

ЗАКОНОМЕРНОСТИ РАЗВИТИЯ ПОРИСТОСТИ В УСЛОВИЯХ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОЙ СВЕРХПЛАСТИЧНОСТИ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ

В.В. Брюховецкий, А.В. Пойда, В.П. Пойда*, Д.Е. Педун
Институт электрофизики и радиационных технологий НАН Украины,
Харьков, Украина
E-mail: ntcefo@yahoo.com;
****Харьковский национальный университет им. В.Н. Каразина,***
Харьков, Украина
E-mail: postmaster@univer.kharkov.ua

Исследованы характерные особенности развития пористости в образцах промышленных алюминиевых сплавов 1421, АК4-1ч и модельном сплаве типа «авиаль», деформированных в оптимальных условиях высокотемпературной сверхпластичности. Выявлены морфологические особенности пористой структуры. Изучены механизмы образования и развития деформационной пористости в ходе высокотемпературной сверхпластической деформации этих сплавов.

ВВЕДЕНИЕ

Эффект сверхпластичности обладает удачным сочетанием комплекса технологических характеристик: ресурс деформационной способности материалов в десятки раз больше, а сопротивление деформации в несколько раз меньше аналогичных характеристик в пластическом состоянии. Изучение закономерностей проявления этого эффекта – важная и актуальная задача, решение которой позволит как создать новые перспективные технологии, так и дополнить научные знания о физической природе эффекта сверхпластичности. К настоящему времени надёжно установлено, что во всех материалах, проявляющих структурную сверхпластичность в твердом состоянии, в ходе сверхпластической деформации развивается деформационная зернограничная пористость. Пористость может стать причиной преждевременного выхода из состояния сверхпластичности, а чрезмерное порообразование может наложить существенные ограничения на промышленное использование эффекта сверхпластичности в процессах сверхпластической формовки деталей [1-3].

Сплавы на основе алюминия являются основным конструкционным материалом не только в самолёто- и ракетостроении, но и в ядерной энергетике, из них, в частности, производят центрифуги для получения обогащенного урана-235. Поэтому в проблеме создания и внедрения новых алюминиевых сплавов важное место занимают требования повышенной прочности, пластичности, длительного срока эксплуатации, простоты обработки, работоспособности в экстремальных температурных, динамических и усталостных условиях. Для многокомпонентных алюминиевых сплавов, продеформированных в условиях высокотемпературной сверхпластичности при наличии в их структуре локальных включений жидкой фазы, также характерно наличие пористости. Нужно заметить, что её изучению не

уделяется должного внимания. Возможно, это связано с представлениями о том [4, 5], что наличие жидкой фазы, которая играет важную роль в аккомодации зернограничного проскальзывания, ведет к уменьшению уровня и скорости роста пористости во время высокотемпературной сверхпластической деформации. В то же время в ряде работ приводятся характеристики пористости материалов, проявивших высокотемпературную сверхпластичность [6, 7]. Несмотря на приводимые в литературе сведения о пористости в условиях высокотемпературной сверхпластической деформации, вопрос о причинах и характере ее развития остается еще мало изученным и не до конца понятным.

В данной работе изучена морфология и закономерности развития пористости в алюминиевых сплавах 1421, АК4-1ч и модельном сплаве типа «авиаль», проявляющих высокотемпературную сверхпластичность.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

В настоящей работе исследования проведены на образцах алюминиевых сплавов марок 1421, АК4-1ч и модельного сплава типа «авиаль», проявивших высокотемпературную сверхпластичность [8-10]. Исходная структура образцов сплавов 1421 характеризуется наличием мелкого равноосного зерна, средний размер которого составляет 5 мкм. Исходная зеренная структура сплава АК4-1ч характеризуется равноосной формой зерен с исходным средним размером зерна 8 мкм. Модельный сплав типа «авиаль» имеет более грубозернистую исходную структуру со средним размером зерна около 40 мкм. В ходе деформирования зеренная структура всех сплавов имеет склонность к росту. Более подробно о структурном состоянии сплавов, их химическом составе и условиях проявления ими

высокотемпературной сверхпластичности сообщалось в работах [8-10].

