

УДК 669.715:539.3

## ИЗУЧЕНИЕ ПОРООБРАЗОВАНИЯ В СПЛАВЕ АК12Д С ПРИМЕНЕНИЕМ МЕТОДА АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ

В. В. АСТАНИН<sup>1</sup>, А. А. ШАХОВКИНА<sup>2</sup>, Ф. Ф. САФИН,  
М. О. МЕЛЬНИКОВ<sup>3</sup>, Р. М. МУХАМАДИЕВА<sup>4</sup>

<sup>1</sup>vvastanin@yandex.ru, <sup>2</sup>Girfeek@yandex.ru, <sup>3</sup>maks-meln@mail.ru, <sup>4</sup>ramilya2802@yandex.ru

ФГБОУ ВПО «Уфимский государственный авиационный технический университет» (УГАТУ)

*Поступила в редакцию 23 апреля 2014 г.*

**Аннотация.** Предположено, что увеличение пористости в структуре поршня из алюминиевого сплава АК12Д в процессе эксплуатации предопределено условиями изотермической штамповки при его изготовлении. Изучение сигналов акустической эмиссии при растяжении и структуры образцов показало, что первичные микротрещины возникают на ранней стадии деформации. Вариации температуры испытаний приводит к изменению амплитуды сигналов и акустической активности в целом. Повысить надежность поршня можно коррекцией напряженно-деформированного состояния при его изготовлении.

**Ключевые слова.** Поршень; порообразование; акустическая эмиссия; алюминиевый сплав; температура деформации; механические свойства.

### ВВЕДЕНИЕ

Поводом для исследования послужила значительная пористость, достигающая 15 % объема, обнаруженная в структуре поршня легкого авиационного мотора после неполного срока его эксплуатации. Развитие пористости способно привести к разрушению поршня и возникновению нештатной ситуации. Особенно важно обеспечить работоспособность поршня в условиях высоких температур и частот вращения, характерных для авиационных двигателей. Обеспечение надежности может быть заложено еще на стадии изготовления изделия, если понять природу кавитации и динамику ее развития. Для изготовления поршней используется жаропрочные алюминиевые сплавы системы Al-Si-Cu-Mg эвтектического и заэвтектического составов [1]. Несмотря на большое количество разносторонних работ, посвященных исследованию сплавов данной группы [2–5], причины возникновения пористости и разрушения до конца не изучены.

Цель исследования – установить причину и проследить динамику порообразования в сплаве, из которого изготовлен поршень<sup>1</sup>. Для этого

применен метод акустической эмиссии, существенно дополняющий информацию о процессах пластической деформации и разрушения материалов при испытании образцов [6].

### МАТЕРИАЛ И МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

Исследования проведены на деформируемом сплаве АК12Д с размером структурных элементов  $d = 21$  мкм. Структуру поршня и образцов сплава изучали до и после испытаний с помощью оптической (OLYMPUS GX 51) и растровой электронной (JSM–6390) микроскопии. Испытания образцов проводили на одноосное растяжение при температурах 380, 420 и 450° С на электромеханической машине INSTRON 8862 со скоростью перемещения захвата 1 мм/мин. Температура 380° С выбрана как максимально возможная температура эксплуатации, остальные – как технологические температуры изотермической штамповки.

стного упрочнения ответственных деталей из Al-сплавов с повышенной конструкционной энергоэффективностью» в рамках реализации Постановления № 218 Правительства РФ от 09.04.2010 г. Экспериментальные результаты получены с использованием оборудования НОЦ «Наноструктурные материалы и высокие технологии» ФГБОУ ВПО «УГАТУ».

