

УДК 669.71

## ВЛИЯНИЕ УЛЬТРАМЕЛКОЗЕРНИСТОЙ СТРУКТУРЫ НА ХАРАКТЕР УСТАЛОСТНОГО РАЗРУШЕНИЯ АЛЮМИНИЕВОГО СПЛАВА СИСТЕМЫ Al-Cu-Mg

Э. Д. Хафизова<sup>1</sup>, Р. К. Исламгалиев<sup>2</sup>, М. А. Никитина<sup>3</sup>, А. А. Юдахина<sup>4</sup>

<sup>1</sup>ela.90@mail.ru, <sup>2</sup>rinatis@mail.ru, <sup>3</sup>nik.marina.al@gmail.com, <sup>4</sup>a.yudahina@mail.ru

Поступила в редакцию 28.03.2018

**Аннотация.** В работе изучено влияние ультрамелкозернистой структуры на характер разрушения алюминиевого сплава АК4-1 системы Al-Cu-Mg после усталостных испытаний. Ультрамелкозернистая структура была получена методом интенсивной пластической деформации – равноканальным угловым прессованием, что позволило увеличить прочностные и усталостные свойства материала до 20%. Усталостные испытания проводили по схеме растяжение–сжатие. Исследование усталостных изломов проводилось методом растровой электронной микроскопии. Выявлены небольшие различия в изломах исследованных структур.

**Ключевые слова:** излом; усталостная прочность; ультрамелкозернистая структура; алюминиевый сплав; равноканальное угловое прессование.

### ВВЕДЕНИЕ

Большинство эксплуатационных разрушений конструкций, а именно машин и механизмов, имеет усталостный характер, поэтому большое влияние в мировой науке уделяется проблеме прочности и усталости материалов.

В исследованиях [1–3] было продемонстрировано, что повышение уровня свойств в алюминиевых сплавах возможно путем измельчения зеренной структуры методами интенсивной пластической деформации (ИПД). Было установлено, что структурные особенности и механические свойства ультрамелкозернистых (УМЗ) алюминиевых сплавов существенно зависят от выбранных режимов ИПД, а также химического состава материала, определяющих вклады твердо-растворного и дисперсионного упрочнения.

На сегодняшний день экспериментальные исследования усталостных свойств алюминиевых сплавов, подвергнутых обра-

ботке ИПД, не позволяют выявить какие-либо общие закономерности, обеспечивающие повышение их усталостных свойств [4]. Любое разрушение характеризуется определенным рельефом поверхности излома, данная поверхность может иметь совершенно разный рельеф, который зависит от целого ряда факторов. По анализу поверхности излома или фрактографии можно получить информацию, характеризующую свойства материала.

Исследовать усталость материала – подвергнуть металл циклическим нагрузкам, под действием которых в структуре металла происходят значительные изменения, приводящие к образованию макроскопической трещины усталости и к ее постепенному развитию. Наблюдается несколько стадий разрушения: образование единичных циклических сдвигов и их развитие, появление субмикроскопических и микроскопических нарушений сплошности, слияние микроскопических трещин и образование очага мак-

роскопической трещины и рост макроскопической трещины. Особенностью циклической пластической деформации является ее локализация в отдельных более слабых или наиболее напряженных зернах [5].

Исследование усталостных изломов является важной составляющей для составления характеристики материала и для дальнейшего применения металлического материала в конструкциях. В данной работе представлены результаты фрактографии алюминиевого сплава системы Al-Cu-Mg, а именно сплава АК4-1 с разной структурой. Результаты структурных, механических и усталостных свойств представлены в более ранних работах [6–8].

#### МАТЕРИАЛ И МЕТОДИКИ ИССЛЕДОВАНИЯ

В качестве материала для исследований был выбран алюминиевый сплав системы Al-Cu-Mg сплав АК4-1, химический состав которого приведен в табл. 1, с однородной УМЗ структурой, полученной методом равноканального углового прессования [6–8].

Таблица 1

Химический состав алюминиевого сплава Al-Cu-Mg, вес. %

Fe	Si	Mn	Ti	Al	Cu	Ni	Mg	Zn
0,98	0,05	0,04	0,02	93,8	2,33	1,04	1,65	0,02

Особенность однородной структуры заключается в УМЗ структуре с размерами 1,5 мкм и шириной 500 нм в продольном сечении и 480 нм в поперечном сечении, а также наличием дисперсных частиц фаз  $\Theta'$ ,  $\Theta$  и  $S$  размерами 20, 60, 80 нм соответственно.

