

УДК 669.71

ПРОЧНОСТЬ И МЕХАНИЗМ РАЗРУШЕНИЯ АЛЮМИНИЕВОГО СПЛАВА АК4-1 В СУБМИКРОКРИСТАЛЛИЧЕСКОМ СОСТОЯНИИ ПРИ СТАТИЧЕСКОМ И УДАРНОМ НАГРУЖЕНИЯХ

¹Клевцов Г.В., ²Валиев Р.З., ²Исламгалиев Р.К., ³Клевцова Н.А., ²Хафизова Э.Д.,
¹Мерсон Е.Д., ¹Пигалева И.Н.

¹Тольяттинский государственный университет, Тольятти, e-mail: Klevtsov11948@mail.ru;

²Институт физики перспективных материалов УГТУ, Уфа, e-mail: RZValiev@mail.rb.ru;

³Оренбургский государственный университет, Оренбург, e-mail: inshtet@mail.ru

Проведенные исследования показали, что алюминиевый сплав АК4-1 в субмикроструктурном состоянии, полученном путем равноканального углового прессования (РКУП), имеет более высокую твердость и прочностные свойства, однако более низкую пластичность по сравнению с состоянием Т6 (закалка + старение). Ударная вязкость (KCV) сплава при обоих способах обработки (РКУП и Т6) не изменяется в интервале температур от -196 до 180 °С, а затем незначительно повышается при температуре испытания 300 °С. Причем при всех температурах испытания ударная вязкость сплава после РКУП практически не отличается от ударной вязкости в состоянии Т6, хотя и имеет несколько более высокие значения. В отличие от состояния Т6 ударное разрушение сплава АК4-1 в субмикроструктурном состоянии при всех исследуемых температурах испытания вплоть до -196 °С характеризуется наличием в очаге разрушения вязкой зоны θ и ямочным микрорельефом в центральной части излома.

Ключевые слова: алюминиевый сплав, равноканальное угловое прессование, структура, прочность, субмикроструктурное состояние, ударная вязкость, механизм разрушения

STRENGTH AND FRACTURE MECHANISM OF SUBMICROCRYSTALLINE ALUMINUM ALLOY AK4-1 UNDER STATIC AND IMPACT LOADING

¹Klevtsov G.V., ²Valiev R.Z., ²Islamgaliev R.K., ³Klevtsova N.A., ²Khafizova E.D.,
¹Merson E.D., ¹Pigaleva I.N.

¹Togliatty State University, Togliatti, e-mail: Klevtsov11948@mail.ru;

²Institute of Physics of Advanced Materials, Ufa State Aviation Technical University,
Ufa, e-mail: RZValiev@mail.rb.ru;

³Orenburg State University, Orenburg, e-mail: inshtet@mail.ru

In this study the mechanical properties of the submicrocrystalline (SMC) aluminum alloy AK4-1 obtained by the equal-channel angular pressing (ECAP) was investigated during static and impact testing. It was shown that SMC aluminum alloy AK4-1 has a higher strength and hardness but lower ductility compared with the T6 (quenching and aging) state. Impact toughness (KCV) of the alloy in the both states (SMC and T6) remains a constant in the temperature range of -196-180 °C and it slightly grows up at 300 °C. Moreover the impact toughness for the both SMC and T6 type specimens is almost the same with a little higher value for the SMC state. In contrast to the T6 state the fracture micro relief of the impact tested SMC specimens in a whole range of temperatures is featured by the presence of the both ductile zone θ at the point of the fracture initiation and the ductile dimples in a central part of fracture surface.

Keywords: aluminum alloy, equal-channel angular pressing, microstructure, strength, submicrocrystalline state, fracture toughness, fracture mechanism

В последнее время повышенный интерес представляет новый класс перспективных конструкционных металлических материалов с субмикроструктурной структурой, полученной путем использования методик интенсивной пластической деформации (ИПД), например, путем равноканального углового прессования (РКУП) [1]. Обладая уникальными свойствами, они уже сейчас находят практическое применение во многих областях техники. Однако широкое использование таких материалов предполагает расширение наших представлений о физической природе прочности и механизмах разрушения при различных видах и условиях нагружения. Ранее, в работе [2] было показано, что при ударном

нагружении механические свойства сплава с ГЦК структурой в субмикроструктурном состоянии слабо зависят от температуры испытания.