<sup>1</sup> Работа выполнена в рамках проекта «Разработка и промышленное освоение координируемых технологий высокоточного формообразования и поверхно-

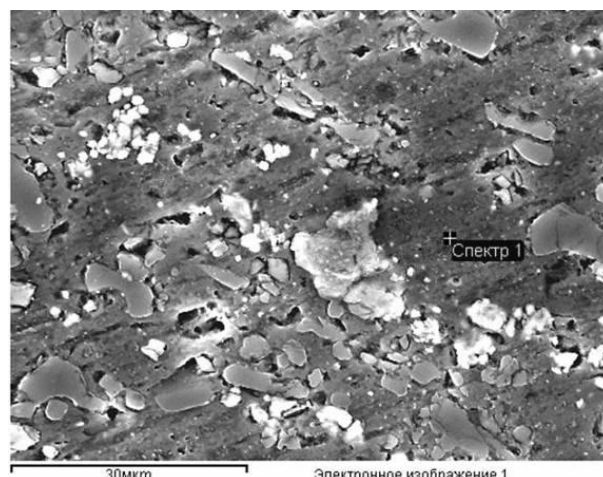
Регистрация сигналов АЭ проводилась лабораторным программно-аппаратным комплексом «Малахит АС-12А». Был использован преобразователь резонансного типа ДР15И. Собственные шумы машины и аппаратуры не превышали установленного порога чувствительности 25 дБ. Преобразователь устанавливали на специальной струбине, закрепленной на верхней тяге машины, одновременно служившей волноводом. Сигналы АЭ анализировали по амплитуде, энергии, продолжительности и частоте событий. Путем компьютерной обработки сигналы АЭ синхронизированы с диаграммами растяжения каждого конкретного образца, что позволило установить, на каких этапах растяжения возникают и развиваются микротрещины.

### РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

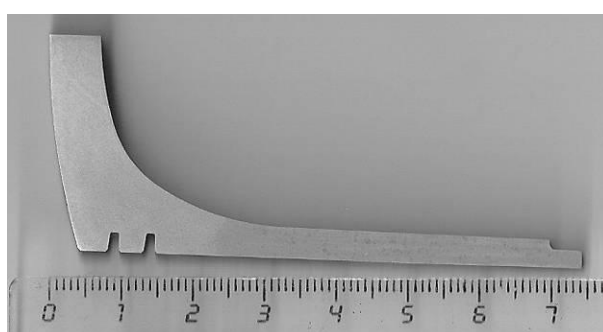
В структуре исследованного поршня (рис. 1), изготовленного из алюминиевого сплава АК12Д изотермической штамповкой и бывшего в эксплуатации, обнаружена пористость, не характерная ни для исходного материала (рис. 2), ни для поковок. Наиболее часто поры видны на межфазных границах. Этот факт не вызывает удивления, если принять во внимание значительную разницу коэффициентов термического расширения, а также модулей упругости кремния ( $109 \text{ ГН/м}^2$ ), интерметаллидов и алюминиевой матрицы ( $71 \text{ ГН/м}^2$ ). Привлекло внимание то, что в направляющей части поршня, – так называемой юбке, – пористость существенно выше (до 15 %), чем в донной части и в области кольцевых канавок (около 5 %).

Можно предположить, что образование пор предопределено условиями течения материала в процессе изотермической штамповки, в частности, характером напряженно-деформированного состояния. С помощью компьютерного моделирования штамповки поршня по схеме обратного выдавливания было установлено, что в процессе течения материала в стенке поршня напряженно-деформированное состояние изменяется от всестороннего сжатия до появления компонент растяжения (рис. 3). В этом случае можно ожидать образование микротрещин, особенно на поверхности раздела матрицы и кремниевых частиц, где они больше всего и присутствуют (рис. 1).

Для проверки этого предположения были испытаны на растяжение образцы сплава АК12Д при различных температурах с регистрацией сигналов АЭ.