Зависимость свойств материала от структурных особенностей приведена в табл. 2.

Испытания на усталость проводили в соответствии с ГОСТ 25.502-79. Образцы изучали на испытательных машинах – высокочастотных пульсаторах Amsler 100 HFP 5100 и Amsler 300 HFP 5100 (Zwick/Roell) при осевом нагружении образца при темпе-

ратуре 20°C в ЦИАМ им. П. И. Баранова (Москва), коэффициент асимметрии цикла  $R_\sigma = 0,1$  на базе испытаний  $10^7$  циклов.

Таблица 2

Свойства материала от структуры материала сплава АК4-1 [6–8]

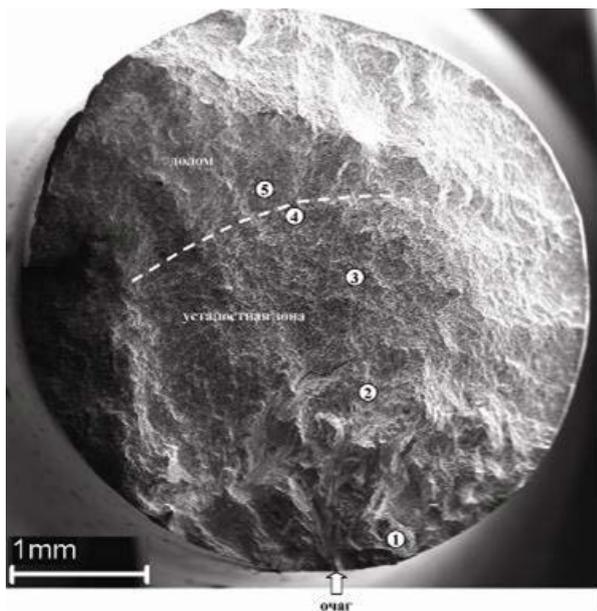
Структура	$H_v$ , МПа	$\sigma_B$ , МПа	$\sigma_{0,2}$ , МПа	$\delta$ , %	$\sigma_{0,1}$ , МПа
КЗ (Т6)	1220±8	370±3	320±5	16±2	222
Однородная УМЗ	1408±37	460±8	420±5	7±1	257

Для изучения поверхности рельефа разрушенных образцов применяли растровый электронный микроскоп JSM-6390 с ускоряющим напряжением 30 кВ.

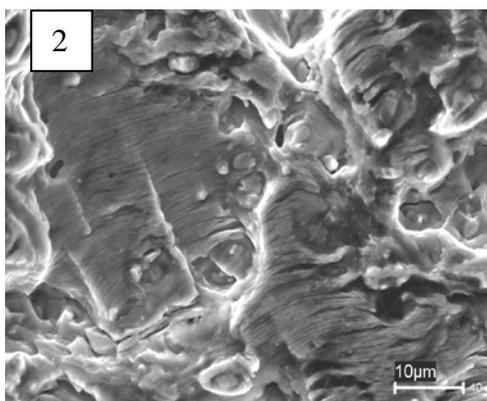
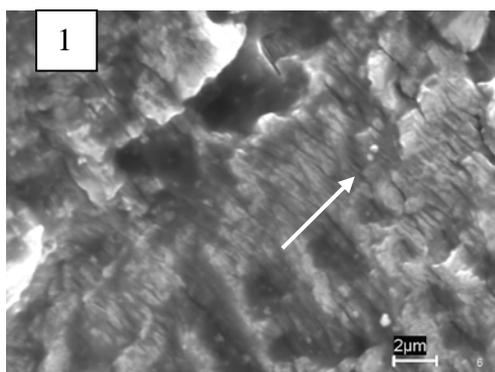
#### РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Для определения особенностей усталостного разрушения сплава АК4-1 с крупнозернистой (КЗ) и УМЗ структурой был проведен фрактографический анализ рельефов поверхности изломов образцов после усталостных испытаний. Во всех состояниях на поверхности разрушения можно выделить три типичные зоны усталостного разрушения: область зарождения и стабильного роста трещины, область ускоренного роста трещины и область статического долома.