Структурные исследования проведены с применением световой микроскопии и растровой электронной микроскопии с применением стандартных методик количественной металлографии. Зернистую структуру выявляли химическим травлением и путём создания деформационного рельефа. Из-за значительного окисления образцов сплавов в ходе сверхпластической деформации относительный объем зернограничной пористости оценивали не по данным денситометрических исследований, а по данным, полученным с использованием металлографического анализа. Проведение измерений не менее 100 линейных отрезков в достаточно большом числе полей зрения, равномерно распределенных на площади шлифа в рабочей части образца, позволило определить объемное содержание пористости с абсолютной погрешностью, не превышающей $\pm 5\%$.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Процесс порообразования в ходе сверхпластической деформации состоит из трех этапов, которые в большинстве случаев происходят одновременно: зарождение пористости, рост пор и слияние пористости. Важный ключевой момент проблемы – процесс зарождения пор. Известно, что в условиях микроструктурной сверхпластичности в твердом состоянии материалов поры могут зарождаться в процессе осуществления зернограничного проскальзывания на разного рода нерегулярностях границ – в тройных стыках зерен, у частиц второй фазы, в местах пересечения границ с полосами скольжения и т. п. [1, 2, 11]. Их появление является результатом декогезии из-за недостатка аккомодации при зернограничном проскальзывании.

В ряде работ показано [12, 13], что в условиях высокотемпературной сверхпластичности, так же как и в условиях структурной сверхпластичности, основным деформационным механизмом является зернограничное проскальзывание. Поэтому, вероятно, что основной механизм зарождения пористости в условиях высокотемпературной сверхпластичности будет таким же, как и в условиях микроструктурной сверхпластичности.

На рис. 1 приведен вид деформационного рельефа образца модельного сплава типа «авиаль», деформированного в оптимальных условиях проявления сверхпластичности. Из этого рисунка видно, что зарождение пор происходит именно в результате осуществления зернограничного проскальзывания. Об этом свидетельствует смещение предварительно нанесенных на отполированную поверхность образца реперных рисок на межзеренных границах, входящих в пору (см. рис. 1). Детально изучив деформационный рельеф исследованных сплавов, проявивших высокотемпературную сверхпластичность, можно утверждать, что зарождение пористости является результатом осуществления зернограничного проскальзывания в ходе сверхпластической деформации. Дополнительным фактором,

влияющим на возможность зарождения пористости, будут как раз локальные включения жидкой фазы. Если вспомнить более ранние работы о влиянии включений жидкой фазы на ползучесть материалов (см., например, [14]), то там отмечалось, что включения жидкой фазы на границах зерен, образовавшиеся из-за повышенного содержания легкоплавкого элемента на них, приводят к уменьшению эффективного коэффициента вязкости при высокой температуре, что ведет к более раннему образованию межкристаллитных пор.

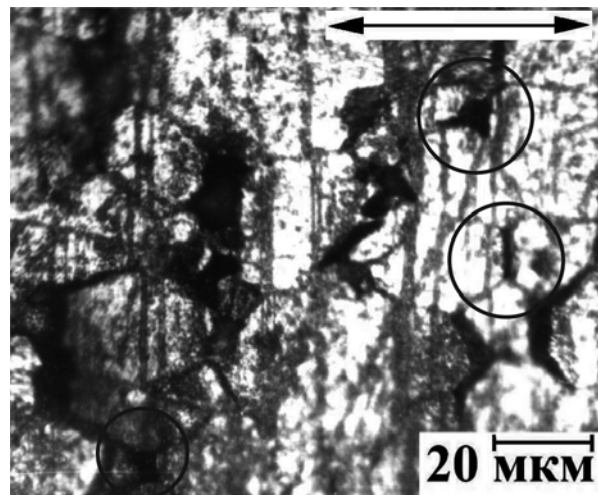


Рис. 1. Характерный вид деформационного рельефа образца модельного сплава типа «авиаль», деформированного на $\varepsilon = 40\%$ при $\sigma = 4,0$ МПа и $T = 833$ К