а



б

Рис. 1. Фрагмент структуры стенки поршня (РЭМ) (а) и макротемплет макета поршня (б)

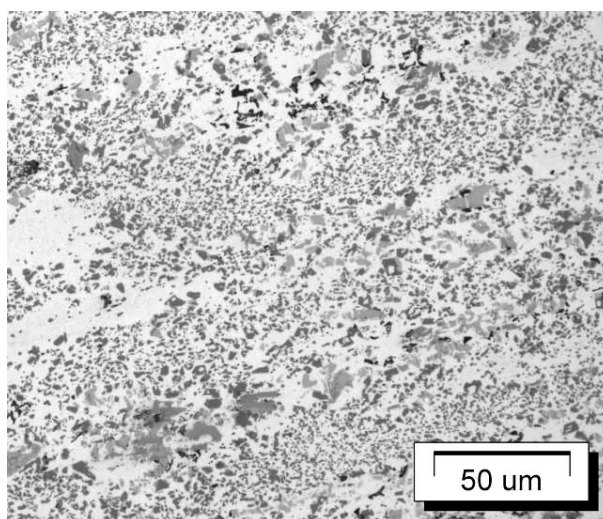


Рис. 2. Микроструктура сплава АК12Д в исходном сплаве

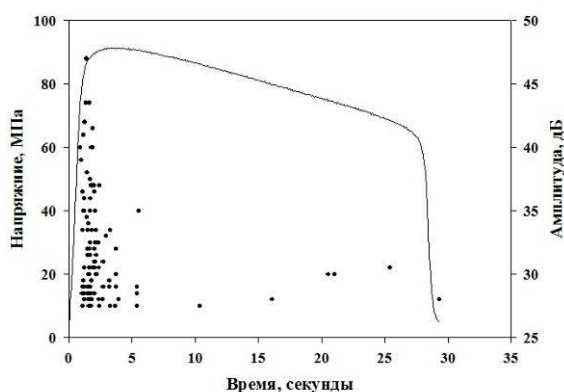
На рис. 4 показана диаграмма растяжения образца при температуре  $420^\circ \text{C}$ , совмещенная с диаграммой сигналов акустической эмиссии. Каждая точка означает отдельное событие, происходящее в данный момент времени и характеризующееся амплитудой сигнала. Хорошо видно, что акустическая активность проявляется уже на

начальной стадии деформации, не достигающей макроскопического предела текучести. Максимальное значение амплитуды сигналов и частоты событий соответствует достижению максимальных деформирующих напряжений. Далее, с началом пластического течения, акустическая активность быстро снижается. Второй пик активности с амплитудой сигналов не выше 30 дБ наблюдается в интервале степени деформации 18...26 %, то есть незадолго до разрушения образца.

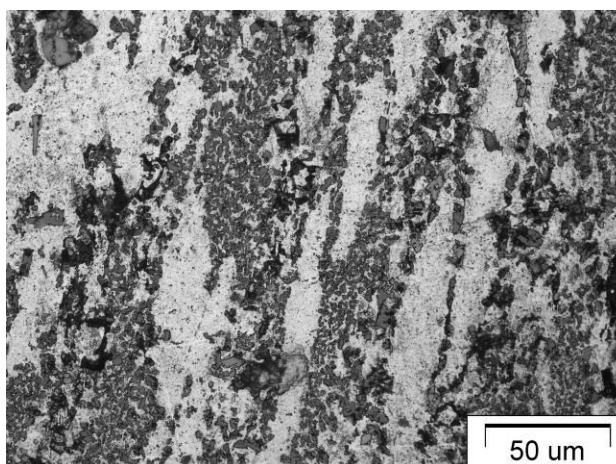
Деформационные характеристики сплава при данной температуре вполне удовлетворяют условиям штамповки, но акустическая активность свидетельствует о возникновении микротрещин. Их трудно обнаружить в структуре, но по мере деформации образца микротрещины растягиваются в поры, которые уже хорошо видны (рис. 4, б). В результате раскрытия пор происходит частичное снятие локальных напряжений, частота и энергия образования микротрещин снижается, о чем свидетельствует снижение акустической активности.