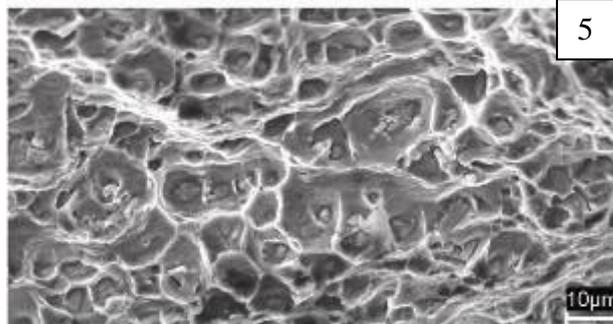
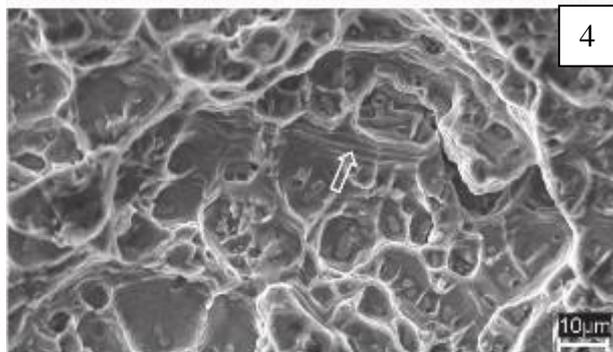
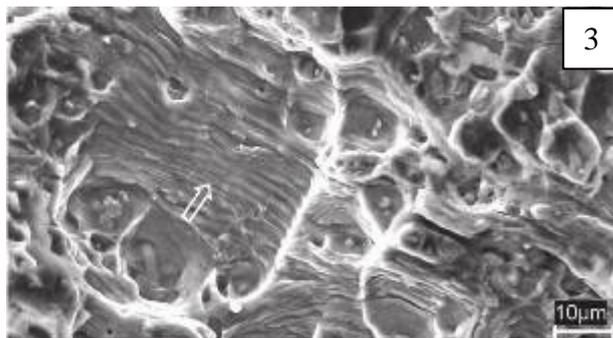
Фрактографические исследования усталостной зоны разрушения сплава АК4-1 в крупнозернистом состоянии (после Т6) показали, что все КЗ образцы имеют подповерхностный очаг разрушения. Типичный очаг представлен на рис. 1, который расположен на расстоянии 20 мкм от поверхности образца и представляет собой область размером 75×40 мкм с волокнистым микрорельефом, отличающимся от хрупкого микрорельефа на соседних участках. Усталостные бороздки с шагом  $S = 0,25$  мкм выявляются начиная с расстояния от очага  $l=0,6$  мм (рис. 2, а). Далее шаг бороздок возрастает (рис. 2, б) и начиная с  $l=1,4$  мм наряду с бороздками появляются микроямки (рис. 3). При  $l > 3,0$  мм микрорельеф становится полностью ямочным (рис. 3). Площадь усталостной зоны занимает ≈50% площади поперечного сечения образца.



**Рис. 1.** Поверхность разрушения сплава АК4-1 после стандартной обработки (микрорельеф участков 1–5 показан на рис. 2 и 3)

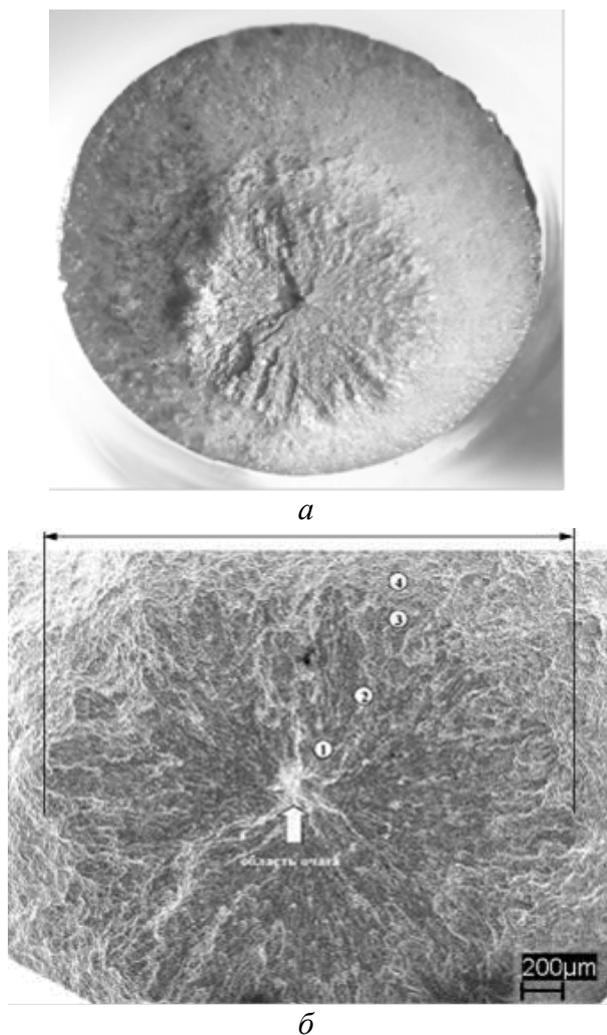


**Рис. 2.** АК4-1 со стандартной структурой: микрорельеф поверхности излома на участках 1 и 2 (рис. 1), стрелки – локальные направления роста трещины:  
1 – бороздки с шагом  $S=0,25$  мкм, расстояние от очага  $l=0,6$  мм; 2 –  $S=0,5$  мкм,  $l=1,4$  мм