На рис. 2 приведены некоторые характерные виды пористости, развивающейся во время сверхпластической деформации исследуемых в работе сплавов. Морфология этой пористой структуры во всех исследованных сплавах имеет определенное сходство. Также можно говорить о том, что вид пористой структуры аналогичен тому, который наблюдался и в материалах, проявивших микроструктурную сверхпластичность в твердом состоянии (см., например, [15]). Характерным является наличие индивидуальных зернограничных пор, участвующих в деформационном процессе сверхпластического течения и обеспечивающих позеренный массоперенос при осуществлении зернограничного проскальзывания [16]. Однако на более поздних этапах деформации в структуре исследованных в работе сплавов, проявивших высокотемпературную сверхпластичность, наблюдается пористость и другой морфологии, а именно макроскопические полости, вытянутые вдоль направления растяжения (см. рис. 2,г)

Изучению зависимости уровня пористости от степени деформации в условиях сверхпластичности посвящены многочисленные работы [17-19]. Объем пористости, накапливаемой образцами, деформированными в условиях высокотемпературной сверхпластичности до разрушения, как правило, значителен. Исследования, выполненные в данной работе, показали (рис. 3), что относительный объем

пористости увеличивается с возрастанием степени деформации. Например, для сплава 1421 он может достигать величины 24%.

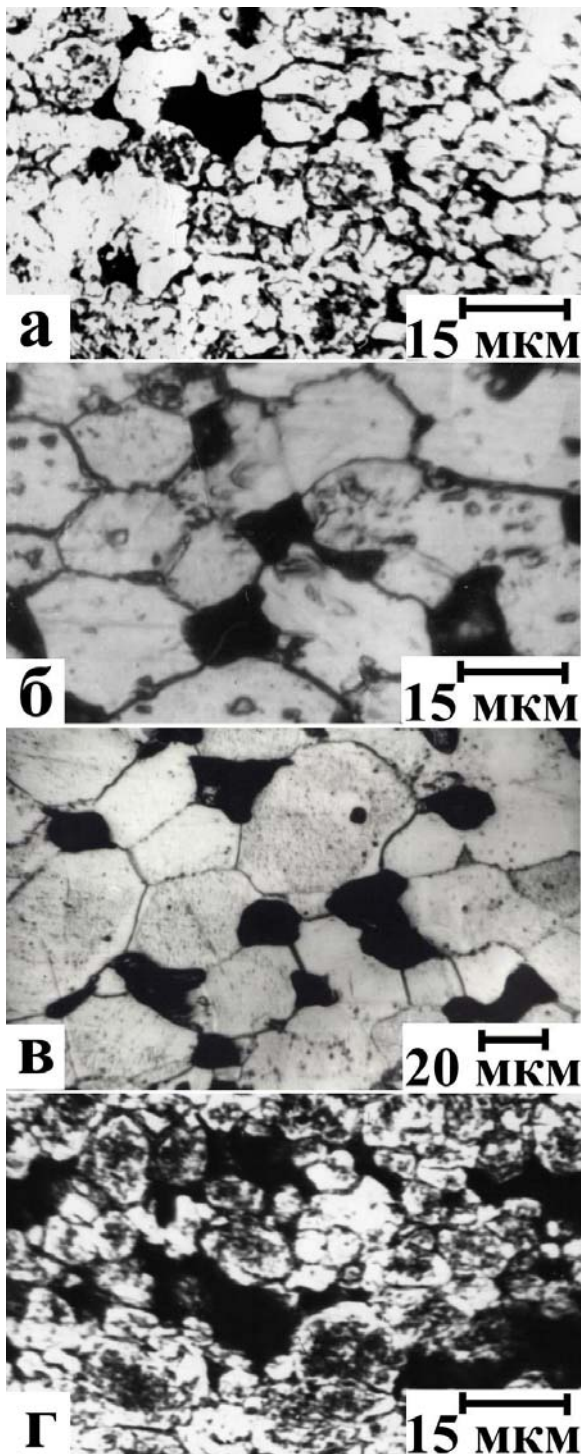


Рис. 2. Вид пористой структуры, развивающейся в образцах исследуемых сплавов в ходе их деформирования в оптимальных условиях высокотемпературной сверхпластичности: а и г – 1421; б – АК4-1ч; в – «авиаль». Направление растяжения горизонтальное