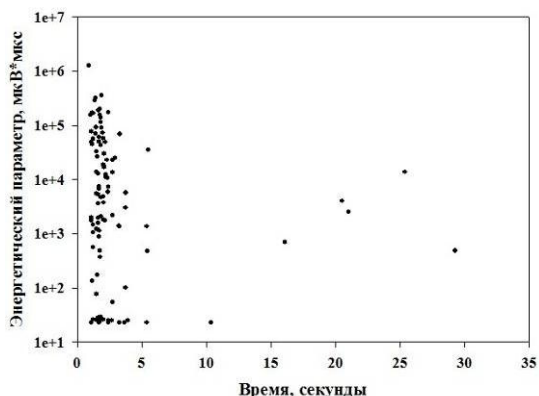
Рис. 3. Распределение главных напряжений в теле поршня



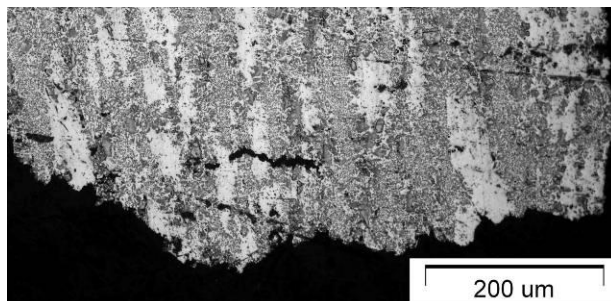
а



б



в



г

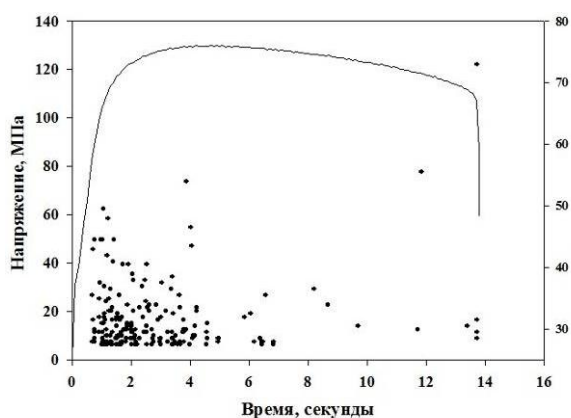
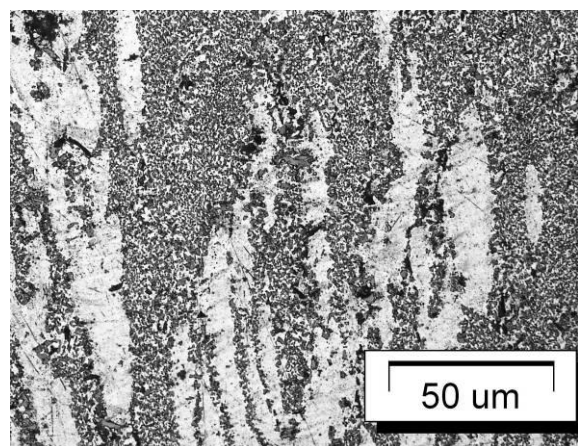
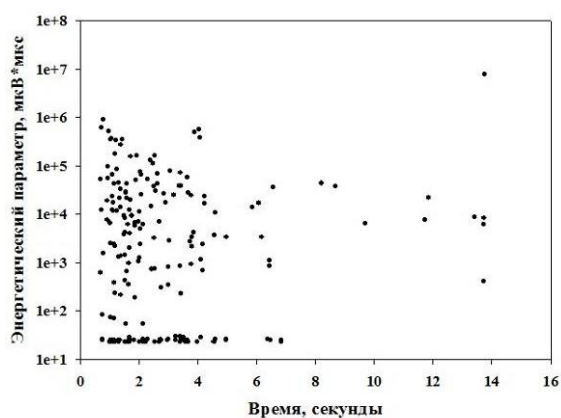
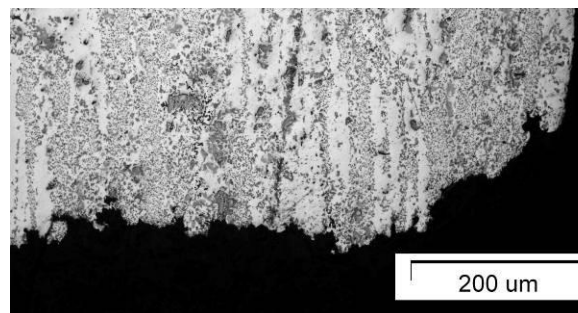
Рис. 4. Диаграмма растяжения образца, совмещенная с амплитудой сигналов акустической эмиссии при температуре 420° С (а), энергетический параметр акустической эмиссии (в) и микроструктура растянутого образца вдали (б) и вблизи поверхности разрушения (г)