**Рис. 3.** Сплав АК4-1 со стандартной структурой: микрорельеф излома на участках 3–5 (рис. 1):  
3 – смешанный микрорельеф (микроямки+бороздки),  $S=1,8$  мкм, расстояние от очага  $l=2,2$  мм; 4 – смешанный микрорельеф  $S=1,8$  мкм,  $l=2,85$  мм;  
5 – ямки,  $l=3$  мм

Образцы УМЗ сплава АК4-1 имеют как внутренний, так и поверхностный очаг разрушений. На рис. 4 представлен пример внутреннего очага разрушения, где очаг расположен на расстоянии 2 мм от поверхности образца. Вокруг очага располагается область диаметром 2,6 мм с более гладким рельефом, остальную часть излома занимают скосы. Область очага (диаметром  $\approx 220$  мкм) имеет ямочный микрорельеф, характерный для статического разрушения (рис. 5). Начальная область излома (отмеченная на рис. 4 область диаметром 2,6 мм)



**Рис. 4.** Сплав АК4-1 с УМЗ структурой: *а* – поверхность разрушения образца; *б* – фрагмент излома с указанием участков, приведенных при большом увеличении на рис. 6 и 7

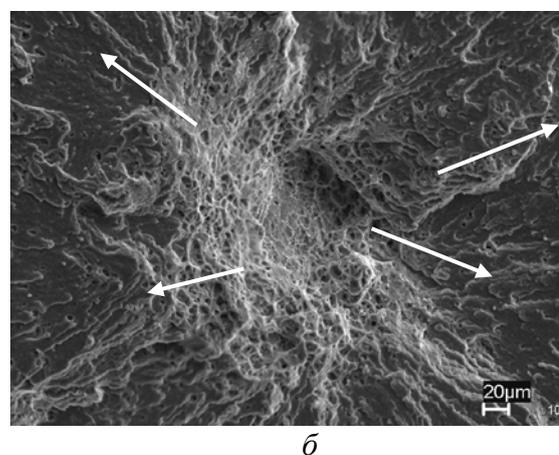
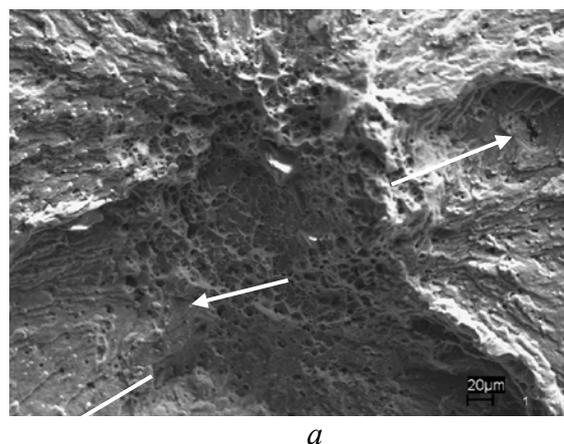
имеет однородный мелкодисперсный микрорельеф с характерным размером  $\approx 0,5$  мкм (рис. 6); в конце этой зоны наблюдается складчатость, ориентированная по фронту трещины с шириной складок до 6 мкм. В области скосов излом имеет ямочный микрорельеф (рис. 7).

Площадь центральной зоны с гладким микрорельефом занимает  $\approx 27\%$  площади поперечного сечения образца. Также есть образцы, площадь усталостной зоны которых занимает  $\approx 95\%$  площади поперечного сечения образца в области развития трещины.