Целью настоящей работы является исследование прочности и механизмов разрушения алюминиевого сплава АК4-1 в субмикроструктурном состоянии (после РКУП) в широком интервале температур при статическом и ударном нагружении в сравнении со стандартной обработкой сплава, **включающей закалку и старение.**

Материал и методики исследования

В качестве исследуемого материала был использован термически упрочняемый алюминиевый сплав АК4-1 (табл. 1).

Таблица 1

Химический состав сплава АК4-1 (в % по массе)

Cu	Mg	Ni	Si	Fe	Mn	Cr	Zn	Ti
2,32	1,65	1,04	0,06	0,10	0,047	0,003	0,017	0,020

Алюминиевый сплав АК4-1 в исходном горячекатаном состоянии (пруток диаметром 40 мм) имел средний размер зерна 40 мкм. Данный сплав исследовали в двух состояниях: после РКУП и после стандартной обработки Т6 (закалка + старение).

Для получения субмикроструктурной структуры сплав подвергали равноканальному угловому прессованию (РКУП) [1] при температуре 160 °С, 6 проходов (угол $\phi = 90^\circ$). Диаметр прутка заготовки после РКУП составлял 28 мм. Средний размер зерна после вышеуказанной обработки (РКУП) составил 300 нм.

Стандартная обработка (Т6) включала нагрев до температуры 530 °С, выдержку при этой температуре в течение одного часа, закалку в воде, старение при температуре 190 °С в течение 7 часов, охлаждение на воздухе.

Определение стандартных характеристик исследуемого материала при статическом растяжении проводили на круглых образцах диаметром 5 мм. Испытание проводили на универсальной испытательной машине Н50КТ. Испытания сплава на твердость проводили на твердомере ТН 300. Ударные испытания образцов с V-образным концентратором напряжения

проводили на копре JB-W300 с энергией маятника 150Дж в интервале температур от -196 до 300 °С. Охлаждение и нагрев образцов до нужных температур проводили в жидком азоте и в климатической камере INSTRON C3106366, обеспечивающей интервал температур от -100 до +350 °С. Образцы охлаждали или нагревали в климатической камере согласно ГОСТ 9454-78, затем переносили на копер и разрушали. Время с момента извлечения образца из камеры до удара маятника не превышало 5 с.

Макростроение ударных изломов исследовали с помощью **конфокального сканирующего микроскопа** LextOLS4000; микростроение – в растровом электронном микроскопе SIGMA фирмы «ZEISS».

Результаты исследования и их обсуждение

Испытания на твердость и растяжение показали, что сплав АК4-1 после РКУП имеет более высокую твердость и прочность, однако более низкую пластичность по сравнению с состоянием Т6 (закалка + старение) (табл. 2).

Таблица 2

Механические свойства сплава АК4-1 в различном состоянии

Состояние	НВ	σ_b , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ , %
После РКУП	126	460	420	8
Т6	122	370	320	16

Ударная вязкость (KCV) сплава АК4-1 после РКУП при всех температурах испытания практически не отличается от ударной вязкости сплава в состоянии Т6, хотя и имеет несколько более высокие значения (рис. 1).

Причем ударная вязкость после обоих способов обработки не изменяется в интервале температур от -196 до 180 °С, а затем noticeably повышается при температуре испытания 300 °С.

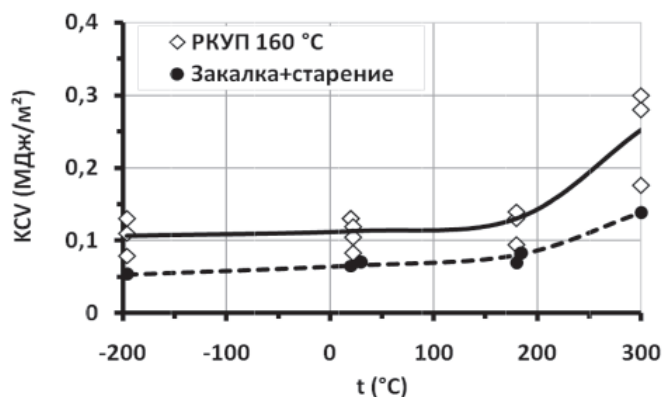


Рис. 1. Температурная зависимость ударной вязкости сплава АК4-1 после РКУП и в состоянии Т6 (закалка + старение)

Все ударные изломы образцов из сплава АК4-1 состоят из сравнительно плоской центральной части, губ среза и периферийной

области сжатия в месте удара ножа копра [3]. На изломах образцов из сплава после РКУП, полученных при температуре испытания

–196°С, губы среза практически отсутствуют (рис. 2, а). На изломах, полученных при более высоких температурах испытания, губы среза занимают 30–35% площади изломов. С повышением температуры испытания шероховатость центральной части изломов повышается (рис. 2, б, в). На изломах образ-

цов из сплава в состоянии Т6 (рис. 2, г-е) размер губ среза и шероховатость центральной части изломов также увеличиваются с повышением температуры испытания, однако шероховатость изломов сплава после РКУП ниже, чем шероховатость изломов сплава в состоянии Т6 (рис. 2, а-е).

