталостную долговечность алюминиевого сплава Д16Т. При растяжении образцы подвергались одноосному циклическому нагружению при наличии дополнительной составляющей постоянного касательного напряжения различной величины. Циклические испытания проводились на двух уровнях амплитуды осевого напряжения.

Экспериментальное исследование проводилось на универсальной электродинамической испытательной системе Instron Electropuls E10000. Внешний вид установки Electropuls E10000 представлен на рис. 1.

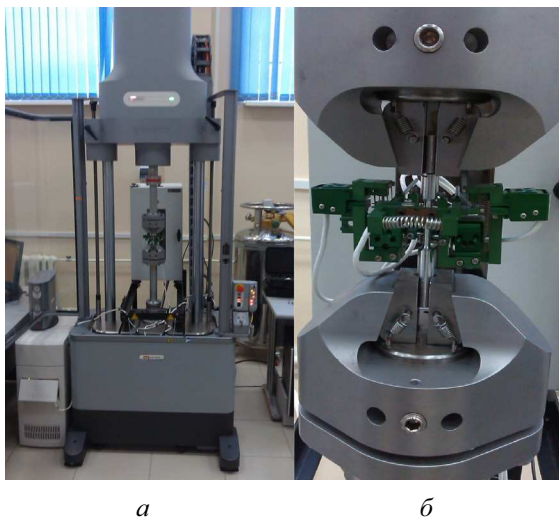


Рис. 1. Испытательная система Instron Electropuls E10000: общий вид испытательной системы (а); образец с установленным двухосевым экстензометром (б)

Испытательная система предназначена для проведения статических испытаний на растяжение, сжатие, изгиб, кручение; динамических и усталостных испытаний с частотой до 100 Гц; двухосевых (растяжение-сжатие, кручение) статических и динамических испытаний при нагрузках до 10 кН/100 Нм. Система ElectropulsE10000 укомплектована датчиком нагрузки Dynacell  $\pm 10$  кН/ $\pm 100$  Нм. Датчик нагрузки имеет точность измерения нагрузки в диапазоне от 40 Н до 10 кН, равную 0,4 % от измеряемой величины.

Для создания методики и проведения испытания использовалось программное обеспечение WaveMatrix.

В качестве материала для экспериментальных исследований применялся широко используемый в машиностроении алюминиевый сплав Д16Т.

Для разработки программы исследований и определения основных параметров нагружения в ходе усталостных испытаний проведены квазистатические испытания на одноосное растяжение и кручение, в результате которых получены основные механические характеристики материала (модуль Юнга  $E$ , условный предел текучести  $\sigma_{02}$ , предел пропорциональности  $\sigma_{пц}$ , предел упругости  $\sigma_y$ , модуль сдвига  $G$ , условный предел текучести при кручении  $\tau_{03}$ , предел пропорциональности при кручении  $\tau_{пц}$ ) представленные в таблице.

#### Механические характеристики алюминиевого сплава Д16Т

Определяемые характеристики	Результаты испытаний			Значение характеристик с вероятностью 95 %
$\sigma_{02}$ (МПа)	363,3	401,0	413,3	403,5 $\pm$ 15
$\sigma_y$ (МПа)	368,0	377,0	392,7	379 $\pm$ 21
$\sigma_{пц}$ (МПа)	373,6	381,3	391,3	382,1 $\pm$ 15
$E$ (ГПа)	73,48	73,40	73,78	73,55 $\pm$ 0,34
$\tau_{03}$ (МПа)	183,2	186,0	184,3	184,5 $\pm$ 2,38
$\tau_{пц}$ (МПа)	148,8	150,9	149,7	149,8 $\pm$ 1,73
$G$ (ГПа)	30,86	30,65	29,57	30,36 $\pm$ 1,16

Для проведения экспериментальных исследований усталостной долговечности использовались образцы корсетного типа по ГОСТ 25.502–79 «Расчеты и испытания на прочность в машиностроении. Методы механических испытаний металлов. Методы испытаний на усталость» с диаметром рабочей части 5 мм. Образцы изготовлены из

прутка диаметром 10 мм в состоянии поставки, эскиз образца представлен на рис. 2. Реализованы циклические испытания с контролем по напряжению с коэффициентом асимметрии  $R = 1$ , частота нагружения 50 Гц. Циклическое нагружение образцов проводилось до разрушения на части или появления макротрещины.