Второе повышение акустической активности происходит в результате слияния пор в трещины и распространения магистральной трещины, приводящей к разрушению образца. Это видно по профилю поверхности излома и по структуре вблизи нее (рис. 4, *з*).

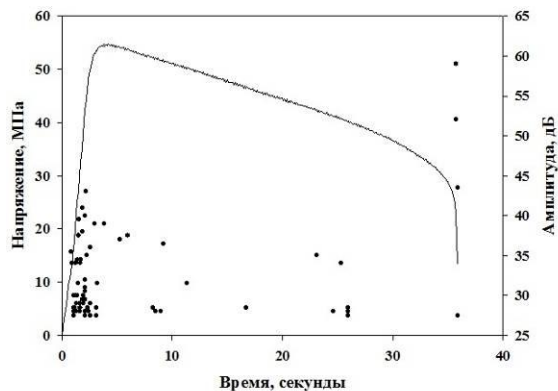
Температура 380° С выбрана как возможная максимальная температура эксплуатации. Здесь можно отметить, что напряжение, достигнув максимума, сохраняется почти на одном уровне до начала разрушения образца. Наибольшая акустическая активность, как и в первом случае, проявляется на начальной стадии пластического течения и связана с образованием первичных микротрещин. Образование микротрещин в единицу времени происходит чаще, тем самым уменьшая интенсивность акустических сигналов. На рис. 5 хорошо видны микротрещины, растягивающиеся в поры по мере удлинения образца. Механизм разрушения образца идентичен предыдущему. В результате слияния пор в трещины, распространение магистральной трещи-

ны приводит к разрушению образца. Это видно на рис. 5, *з* по профилю поверхности излома и по структуре вблизи нее.

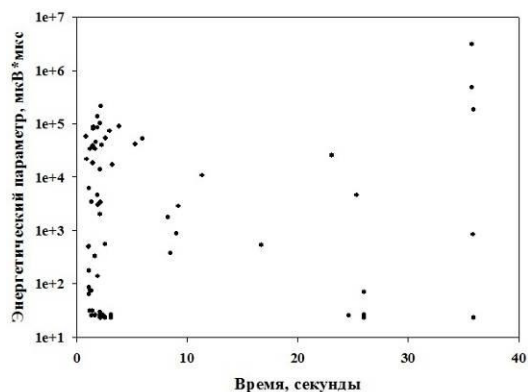
С увеличением температуры до 450° С (рис. 6) максимальные напряжения деформации снижаются до 55 МПа, а удлинение до разрушения возрастает до 35 %. Эти деформационные характеристики вполне удовлетворяют условиям штамповки, но и при этой температуре не исключается возникновение микротрещин. Существенное различие по сравнению с предыдущими образцами наблюдается на зависимости амплитуды и энергетического параметра сигналов АЭ (рис. 6, *а*, *в*). Амплитуда сигналов стала ниже – до 30 дБ (рис. 6, *а*), сократилось число событий, сигналы которых превышают установленный порог чувствительности.