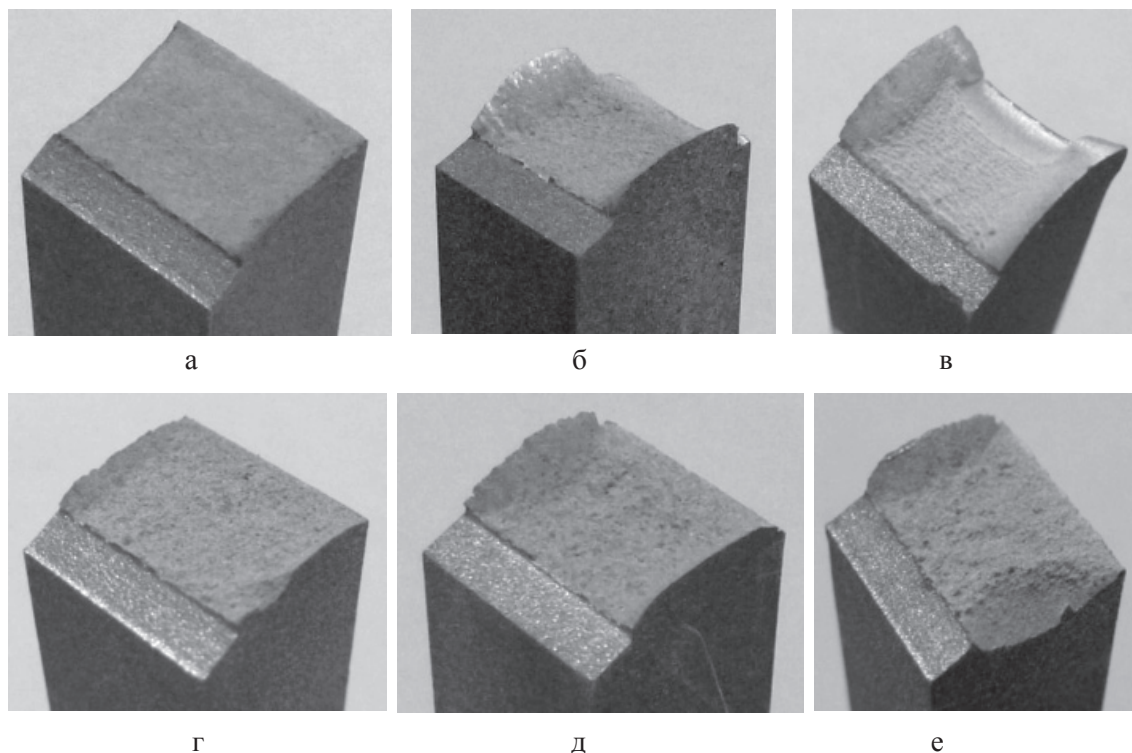


Рис. 2. Общий вид ударных изломов сплава АК4-1 после РКУП (а, б, в) и в состоянии Т6 (г, д, е). Изломы получены при температурах: –196°С (а, з), 20°С (б, д) и 300°С (в, е)

Микрофрактографические исследования показали, что в очаге разрушения всех ударных изломов сплава АК4-1 после РКУП можно выделить зону вытяжки θ [3] длиной примерно 100 мкм, в которой ямки чередуются с плоскими участками (рис. 3, а-в). Так, в очаге разрушения изломов, полученных при температуре –196°С, можно наблюдать ямки и характерный микрорельеф плоских участков (рис. 3, а). В центральной части таких изломов микрорельеф ямочный; ямки неправильной формы и неглубокие (рис. 3, г). На дне многих ямок можно наблюдать округлые частицы.