Как правило, механизмы роста пористости в условиях сверхпластичности металлов классифицируют по трем категориям [20]: диффузионно-контролируемый [21], сверхпластичный диффузионно-контролируемый [22] и рост

пористости, контролируемый пластической деформацией [23]. Тот факт, что присутствуют поры, вытянутые параллельно оси растяжения, указывает на то, что рост пористости контролируется пластической деформацией. Пластически-контролируемый рост пористости происходит путем пластической деформации материала в окрестности поры. Большинство исследователей делают вывод о том, что рост пористости в условиях сверхпластичности контролируется пластической деформацией. Зависимость объема пористости от степени деформации описывается в таком случае следующим уравнением [24]:

$$V = V_0 \exp(\eta \epsilon), \quad (1)$$

где V_0 – пористость при нулевой деформации, $\eta = d \ln v / d \ln \epsilon$ – показатель скорости роста поры (v – объем индивидуальной поры).

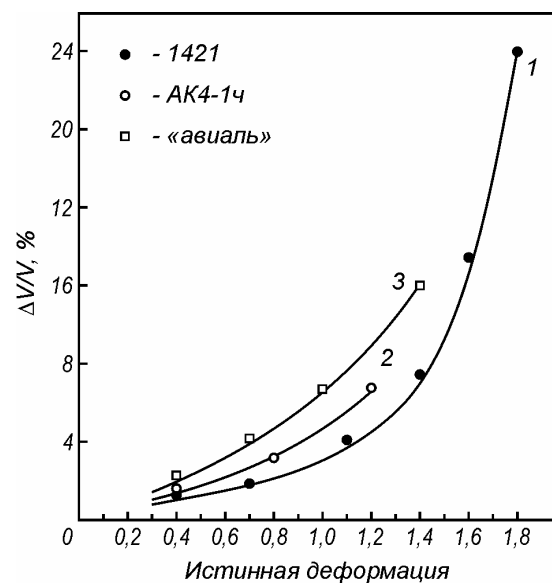


Рис. 3. Зависимость относительного объема пористости V , накопленного образцами сплавов в ходе сверхпластической деформации, от степени деформации: 1 – 1421; 2 – АК4-1ч; 3 – «авиаль»

Приведенные на рис. 3 графики зависимости относительного объема пористости от степени истинной деформации имеют вид, описываемый уравнением (1). Это говорит о том, что рост пор в случае высокотемпературной сверхпластической деформации контролируется самой сверхпластической деформацией. Поэтому его можно назвать сверхпластичным деформационно-контролируемым ростом пор, поскольку основным деформационным механизмом высокотемпературной сверхпластичности является зернограничное проскальзывание, а не внутривершинная деформация, осуществляющаяся за счет дислокационного скольжения и диффузионной ползучести.

Как видно из рис. 3, для показателя роста пористости можно записать следующее неравенство: $\eta_3 > \eta_2 > \eta_1$. Вероятно, это связано с различным исходным размером зерна в исследуемых сплавах. По-видимому, чем больше

исходный размер зерна, тем более высокой является скорость роста пористости на начальных этапах деформации. То есть крупнозернистые сплавы более склонны к накоплению пористости на начальных этапах деформации. Как известно, одним из отличительных признаков сверхпластичности является то, что межкристаллитные поры могут залечиваться в ходе деформации. Именно в более мелкозернистых материалах более эффективно происходит залечивание деформационной пористости за счет осуществления диффузионных процессов, что и может объяснять более медленный темп накопления пористости на начальных этапах сверхпластической деформации. В то же время одной из причин того, что более крупнозернистые сплавы демонстрируют более низкие удлинения до разрушения, является значительный объем пористости, накапливаемой ими на ранних этапах сверхпластической деформации.