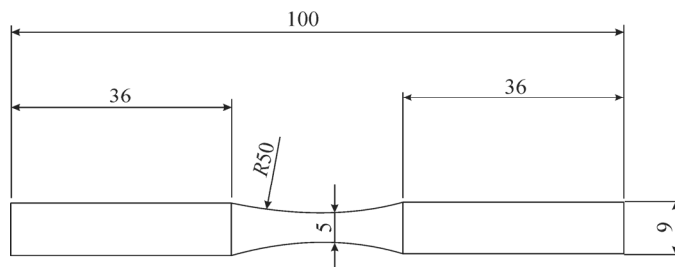


Рис. 2. Эскиз образцов корсетного типа для циклических испытаний

В результате испытаний в отсутствие касательных напряжений построена кривая усталости (рис. 3), где  $N$  – количество циклов до разрушения;  $\sigma_a$  – амплитуда осевого напряжения, на величину которой происходило растяжение и сжатие образца. Кривая усталости представлена в двойных логарифмических координатах.

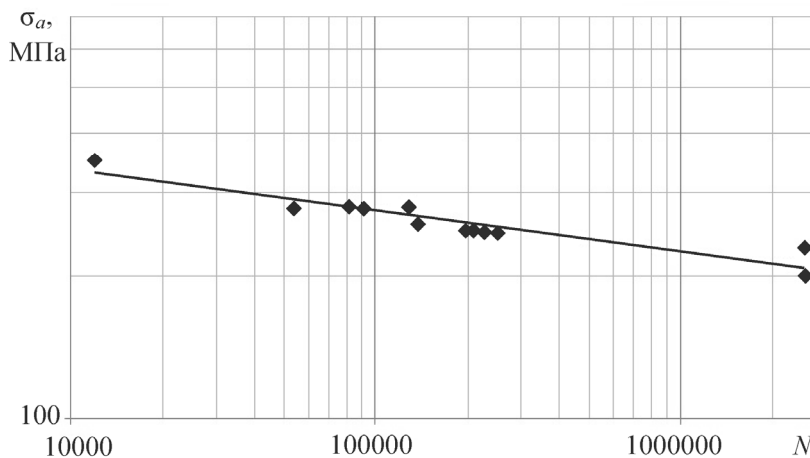


Рис. 3. Кривая усталости алюминиевого сплава Д16Т в двойных логарифмических координатах

Для проведения испытаний по оценке влияния постоянных касательных напряжений на циклическую долговечность при осевом нагружении выбраны два уровня амплитуды осевых напряжений: 250 и 280 МПа, на которых испытано по четыре образца.

На выбранных уровнях амплитуды напряжений реализованы циклические испытания на растяжение в условиях наличия постоянной составляющей касательного напряжения. Величина касательного напряжения  $\tau$  по отношению к пределу текучести при кручении  $\tau_{03}$ , определенному в статических испытаниях, изменялась в диапазоне от 0 до 0,7. Циклическое нагружение образцов проводилось до разрушения на части или появления макротрещины.

Полученные экспериментальные данные описываются линейной аппроксимацией. Для сопоставления полученные результаты испытаний представлены на одном графике (рис. 4), где  $\tau / \tau_{03}$  – отношение касательного напряжения к пределу текучести при сдвиге, а  $N$  – число циклов до разрушения. Линии аппроксимации описываются уравнениями  $N = -26226\tau / \tau_{03} + 25970$  для амплитуды осевых напряжений 250 МПа и  $N = -79615\tau / \tau_{03} + 86421$  для амплитуды 280 МПа.