*а**б**в**г*

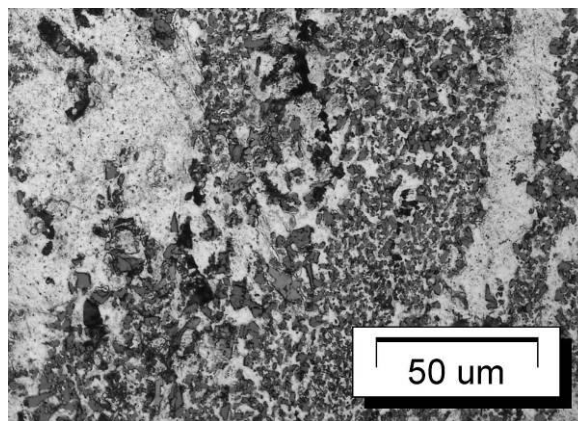
**Рис. 5.** Диаграмма растяжения образца, совмещенная с амплитудой сигналов акустической эмиссии при температуре 380° С (*а*), энергетический параметр акустической эмиссии (*в*) и микроструктура растянутого образца вдали (*б*) и вблизи поверхности разрушения (*г*)



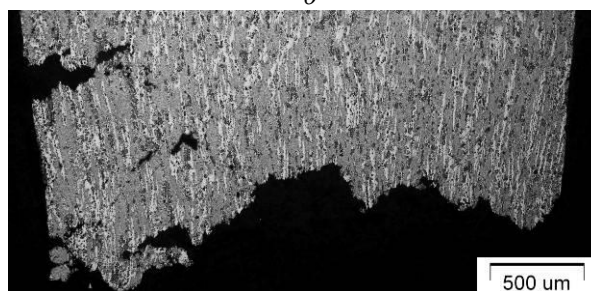
а



б



б



z

**Рис. 6.** Диаграмма растяжения образца, совмещенная с амплитудой сигналов акустической эмиссии при температуре  $450^{\circ}\text{C}$  (а), энергетический параметр акустической эмиссии (б) и микроструктура растянутого образца вдали (б) и вблизи поверхности разрушения (z)

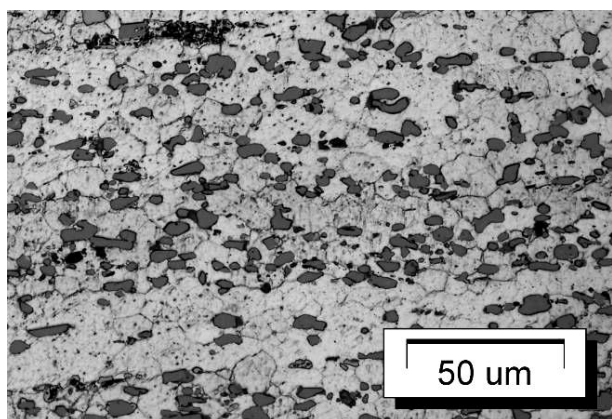
Метод АЭ показал, что образование первичных микротрещин во всех случаях происходит на ранних стадиях деформации. Первые микротрещины появляются в упругой области. Неприятность этого явления в том, что оно может происходить в процессе эксплуатации поршня в результате действия знакопеременных нагрузок и смены температур. Однако исследованные участки поршня (рис. 1) не испытывают нагрузок, близких к пределу текучести. Очевидно, что начальные микротрещины унаследованы от операции штамповки. Физически можно назвать две причины появления микротрещин на межфазных границах: различие коэффициентов теплового расширения (КТР) алюминиевой матрицы ( $22,2 \times 10^{-6} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$ ) и кремниевой фазы ( $5,1 \times 10^{-6} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$ ), и различие модулей упругости этих фаз, 70 и 109 ГПа соответственно. Учитывая приведенные константы, нетрудно показать, что в результате нагрева до  $420^{\circ}\text{C}$  термические напряжения в алюминиевой матрице, окружающей кремниевую частицу могут достигать предела текучести. В этих условиях устойчи-

вость материала к кавитации зависит от релаксационной способности матрицы. Минимизировать влияние физических характеристик возможно путем уменьшения размеров структурных элементов – зерен и субзерен. Важное влияние оказывает и повышение дисперсности упрочняющих фаз.