В очаге разрушения изломов, полученных при температуре испытания 20°С, также можно наблюдать ямки, чередующиеся с плоскими участками. При большом увеличении (рис. 3, б) виден характерный гребневидный микрорельеф плоских участков. В центральной части изломов микрорельеф ямочный с округлыми частицами на дне ямок (рис. 3, д).

Очаг разрушения изломов, полученных при температуре испытания 300°С, состоит

из ямок, пор и плоских участков со складчатым микрорельефом (рис. 3, в). В центральной части изломов микрорельеф также ямочный (рис. 3, е) с округлыми частицами на дне ямок.

Таким образом, можно заключить, что ударное разрушение сплава АК4-1 в субмикроструктурном состоянии при всех исследуемых температурах испытания начинается с образования вязкой зоны вытяжки θ с характерным микрорельефом, состоящим из ямок, чередующихся с плоскими участками. Центральная часть всех изломов ямочная. Причем с повышением температуры испытания ямки на поверхности изломов становятся более округлыми и глубокими. На дне многих ямок можно наблюдать частицы размером от 1 до 10 мкм округлой формы (рис. 4, а, б).

По данным микрорентгеноспектрального анализа (рис. 5) эти частицы содержали в основном алюминий, железо, никель и медь, то есть относились к упрочняющим фазам, например Al_2Cu и Al_3FeNi [4, 5].

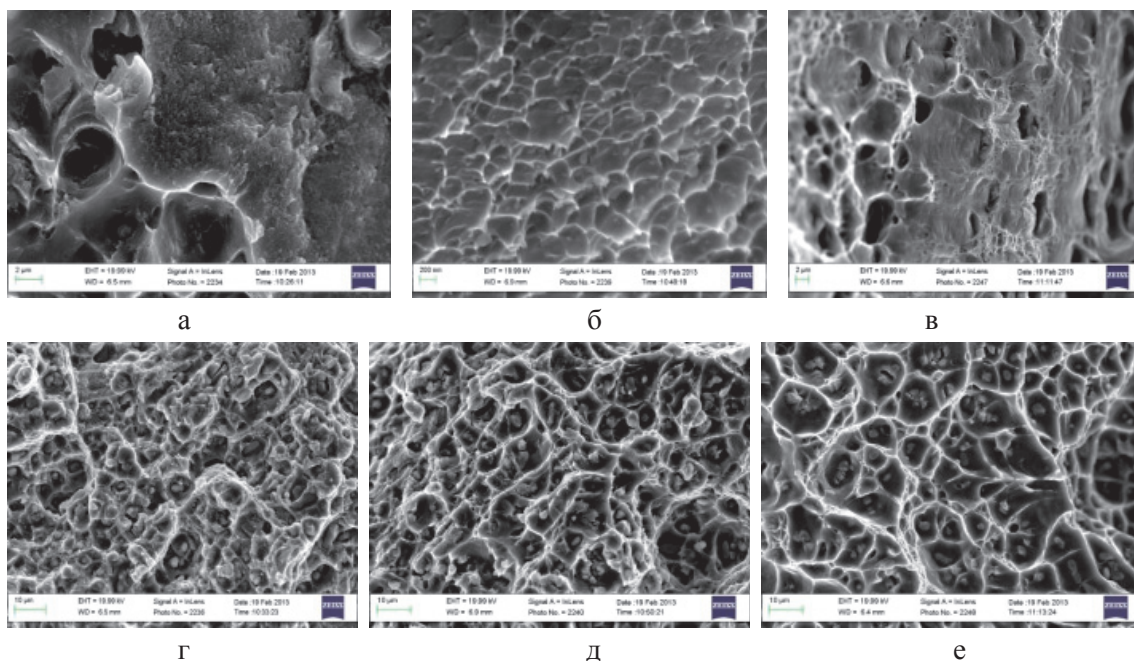


Рис. 3. Микрорельеф ударных изломов сплава АК4-1 после РКУП в очаге разрушения (а-в) и в центральной части (г-е). Изломы получены при температурах: -196°C (а, г), 20°C (б, д) и 300°C (в, е):
а – $\times 4000$; б – $\times 26000$; в – $\times 2000$; г-е – $\times 1000$