Макроразрушение образцов исследуемых сплавов происходит после накопления значительного объема пористости. На рис. 4 приведены фрактограммы изломов образцов исследованных в этой работе сплавов. На них наблюдается ряд деталей, которые характерны для изломов образцов, деформированных до разрушения в твердом состоянии в условиях микроструктурной сверхпластичности [25], а также детали, типичные для изломов материалов, разрушенных в твердожидком состоянии [26]. Из этого рисунка видно, что изломы образцов содержат участки, занятые объединившимися порами, и участки межкристаллитного и транскристаллитного разрушений. Также на поверхности разрушения видны фасетки, образованные в результате межзеренного разрушения и внутривзеренного скола участков, которые в момент разрыва были в твердом состоянии. Видны также гребни, представляющие собой сужившиеся участки внутренних микрошеек, которые разрушились в результате осуществления пластического течения. Также видно, что кромки некоторых зерен содержат бахрому из волокнистых образований, которые, по-видимому, образовались в результате вязкого течения расплава в момент отрыва зерен. В частности, это может свидетельствовать об оплавлении периферийных областей зерен. На поверхности изломов видны и отдельные конусовидные образования, по своему виду похожие на половинки разорванных макроскопических образцов, которые в результате течения имеют большое поперечное сужение, что говорит о вязком механизме течения. Морфология всей поверхности излома дает основание предполагать, что образцы в ходе сверхпластической деформации, по-видимому, находились в твердожидком состоянии. В целом же разрушение образцов сплавов 1421, АК4-1ч и модельного сплава типа «авиаль», деформированных в условиях высокотемпературной сверхпластичности, имеет смешанный характер: квазихрупкий на макроуровне и смешанный на микроуровне.

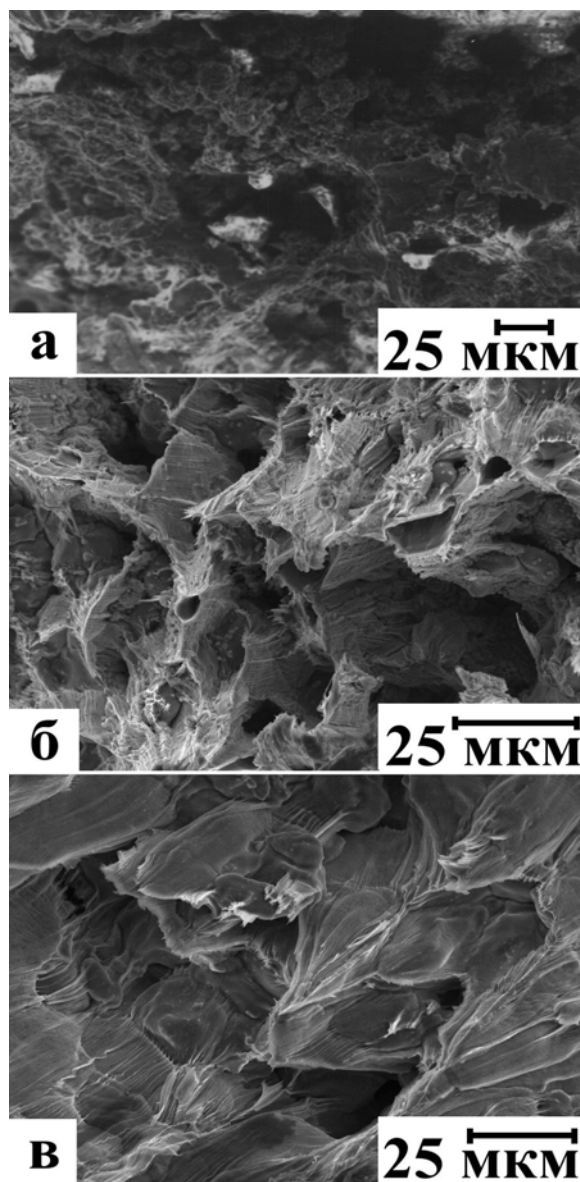


Рис. 4. Фрагменты фрактограмм излома образцов сплавов 1421 (а), АК4-1ч (б) и модельного сплава типа «авиаль» (в), деформированных до разрушения в оптимальных условиях высокотемпературной сверхпластичности

ВЫВОДЫ

1. Сверхпластическая деформация в области высоких гомологических температур сопровождается интенсивным порообразованием. Зарождение пористости является результатом зернограничного проскальзывания в ходе осуществления сверхпластической деформации. Дополнительным фактором, влияющим на возможность зарождения пористости, являются локальные включения жидкой фазы на границах зерен, приводящие к уменьшению коэффициента вязкости.