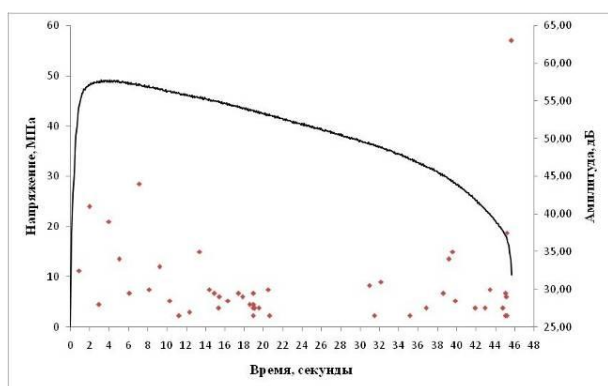
Для исследования роли подобной структуры были испытаны образцы из алюминиевого сплава АК12Д с размером структурных элементов  $d = 17 \text{ мкм}$  (рис. 7, а) при температуре  $450^{\circ}\text{C}$ . Результаты представлены на рис. 7, б. Здесь можно отметить существенное снижение напряжений течения материала в сравнении с предыдущим графиком (рис. 6, а) и снижение акустической активности, особенно на стадии начала пластической деформации. Последующая деформация протекает аналогичным образом.

Таким образом, если поры, возникающие при эксплуатации поршня, связаны с наличием микротрещин, полученных в результате штамповки, то снизить опасность повреждения мож-

но путем подготовки структуры исходной заготовки и оптимизацией режима штамповки.



а



б

**Рис. 7.** Микроструктура образца (а), диаграмма растяжения образца, совмещенная с амплитудой сигналов акустической эмиссии при температуре 450° С (б)

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Совмещение механических испытаний с методом акустической эмиссии позволяет детализировать процессы деформации и разрушения сплавов системы Al-Si-Cu-Mg эвтектического состава и найти рациональные пути корректировки технологических процессов изготовления деталей.

2. Поры, наблюдаемые в результате деформации образцов из сплава АК12Д образуются из микротрещин, возникающих на ранних стадиях деформации.

3. Склонность к кавитации при эксплуатации поршня наследуется от операций штамповки, в результате которой в структуре изделия остаются микротрещины, этот недостаток снижается путем уменьшения размера зерен.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. D. F. Tariq, N. Naz, R.A. Baloch, "Faisal Characterization of Material Properties of 2xxx Series Al-Alloys by Non Destructive Testing Techniques," J. Nondestruct Eval (2012) 31:17–33.
2. Hao Wang, Changsheng Li, Jing Li, Xinglong Wei, and Ruibin Mei, "Effect of Deformation and Aging on Properties of Al-4.1%Cu-1.4%Mg Aluminum Alloy," ISRN Materials Science Volume 2013, Article ID 902970, 8 pages.
3. Berger H., "Nondestructive characterization of materials," Mater. Eval. 50, 299–305 (1992).
4. Rosen M., Horowitz E., Swartzendruber L., Fick S., Mehrabian R., "The aging process in aluminum alloy 2024 studied by means of eddy currents," Mater. Sci. Eng. 53 (2), 191–198 (1982).
5. Tiryakioglu M., Campbell J., Staley J. T., "Hardness-strength relationships in cast Al-Si-Mg alloys," Mater. Sci. Forum 331–337, 295–300 (2000).
6. Панин С. В., Башков О. В., Семашенко Н. А., Панин В. Е., Золотарева С. В. Комбинированное исследование особенностей деформации плоских образцов и образцов с надрезом на микро- и мезоуровнях методами акустической эмиссии и построения карт деформации поверхности // Физическая мезомеханика. 2004. Т. 7, № 2. С. 303–306. [ S. V. Panin, O. V. Bashkov, N. A. Semashenko, V. E. Panin, S. V. Zolotareva, "Combined study of deformation features flat images and notched at the micro-and meso-levels of acoustic emission methods and mapping of surface deformation," *Physical Mesomechanics*, vol. 7, no. 2, pp. 303-306, 2004. ]