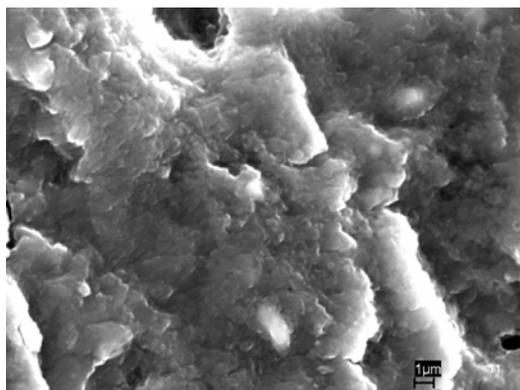
В зоне зарождения и стабильного роста усталостной трещины УМЗ образца наблюдается вязкий негладкий излом с присутствием усталостных бороздок (рис. 7). Обнаружено вторичное растрескивание вдоль бороздок, перпендикулярных направлению распростра-

нения магистральной усталостной трещины (рис. 8).

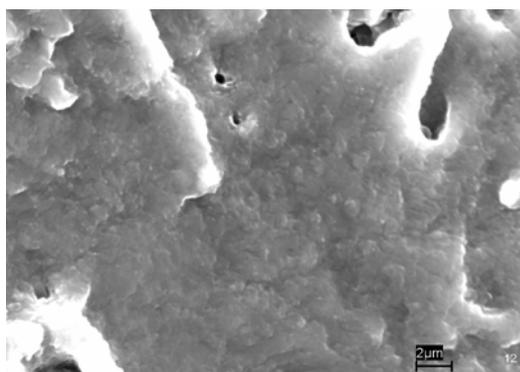
Повышенная прочность УМЗ сплава АК4-1 на 24% является результатом сильного измельчения зеренной структуры и дисперсионного упрочнения, тогда как уменьшение относительного удлинения до разрушения можно объяснить наличием внутренних напряжений вокруг частиц и вблизи границ зерен препятствующих развитию зарождению и движению дислокаций. В УМЗ образцах наблюдалась также малая протяженность стадии деформационного упрочнения. Как известно, на стадии деформационного упрочнения происходит увеличение плотности дислокаций. В УМЗ материале расстояние между границами зерен значительно меньше, поэтому дислокации быстрее достигают противоположной границы зерна и аннигилируют. Этим можно объяснить небольшую стадию деформационного упрочнения в УМЗ образцах и, соответственно, малую величину однородной деформации.



**Рис. 5.** Сплав АК4-1 с УМЗ структурой: *а, б* – очаг разрушения на парных изломах (стрелки – локальные направления роста трещины)