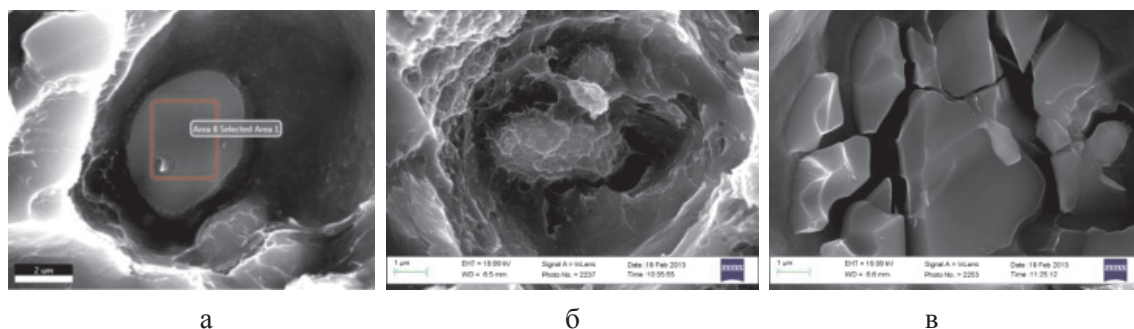


Рис. 4. Частицы в центре ямок ударных изломов сплава АК4-1 после РКУП (а, б) и разрушившейся плоский фрагмент, наблюдаемый в центре ямок ударных изломов сплава в состоянии Т6. Температура испытания 300°C (в):
а-в – $\times 10000$

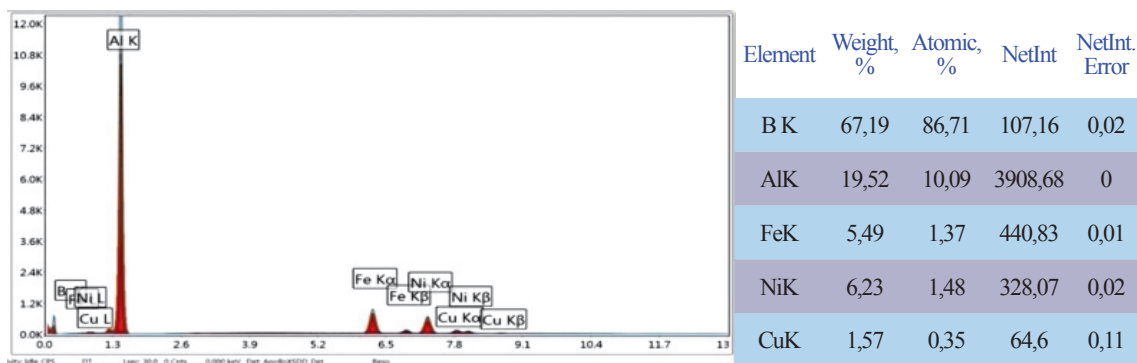
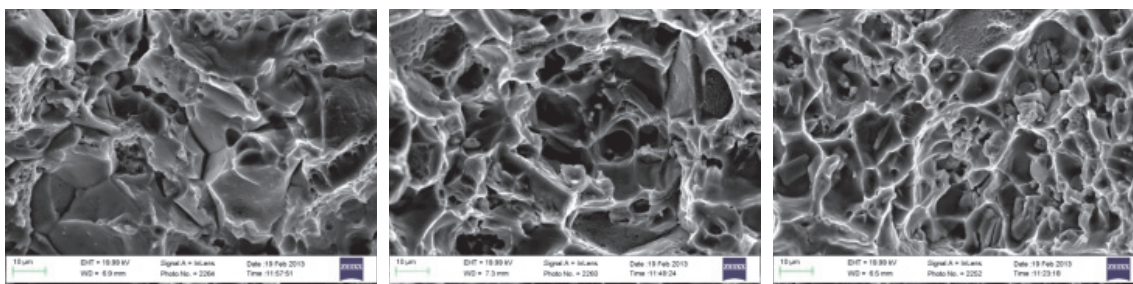


Рис. 5. Результаты микрорентгеноспектрального анализа частицы, представленной на рис. 4, а

На поверхности всех ударных изломов сплава АК4-1 в состоянии Т6 вязкая зона вытяжки θ отсутствует. Основной микрорельеф изломов начинается сразу за надрезом. Так, разрушение сплава при температуре -196°C произошло по смешанному механизму: межзеренное хрупкое разрушение чередуется с ямочным микрорельефом; по границам зерен видны трещины (рис. 6, а). На поверхности изломов, полученных при

температуре испытания 20°C , сразу за надрезом микрорельеф ямочный с плоскими фасетками межзеренного хрупкого разрушения (рис. 6, б). На поверхности изломов, полученных при температуре 300°C , микрорельеф ямочный. В центре некоторых ямок видны хрупко разрушившиеся частицы. На рис. 4 в представлен разрушившийся плоский фрагмент, наблюдаемый в центре ямки.