## ОБ АВТОРАХ

**АСТАНИН Владимир Васильевич**, проф. каф. материаловедения и физики металлов. Дипл. инж. по машинам и технол. обработки металлов давлением (УАИ, 1973). Д-р физ.-мат. наук (ИФМ УрНЦ РАН, 1997). Иссл. в обл. пластической и сверхпластической деформации.

**ШАХОВКИНА Айгуль Айдаровна**, инж. НОЦ «Наноструктурные материалы и высокие технологии». М-р техн. и технол. по материаловед. и технол. новых материалов (УГАТУ, 2012). Иссл. в обл. неразрушающего контроля, материаловедения алюминиевых, титановых сплавов.

**САФИН Фидус Файзханович**, ст. преп. каф. нанотехнологии Дипл. инж.-мех. (УГАТУ). Иссл. в обл. мат. моделирования процессов ОМД.

**МЕЛЬНИКОВ Максим Олегович**, м-ант каф. материаловедения и физики металлов. Б-р техн. и технол. по материаловед. и технол. новых материалов (УГАТУ, 2013). Иссл. в обл. материаловедения алюминиевых сплавов и сталей.

**МУХАМАДИЕВА Рамиля Мухаметовна** студ. каф. материаловедения и физики металлов. Иссл. в обл. материаловедения алюминиевых, титановых сплавов.

**METADATA**

**Title:** Study pore formation in the alloy AK12D using acoustic emission method.

**Authors:** V. V. Astanin, A. A. Shahovkina, F. F. Safin,  
M. O. Melnikov, R. M. Muhamadieva

**Affiliation:**

Ufa State Aviation Technical University (UGATU), Russia.

**Email:** Girfeek@yandex.ru

**Language:** Russian.

**Source:** Vestnik UGATU (scientific journal of Ufa State Aviation Technical University), vol. 18, no. 4 (65), pp. 84-90, 2014. ISSN 2225-2789 (Online), ISSN 1992-6502 (Print).

**Abstract:** Suggested that an increase in porosity in the structure of the aluminum alloy AK12D piston during operation predetermined conditions of isothermal forging in its manufacture. Study of the acoustic emission signals and the tensile structure of the samples showed that the primary micro cracks occur at an early stage of deformation. Temperature variations lead to changes in the test signal and the amplitude of the acoustic activity as a whole. Improve the reliability of the piston can be corrected stress-strain state in its manufacture.

**Key words:** piston; pore formation; acoustic emission; aluminum alloy; deformation temperature; mechanical properties.

**About authors:**

**ASTANIN, Vladimir V.**, professor of Department materials science and physics of metals., Dr. of Sci. (Inst. of Phys. of Metals, Ekat., 1997).

**SHAHOVKINA, Aigul A.**, engineer, Research and Education Center "Nanostructured materials and high technology". Master of Technics & Technology (USATU, 2012).

**SAFIN, Fidus F.**, Senior Lecturer Department. nanotechnology Dipl. Mechanical Engineer (USATU). Inst. in the region. mathematical modeling of metal forming processes.

**MELNIKOV, Maxim O.**, undergraduate, Dept. of Materials Science and Physics of Metals. Bachelor of Technics & Technology (USATU, 2013).

**MUHAMADIEVA, Ramilya M.**, student, Dept. Materials Science and Physics of Metals, USATU.