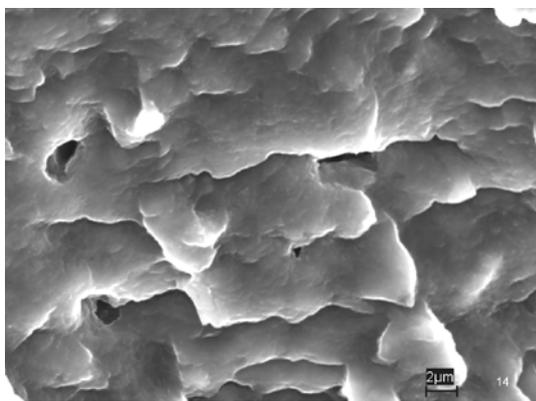


а

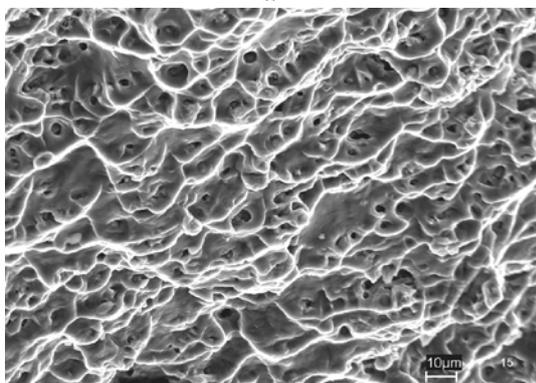


б

**Рис. 6** – Микрорельеф излома сплава АК4-1 с УМЗ структурой: а – на участке 1; б – на участке 2 (рис.4)

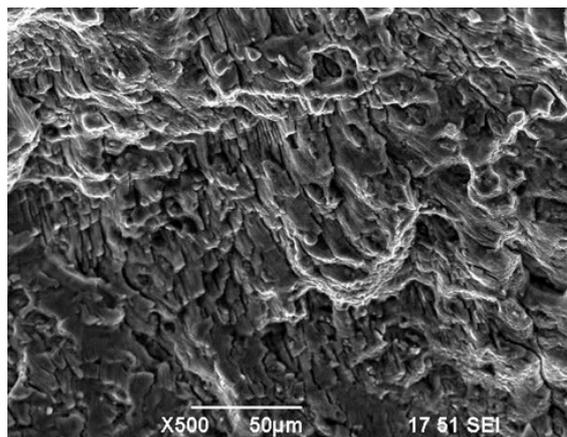


а



б

**Рис. 7.** Микрорельеф излома сплава АК4-1 с УМЗ структурой: а – на участке 3; б – на участке 4 (рис. 4)



**Рис. 8.** Микрорельеф излома сплава АК4-1 с УМЗ структурой

Циклическая долговечность материалов складывается из стадии зарождения и стадии распространения усталостной трещины. Первая стадия вносит основной вклад в долговечность образцов во время испытаний на растяжение – сжатие [9]. Повышение предела выносливости УМЗ сплава на 15%, вероятно, связано с увеличением длительности обеих стадий, т.е. за счет повышения сопротивления материала зарождению трещины и увеличения способности сопротивляться ее развитию. Увеличение стадии зарождения усталостной трещины при переходе от КЗ к УМЗ состоянию может быть обусловлено повышением сопротивления микропластической деформации приповерхностного слоя, которая происходит на стадии микротекучести в начальный период циклических испытаний [10]. На этой стадии циклического деформирования, как и в условиях статического нагружения, изменяется дислокационная структура: на границах зерен генерируются новые дислокации; в отдельных зернах наблюдаются дислокационные сплетения, что приводит к формированию более прочного приповерхностного слоя, который является барьером для выхода дислокаций на поверхность, в результате чего тормозится развитие процессов повреждаемости [10]. В ультрамелкозернистом материале образование и передвижение новых дислокаций затруднено вследствие маленького размера зерен и присутствующих полей упругих напряжений, вызванных высокой плотностью дислокаций, внесенных интенсивной пластической деформацией [4].

В связи с этим напряжение, необходимое для развития микропластической деформации, и величина предела выносливости возрастает с уменьшением размера зерна.

Увеличение стадии распространения усталостной трещины, вероятно, связано с повышением сопротивления материала ее развитию за счет увеличения протяженности границ зерен и наличием дисперсных частиц, которые являются эффективным барьером при ее распространении [10], а также за счет снижения скорости распространения усталостной трещины, что подтверждается результатами фрактографического анализа поверхности разрушения.

В частности, были выявлены отличительные особенности усталостного разрушения сплава в КЗ и УМЗ состояниях.

Среднее расстояние между усталостными бороздками в УМЗ материале меньше, чем в КЗ, что может свидетельствовать о меньшей скорости распространения усталостной трещины в УМЗ сплаве [11].

Известно, что за каждый цикл испытания образуется одна усталостная бороздка, а среднее расстояние между ними соответствует среднему перемещению фронта трещины за один цикл испытания, что позволяет оценивать локальную скорость роста усталостной трещины [12].

В УМЗ образцах, разрушившихся в области многоциклового усталости, наблюдалось больше вторичных трещин, расположенных вдоль усталостных бороздок, чем в КЗ. Образование вторичных микротрещин, перпендикулярных главным, является одним из механизмов сопротивления распространению усталостной трещины. Появление вторичных трещин снижает движущую силу распространения магистральной трещины, т.к. вызывает снятие напряжений и затормаживает ее развитие [13].