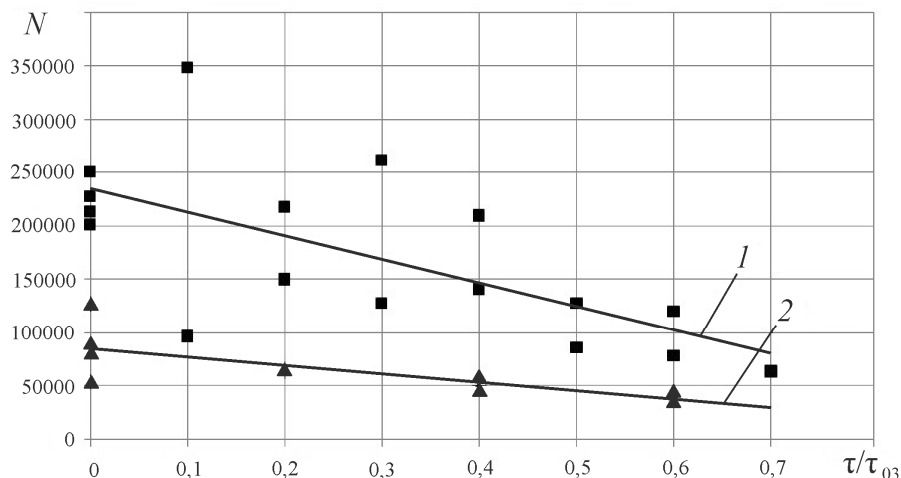


Рис. 4. Результаты экспериментального исследования влияния дополнительного касательного напряжения на усталостную долговечность алюминиевого сплава Д16Т при одноосном циклическом нагружении: 1 – амплитуда 250 МПа; 2 – амплитуда 280 МПа

Таким образом, проведены экспериментальные исследования оценки влияния постоянной составляющей касательных напряжений на циклическую долговечность алюминиевого сплава Д16Т при осевом нагружении. Зависимость числа циклов до разрушения от величины касательного напряжения  $\tau$  по отношению к пределу текучести при кручении  $\tau_{03}$  в диапазоне от 0 до 0,7 описывается линейной аппроксимацией. Показано, что при увеличении амплитуды осевого напряжения влияние касательного напряжения уменьшается.

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. 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. – 204 с.

2. Исследование закономерностей упругопластического деформирования стали 15Х2ГМФ при сложном напряженном состоянии / Н.Н. Вассерман, В.Э. Вильдеман, А.А. Крюков, М.П. Третьяков // Вестник Перм. гос. техн. ун-та. Механика. – 2010. – № 2. – С. 34–47.

3. Третьяков М.П., Вильдеман В.Э. Деформационное разупрочнение материалов в условиях плоского напряженного состояния // Вестник Перм. нац. исслед. политехн. ун-та. Механика. – 2012. – № 2. – С. 190–203.

4. Вильдеман В.Э., Третьяков М.П. Испытания материалов с построением полных диаграмм деформирования // Проблемы машиностроения и надежности машин. – 2013. – № 2. – С. 93–101.

5. Аннин Б.Д., Жигалкин В.М. Поведение материалов в условиях сложного нагружения. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, 1999. – 342 с.

6. Гигиняк Ф.Ф., Тимофеев Б.Т. Малоцикловая усталость и циклическая ползучесть сталей перлитного и аустенитного классов и их сварных соединений при сложном напряженном состоянии // Вопросы материаловедения. – 2007. – № 3(51). – С. 272–285.

7. Петухов А.Н. Вопросы многоциклового усталости для материалов и деталей современных ГТД // Вестник Самар. гос. аэрокосм. ун-та. – 2009. – № 3(19). – С. 172–177.

8. Радон Дж. Зависимость роста трещин от частоты при усталости в условиях циклического нагружения с постоянной и случайной амплитудой // Физическая механика. – 2000. – № 3(2). – С. 81–88.

9. Jianyu Zhang, Xinhong Shi, Binjun Fei. High cycle fatigue and fracture mode analysis of 2A2-T4 aluminum alloy under out-of-phase axial-torsion constant amplitude loading // International journal of fatigue. – 2012. – Vol. 38. – P. 144–154.

### References

1. Vildeman V.E., Tretyakov M.P., Tretyakov T.V., Bulbovich R.V., Slovic S.V., Babushkin A.V., Ilyinich A.V., Lobanov D.S., Ipatova A.V. Jeksperimental'nye issledovaniya svojstv materialov pri slozhnyh termomechanicheskikh vozdeystvijah [Experimental studies of the properties of materials under complex thermomechanical effects]. Ed V.E. Vildeman. Moscow: Fizmatlit, 2012. 204 p.