2. Объем пористости, накапливаемой образцами сплавов, деформированных в условиях высокотемпературной сверхпластичности до разрушения, как правило, значителен и может превышать величину 20%. Рост пористости при этом контролируется самой сверхпластической

деформацией. Однако его еще можно назвать сверхпластичным деформационно-контролируемым ростом пор. При этом на начальных этапах деформации крупнозернистые сплавы более склонны к накоплению пористости, что, возможно, является фактором, вызывающим их преждевременное разрушение.

3. Разрушение материалов, деформированных в условиях высокотемпературной сверхпластичности, имеет ряд закономерностей, общих со структурной сверхпластичностью, а также некоторую специфику, характерную только для высокотемпературной сверхпластичности. На микроуровне разрушение носит смешанный характер, для которого характерно наличие на поверхностях излома как микроучастков хрупкого разрыва при наличии жидкой фазы, так и участков вязкого разрушения.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. D.W. Livesey, N. Ridley. Superplastic deformation cavitation and fracture of microduplex Cu-Ni-Zn alloys // *Metall. Trans.* 1978, v. 9A, № 4, p. 519-526.
2. D.M.R. Taplin, G.L. Dunlop, T.G. Langdon. Flow and failure of superplastic materials // *Ann. Rev. Mater. Sci.* 1979, v. 9, p. 151-189.
3. *Сверхпластическая формовка конструкционных сплавов* / Под ред. Н. Пейтона, К. Гамильтона: Пер. с англ. М.: «Металлургия». 1985, 218 с.
4. M. Mabuchi, K. Higashi. On accommodation helper mechanism for superplasticity in metal matrix composites // *Acta Mater.* 1999, v. 47, №6, p. 1915-1922.
5. M. Mabuchi, K. Higashi. The critical strain rate for accommodation helper mechanism in superplasticity of metal matrix composites // *Mater. Transactions, JIM.* 1999, v. 40, №8, p. 787-793.
6. T.G. Nieh, J. Wadsworth. Microstructural characteristics and deformation properties in superplastic intermetallics // *Mater. Sci. Eng.* 1997, v. 240, p. 88-96.
7. H. Iwasaki, T. Mori, M. Mabuchi, K. Higashi. Cavitation in high strain rate superplastic metal matrix composite // *Mater. Sci. Forum.* 1997, v. 243-245, p. 303-308.
8. В.В. Брюховецкий. О причинах высокотемпературной сверхпластичности крупнозернистого алюминиевого сплава типа «авиаль» // *ФММ.* 2001, т. 92, №1, с. 107-111.
9. В.В. Брюховецкий, В.П. Пойда, Р.И. Кузнецова, В.Ф. Клепиков, А.В. Пойда. Сверхпластичные свойства алюминий-литиевого сплава 1421 в области высоких гомологических температур // *ФММ.* 2002, т. 94, №5, с. 116-123.
10. В.П. Пойда, В.В. Брюховецкий, А.В. Пойда, Р.И. Кузнецова, А.П. Крышталь, Ю.Ю. Поргаш. Проявление сверхпластичности сплавом АК4-1ч при высоких гомологических температурах // *Металлофиз. новейшие технол.* 2009, т. 31, №10, с. 1385-1398.
11. M.M.I. Ahmed, F.A. Mohamed, T.J. Langdon. Neck formation and cavitation the superplastic Zn-22%Al eutectoid // *J. Mater. Sci.* 1979, v. 14, №12, p. 2913-2918.
12. В.В. Брюховецкий, А.В. Пойда, В.П. Пойда, Ю.В. Коломак. Толщина зернограницной жидкой фазы и ее влияние на механизм сверхпластической деформации // *ФММ.* 2011, т. 112, №5, с. 552-560.
13. В.П. Пойда, Д.Е. Педун, В.В. Брюховецкий, А.В. Пойда, Р.В. Сухов, А.Л. Самсоник, В.В. Литвиненко. Структурные изменения в ходе сверхпластической деформации высокопрочного сплава 1933 системы Al-Mg-Zn-Cu-Zr // *ФММ.* 2013, т. 114, №9, с. 779-788.
14. В.И. Никитин. *Физико-химические явления при воздействии жидких металлов на твердые.* М.: «Атомиздат», 1967, 441 с.
15. Р.И. Кузнецова, В.В. Брюховецкий, В.П. Пойда, Т.Ф. Сухова. Механизмы развития зернограницных пор и локальная неоднородность деформации в условиях сверхпластического течения // *Металлофиз. новейшие технол.* 1995, т. 17, №8, с. 64-72.
16. Р.И. Кузнецова. Роль зернограницной пористости в сверхпластичности // *ФММ.* 1978, т. 45, в. 3, с. 641-646.
17. C.W. Humpries, N. Ridley. Cavitation during the superplastic deformation of an α/β brasses // *J. Mater. Sci.* 1978, v. 13, №11, p. 2477-2482.
18. A. Varloteaux, I. Blandin, I. Suery. Control of cavitation during superplastic forming of high strength aluminium alloys // *Mater. Sci. Techn.* 1989, v. 5, p. 1109-1116.
19. C.W. Humpries, N. Ridley. Cavitation in alloy steels during superplastic deformation // *J. Mater. Sci.* 1974, v. 9, №9, p. 1429-1435.
20. J. Pilling and N. Ridley. *Superplasticity in Crystalline Solid.* The Institute of Metals, London, 1989, p. 114.
21. M.V. Speight and W. Beere. Vacancy potential and void growth on grain boundaries // *Metal Science.* 1975, v. 9, p. 190-191.
22. A.H. Chokshi and T.G. Langdon. A model for diffusional cavity growth in superplasticity // *Acta metall.* 1987, v. 35, p. 1089-1101.
23. J.W. Hancock. Creep cavitation without a vacancy flux // *Metall. Sci.* 1976, v. 10, №9, p. 319-325.
24. D.W. Livesey and N. Ridley. Superplastic deformation, cavitation, and fracture of microduplex Cu-Ni-Zn alloys // *Metall. Trans. A.* 1978, v. 9, issue 4, p. 519-526.
25. T.G. Langdon. Fracture processes in superplastic flow // *Metal Sci.* 1982, v. 16, №4, p. 175-183.
26. H. Iwasaki, M. Mabuchi, K. Higashi. The role of liquid phase in cavitation and fracture in high-strain-rate superplastic $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{Al}$ alloy composite // *Mat. Sci. Forum.* 1999, v. 304, p. 640-650.