Ямки зоны статического долома в УМЗ образцах намного меньше, чем в КЗ, и имеют меньшую глубину, что свидетельствует о более плоском рельефе, следовательно, о меньшей вязкости разрушения. Это, вероятно, связано с меньшей пластичностью УМЗ сплава при статическом растяжении.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выявлены основные особенности усталостного разрушения сплава в КЗ и УМЗ состояниях сплава. Показано, что УМЗ образцы имели повышенное сопротивление распространению усталостной трещины, а также более вязкий характер усталостного разрушения, но при этом более хрупкое статическое разрушение.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Producing** bulk ultrafine-grained materials by severe plastic deformation / R. Valiev [et al.] // *JOM*. 2006. P. 33–39 [ R. Valiev, et. al. "Producing bulk ultrafine-grained materials by severe plastic deformation", in *JOM*, pp. 33-39, 2006. ]
2. **Valiev R. Z., Islamgaliev R. K., Alexandrov I. V.** Bulk nanostructured materials from severe plastic deformation // *Prog. Mat. Sci.* 2000. V. 45. P.103–189 [ R.Z. Valiev, R.K. Islamgaliev, I. V. Alexandrov, "Bulk nanostructured materials from severe plastic deformation", in *Prog.Mat.Sci.*, vol 45. pp.103-189, 2000. ]
3. **Valiev R., Zhilyaev A, Langdon T.** Bulk Nanostructured Materials: Fundamentals and Applications. The Minerals, Metals & Materials Society, 2014, John Wiley & Sons, P. 512 [ R. Valiev, A Zhilyaev, T. Langdon, "*Bulk Nanostructured Materials: Fundamentals and Applications*". The Minerals, Metals & Materials Society. John Wiley & Sons, 2014. ]
4. **Estrin Y., Vinogradov A.** Fatigue behaviour of light alloys with ultrafine grain structure produced by severe plastic deformation: An overview // *International Journal of Fatigue*. 2010, 32. P. 898–907 [ Y. Estrin , A. Vinogradov, "Fatigue behaviour of light alloys with ultrafine grain structure produced by severe plastic deformation: An overview", in *International Journal of Fatigue*, vol. 32, pp. 898-907, 2010. ]
5. **Кишкина С. И.** Сопротивление разрушению алюминиевых сплавов. М.: Metallurgy, 1981, 280 с. [ S. I. Kishkina, *Resistance to the destruction of aluminum alloys* (in Russian). Moscow: Metallurgy, 1981. ]
6. **Khafizova E., Islamgaliev R., Sitdikov V.** Strength and fatigue of an ultrafine-grained Al-Cu-Mg alloy // *MATEC Web of Conferences*. 2017. V. 129. 02039. DOI: 10.1051/mateconf/201712902039 [ E. Khafizova, R. Islamgaliev, V. Sitdikov. "Strength and fatigue of an ultrafine-grained Al-Cu-Mg alloy", in *MATEC Web of Conferences*, vol. 129, 02039, 2017. DOI: 10.1051/mateconf/201712902039 ]
7. **Хафизова Э. Д., Исламгалиев Р. К., Ситдикова В. Д.** Влияние интенсивной пластической деформации на структуру и механические свойства алюминиевого сплава АК4-1//Деформация и разрушение материалов. 2015. № 6. С. 25–29. [ E. D. Khafizova, P. K. Islamgaliyev, V.D. Sitdikov. "Effect of severe plastic deformation on structure and mechanical properties of aluminum alloy AK4-1" (in Russian). in *Deformation and Fracture of Materials*, vol. 6, pp. 25-29, 2015. ]
8. **Microstructure**, strength and fatigue of an ultrafine-grained Al-Cu-Mg alloy / E. Khafizova [et al.] // *Materials Physics and Mechanics*. 2015. V 24. P. 232–241. [ E. Khafizova,

et. al., "Microstructure, strength and fatigue of an ultrafine-grained Al-Cu-Mg alloy", in *Materials Physics and Mechanics* vol. 24, pp. 232–241, 2015. ]

9. **Виноградов, А. Ю., Хасимото С.** Усталость ультрамелкозернистых материалов, полученных равноканальным угловым прессованием // *Металлы*. 2004. Т. 1. С. 51–62. [ A. Vinogradov, S. Hashimoto, "Fatigue of ultrafine-grained materials obtained by equal-channel angular pressing" (in Russian), in *Metally*, vol. 1, pp. 51–62, 2004. ]

10. **Терентьев В. Ф.** Усталость металлических материалов. М.: Наука, 2002. 248 с. [ V. F. Terentyev, *Fatigue of metal materials*, (in Russian). Moscow: Science, 2002. ]

11. **Kim W., Hyun C., Ki H.** Fatigue strength of ultrafine-grained pure Ti after severe plastic deformation // *Scripta Materialia*. 2006. V. 54. P. 1745–1750. [ W. Kim, C. Hyun, H. Ki, "Fatigue strength of ultrafine-grained pure Ti after severe plastic deformation", in *Scripta Materialia*, vol. 54, pp. 1745–1750, 2006. ]

12. **Соснин О. В., Иванов Ю. Ф., Целлермаер В. В.** Поверхность разрушения стали 60ГС2, подвергнутой усталостным испытаниям в условиях промежуточного электростимулирования // *Физическая мезомеханика*. 2003. Т. 6(3). С. 91–97. [ O. V. Sosnin, Y. F. Ivanov, V. V. Zellermaier, "The surface of failure of 60GS2 steel subjected to fatigue tests under conditions of intermediate electrostimulation", (in Russian), in *Physical mesomechanics*, vol. 6 (3), pp. 91–97, 2003. ]