2. Wasserman N.N., Vildeman V.E., A.A. Kryukov, Tretyakov M.P. Issledovanie zakonomernostej uprugoplasticheskogo deformirovaniya stali 15H2GMF pri slozhnom naprjazhjonnom sostojanii [Study of the laws of elastic-plastic deformation of steel 15H2GMF under complex stress]. *Vestnik Permskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Mehanika*, 2010, no. 2, pp. 34-47.

3. Tretyakov M.P., Vildeman V.E. Deformacionnoe razuprochnenie materialov v usloviyah ploskogo naprjazhjonnogo sostojaniya [Strain softening of materials under conditions of plane stress]. *Vestnik Permskogo nacional'nogo issledovatel'skogo politehnicheskogo universiteta. Mehanika*, 2012, no. 2, pp. 190-203.

4. Vildeman V.E., Tretyakov M.P. Ispytaniya materialov s postroeniem polnyh diagramm deformirovaniya [Testing of materials to the construction of complete strain diagrams]. *Problemy mashinostroenija i nadjozhnosti mashin*, 2013, no. 2, pp. 93-101.

5. Annin B.D., Zhigalkin V.M. Povedenie materialov v usloviyah slozhnogo nagruzhenija [The behavior of materials under complex loading]. Novosibirsk: Sibirskoe otdelenie Rossiyskoy akademii nauk, 1999. 342 p.

6. Giginyak F.F., Timofeev B.T. Malociklovaja ustalost' i ciklicheskaja polzuchest' stalej perlitnogo i austenitnogo klassov i ih svarnyh soedinenij pri slozhnom naprjazhjonnom sostojanii [Low-cycle fatigue and cyclic creep pearlite steels and austenitic grades and their welded joints under complex stress]. *Voprosy materialovedenija*, 2007, no. 3 (51), pp. 272-285.

7. Petukhov A.N. Voprosy mnogociklovoj ustalosti dlja materialov i detalej sovremennyh GTD [Questions for high-cycle fatigue of materials and components of modern CCD]. *Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo ajerokosmicheskogo universiteta*, 2009, no. 3 (19), pp. 172-177.

8. Radon J. Zavisimost' rosta treshhin ot chastoty pri ustalosti v uslovijah ciklicheskogo nagruzhenija s postojannoju i sluchajnoju amplitudoj [The dependence of crack growth rate for fatigue under cyclic loading with constant amplitude and random]. *Fizicheskaja mehanika*, 2000, no. 3(2), pp. 81-88.

9. Jianyu Zhang, Xinhong Shi, Binjun Fei. High cycle fatigue and fracture mode analysis of 2A2-T4 aluminum alloy under out-of-phase axial-torsion constant amplitude loading. *International journal of fatigue*, 2012, vol. 38, pp. 144-154.

### **Сведения об авторах**

**Сафонов Игорь Вячеславович** (Пермь, Россия) – студент кафедры механики композиционных материалов и конструкций Пермского национального исследовательского политехнического университета (614990, г. Пермь, Комсомольский пр., 29, e-mail: egozero@mail.ru).

**Третьяков Михаил Павлович** (Пермь, Россия) – инженер, младший научный сотрудник Центра экспериментальной механики Пермского национального исследовательского политехнического университета (614990, г. Пермь, Комсомольский пр., 29, e-mail: sem.tretyakov@gmail.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).



### **About the authors**

**Safonov Igor Vyacheslavovich** (Perm, Russian Federation) – student of the Department of the mechanics of composite materials and structures, Perm National Research Polytechnic University (29, Komsomolskij av., 614990, Perm, Russian Federation, e-mail: egozero@mail.ru).

**Tretyakov Michael Pavlovich** (Perm, Russian Federation) – engineer, a junior fellow at the Center of Experimental Mechanics, Perm National Research Polytechnic University (29, Komsomolskij av., 614990, Perm, Russian Federation, e-mail: cem.tretyakov@gmail.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: wilde-mann@pstu.ru).

Получено 24.04.13