а б в
Рис. 6. Микрорельеф центральной части ударных изломов сплава АК4-1 в состоянии Т6. Изломы получены при температурах: -196°C (а); 20°C (б); 300°C (в); а–в – $\times 1000$

Выводы

1. Сплав АК4-1 после РКУП имеет более высокую твердость и прочность, однако более низкую пластичность по сравнению с состоянием Т6 (закалка + старение).

2. Ударная вязкость (КСВ) сплава как после РКУП, так и после Т6 не изменяется в интервале температур от -196 до 180°C , а затем незначительно повышается при температуре испытания 300°C . Причем при всех температурах испытания ударная вязкость сплава после РКУП практически не отличается от ударной вязкости в состоянии Т6, хотя и имеет несколько более высокие значения.

3. В отличие от состояния Т6 (закалка + старение), ударное разрушение сплава АК4-1 в субмикроструктурном состоянии при всех исследуемых температурах испытания вплоть до -196°C характеризуется наличием в очаге разрушения вязкой зоны вытяжки θ и ямочным микрорельефом в центральной части изломов.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект 11-08-00208) и ФЦП (госконтракт № 14.513.11.0041).

Список литературы

1. Валиев Р.З., Александров И.В. Объемные наноструктурные металлические материалы. – М.: ИКЦ «Академкнига», 2007. – 398 с.
2. Прочность и механизм наноструктурированного алюминиевого сплава АК4-1 в широком интервале разрушения температур / Г.В. Клевцов, Р.З. Валиев, Р.К. Исламгалиев, Н.А. Клевцова, М.Р. Кашапов, М.В. Фесенюк // Фундаментальные исследования. – 2012. – № 3. – Ч. 2. – С. 391–395.

3. Фрактодиагностика разрушения металлических материалов и конструкций / Г.В. Клевцов, Л.Р. Ботвина, Н.А. Клевцова, Л.В. Лимарь. – М.: МИСиС, 2007. – 264 с.

4. Промышленные алюминиевые сплавы: справочник. – М.: Metallurgia, 1984. – 528 с.

5. Прочность и усталость ультрамелкозернистого алюминиевого сплава АК4-1 / Р.К. Исламгалиев, К.М. Нестеров, Э.Д. Хафизова, А.В. Ганеев, Е.Р. Голубовский, М.Е. Волков // Вестник УГАТУ, 2012. – Т. 16, № 8 (53). – С. 104–109.

References

1. Valiev R.Z., Aleksandrov I.V. Obemnyye nanostrukturnyye metallicheskie materialy [Bulk nanostructured metallic materials]. Moscow, IKC «Akademkniga», 2007. 398 p.
2. Klevtsov G.V., Valiev R.Z., Islamgaliev R.K., Klevtsova N.A., Khashapov M.R., Fesenuk M.V. Strength and Fracture Mechanism of Nanostructured Ak4-1 Aluminum Alloy in A Wide Temperature Range. Fundamental research, 2012, no. 3, part 2, pp. 391–395.
3. Klevtsov G.V., Botvina L.R., Klevtsova N.A., Limar L.V. Fraktodiagnostika razrusheniy ametallicheskih materialov i konstruktсий [Fracture diagnostic of metallic materials and constructions]. Moscow, MISiS Publ., 2007. 264 p.
4. Promyshlennyye aluminievyye splavy [Industrial Aluminum Alloys]. Moscow, Metallurgia, 1984. 528 p.
5. Islamgaliev R.K., Nesterov K.M., Khafizova E.D., Ganeev A.V., Golubovskiy E.R., Volkov M.E. Prochnost' i ustalost' ul'tramelkozernistogo aljuminievogo splava AK4-1 [Strength and fatigue of ultrafine-grained aluminum-based alloy AK4-1]. Vestnik UGATU, 2012. Vol. 16, no. 8 (53). pp. 104–109.

Рецензенты:

Кушнаренко В.М., д.т.н., профессор, зав. кафедрой деталей машин и прикладной механики Оренбургского государственного университета, г. Оренбург;

Кучеренко М.Г., д.ф.-м.н., профессор, зав. кафедрой радиофизики и электроники Оренбургского государственного университета, г. Оренбург.

Работа поступила в редакцию 17.06.2013.