13. **Niinomi M., Saga A., Fukunaga K.** Long crack growth behavior of implant material Ti–5Al–2.5Fe in air and simulated body environment related to microstructure // *International Journal of Fatigue*. 2000. V.22. P. 887 – 897. [ M. Niinomi, A. Saga, K. Fukunaga, "Long crack growth behavior of implant material Ti–5Al–2.5Fe in air and simulated body environment related to microstructure", in *International Journal of Fatigue*, vol. 22, pp. 887–897, 2000. ]

#### ОБ АВТОРАХ

**ХАФИЗОВА Эльвира Динифовна**, дипл. инженер (УГАТУ 2012 г.) по специальности «Наноматериалы», к.т.н. по специальности «Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов», мл. науч. сотр. НИИ ФПМ. Иссл. ультрамелкозернистых материалов и их свойств, полученных методами интенсивной пластической деформацией.

**ИСЛАМГАЛИЕВ Ринат Кадыханович**, проф. каф. МиФМ института АТМ УГАТУ. Физик, препод. (БГУ, 1980). Д-р. физ.-мат. наук по специальности «Физика конденсированного состояния» (ИФМК, 1999). Иссл. ультрамелкозернистых материалов и их свойств, полученных методами интенсивной пластической деформацией.

**НИКИТИНА Марина Александровна**, дипл. инж.-технолог (УГАТУ, 2005) по специальности «Реновация средств и объектов материального производства», мл. науч. сотр. НИИ ФПМ. Иссл. в обл. ультрамелкозернистых сталей и сплавов на основе TiAl, полученных методами интенсивной пластической деформации.

**ЮДАХИНА Анна Анатольевна**, дипл. инженер (УГАТУ, 2012) по специальности «Наноматериалы». Иссл. ультрамелкозернистых материалов и их свойств, полученных методами интенсивной пластической деформацией.

#### METADATA

**Title:** Influence of the ultrafine-grained structure on the fatigue fracture behavior of an aluminum alloy of the Al-Cu-Mg system.

**Authors:** E. D.Khafizova<sup>1</sup>, R. K. Islamgaliev<sup>2</sup>, M. A. Nikitina<sup>3</sup>, A. A. Yudakhina<sup>4</sup>

**Affiliation:**

Ufa State Aviation Technical University (UGATU), Russia.

**Email:** <sup>1</sup>90@mail.ru, <sup>2</sup>rinatis@mail.ru, <sup>3</sup>nik.marina.al@gmail.com, <sup>4</sup>a.yudahina@mail.ru

**Language:** Russian.

**Source:** Vestnik UGATU (scientific journal of Ufa State Aviation Technical University), vol. 22, no. 1 (80), pp. 18–24, 2018. ISSN 2225-2789 (Online), ISSN 1992-6502 (Print).

**Abstract:** The effect of ultrafine-grained structure on the character of destruction of an aluminum alloy sistem Al-Cu-Mg (AK4-1) after fatigue tests was studied. Ultrafine-grained structure was obtained by the method of severe plastic deformation - equal-channel angular pressing, which allowed to increase the strength and fatigue properties of the material by 20%. Fatigue tests were carried out under the tension-compression scheme. The study of fatigue fractures was carried out by scanning electron microscopy. Small differences in the fractures of the structures under investigation were revealed.

**Key words:** fracture; fatigue strength; ultrafine-grained structure; aluminum alloy, equal angular pressing.

**About authors:**

**КНАФИЗОВА, Elvira Dinifovna**, Dipl. Engineer (UGATU, 2012) in «Nanomaterials», candidate of technical sciences on the specialty "Metallurgy and heat treatment of metals and alloys". Junior Researcher at IPAM USATU. Research on ultrafine-grained materials produced by severe plastic deformation, and their properties.

**ИСЛАМГАЛИЕВ, Rinat Kadyhanovich**, Professor of the Department of Material Science and Physics of Metals of Ufa State Aviation Technical University. Physicist, lecturer (Bashkir State University, 1980), Doctor's Degree in Physics and Mathematics in the specialty "Physics of Condensed Matter" (Institute of Physics of Molecules and Crystals, 1999). Research on ultrafine-grained materials produced by severe plastic deformation, and their properties.

**НИКИТИНА, Marina Aleksandrovna**, Dipl. Engineer (UGATU, 2005) in «Renovation of the means and facilities of material production», Junior Researcher at IPAM USATU. Research in the field of ultrafine-grained TiAl-based steels and alloys produced by severe plastic deformation

**YUDAKHINA, Anna Anatolyevna**, Dipl. Engineer (UGATU, 2012) in «Nanomaterials». Research on ultrafine-grained materials produced by severe plastic deformation, and their properties.