Статья поступила в редакцию 28.02.2014 г.

ЗАКОНОМІРНОСТІ РОЗВИТКУ ПОРИСТОСТІ В УМОВАХ ВИСОКОТЕМПЕРАТУРНОЇ НАДПЛАСТИЧНОСТІ АЛЮМІНІЄВИХ СПЛАВІВ

В.В. Брюховецький, А.В. Пойда, В.П. Пойда, Д.Є. Педун

Досліджено характерні особливості розвитку пористості в зразках промислових алюмінієвих сплавів 1421, АК4-1ч і модельному сплаві типу «авіаль», які було продеформовано в оптимальних умовах високотемпературної надпластичності. Виявлено морфологічні особливості пористої структури. Вивчено механізми утворення і розвитку деформаційної пористості під час високотемпературної надпластичної деформації цих сплавів.

REGULARITIES OF CAVITY DEVELOPMENT IN ALUMINUM ALLOYS IN CONDITIONS OF HIGH-TEMPERATURE SUPERPLASTICITY

V.V. Bryukhovetsky, A.V. Poyda, V.P. Poyda, D.E. Pedun

The typical peculiarities of cavity development in specimens of industrial aluminum alloys 1421, AK4-1p and model alloy “avial”, deformed in optimal conditions of high-temperature superplasticity are investigated. The morphological peculiarities of cavity structure are revealed. The mechanisms of nucleation and development of deformation cavitation during the high-temperature superplastic deformation of these alloys are determined.