

PACS: 81.20.Jz, 83.70.Dk

Б.М. Эфрос<sup>1</sup>, И.П. Конакова<sup>2</sup>, Н.Б. Эфрос<sup>1</sup>, В.С. Тютенко<sup>1</sup>

## ВЛИЯНИЕ ТЕПЛОЙ ГИДРОЭКСТРУЗИИ НА СТРУКТУРУ И СВОЙСТВА КОМПОЗИТОВ НА ОСНОВЕ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ

<sup>1</sup>Донецкий физико-технический институт им. А.А. Галкина

<sup>2</sup>Уральский государственный технический университет, г. Екатеринбург, Россия

Статья поступила в редакцию 12 января 2018 года

*Изучены структура и механические свойства композиционных материалов, полученных из пористого алюминия А97 и пористого алюминиевого сплава АЛ2, насыщенных дисперсными частицами рутила (TiO<sub>2</sub>). Исследованы изменения формы, размеров и объема пор в материалах после тепловой гидроэкструзии. Получены кривые деформационного упрочнения композиционных материалов в температурном диапазоне от 20 до 500°С и скорости упрочнения 1.5·10<sup>-2</sup>–10 с<sup>-1</sup>. Показано, что композиционные материалы, полученные из пористого сплава АЛ2, обладают высокими терморезистивными свойствами.*

**Ключевые слова:** пористые алюминиевые сплавы, композиты, теплая гидроэкструзия, механические свойства

### Введение

Перспективы развития во многих отраслях промышленности в значительной степени связаны с разработкой и внедрением композиционных материалов [1]. Одним из наиболее перспективных путей создания этих материалов является использование литейных технологий, позволяющих изменять в широких пределах форму и размеры изделий. Оригинальный метод получения литых пористых материалов разработан в НПО «Пористые композиционные материалы» Уральского политехнического института [2]. Изготовленные по данной технологии материалы обладают сквозной пористостью, что позволяет насыщать их дисперсными частицами оксидов и карбидов и получать в итоге композитные материалы по технологии, описанной в работах [3,4].

В данной работе проведено исследование структуры и свойств композитных материалов, изготовленных из литого пористого алюминия А97 и литого алюминиевого сплава АЛ2, насыщенных дисперсными частицами TiO<sub>2</sub>.

### Материалы и методика проведения эксперимента

В качестве материала матрицы композитов применяли технически чистый алюминий марки А97 и литейный алюминиевый сплав АЛ2 стандартно-

го химического состава. Выплавку пористых заготовок проводили с использованием оригинального метода реолитья [2], а их насыщение частицами  $\text{TiO}_2$  (с объемной долей до 0.2) – по технологии, описанной в работе [4].

Теплую гидроэкструзию осуществляли методом горячего гидродинамического выдавливания в интервале температур  $T_{\text{HE}} \approx 450\text{--}550^\circ\text{C}$  со степенями вытяжки  $\lambda \approx 1.6\text{--}10$  [5]. Характерной особенностью процесса является наличие теплового взаимодействия деформируемого образца и рабочей среды, в качестве которой могут использоваться различные квазижидкие среды. Существенное отличие данных рабочих сред от жидких состоит в наличии предельного напряжения сдвига  $\sigma_y$ , вследствие чего при значениях напряжения  $\sigma > \sigma_y$  такие среды способны течь, а при  $\sigma < \sigma_y$  они ведут себя подобно твердым телам.

Экспериментальные кривые деформационного упрочнения строили по результатам испытаний на сжатие образцов, изготовленных из экструдатов, в соответствии с ГОСТом 25.503–80 в интервале температур  $20\text{--}500^\circ\text{C}$  и скоростей деформации  $1.5 \cdot 10^{-2}\text{--}10 \text{ s}^{-1}$ . Для испытаний на сжатие образец цилиндрической формы диаметром 6 mm и высотой 9 mm размещали между бойками в контейнере, который нагревали в печи типа КО-14 до температуры испытания, и выдерживали перед осадкой в течение 3 min. Для оценки деформации образцов, изготовленных из экструдатов, при испытании на сжатие использовали величину истинной деформации  $\varepsilon$  ( $\varepsilon = \ln(h_0/h_i)$ , где  $h_0$  и  $h_i$  – соответственно начальная и текущая высоты деформированного образца).

Металлографическое исследование проводили с помощью автоматического анализатора структуры «EPIQUANT» и оптического микроскопа «NEOPHOT-32». Изломы образцов после испытания на сжатие изучали методом растровой электронной микроскопии на приборе «SUPERPROBE JCHA-733». Идентификацию наблюдаемых в изломе образцов дисперсных частиц проводили с помощью специальной приставки – энергодисперсионного микроанализатора LINKAN-10000.

Пористость  $\Theta$  литых материалов в исходном состоянии и после соответствующих обработок определяли по измерениям «кажущейся» плотности образцов методом гидростатического взвешивания (ГОСТ 2409–80). Измерения микротвердости образцов проводили на приборе ПМТ-3 при нагрузке 0.49 N (ГОСТ 9450–76).

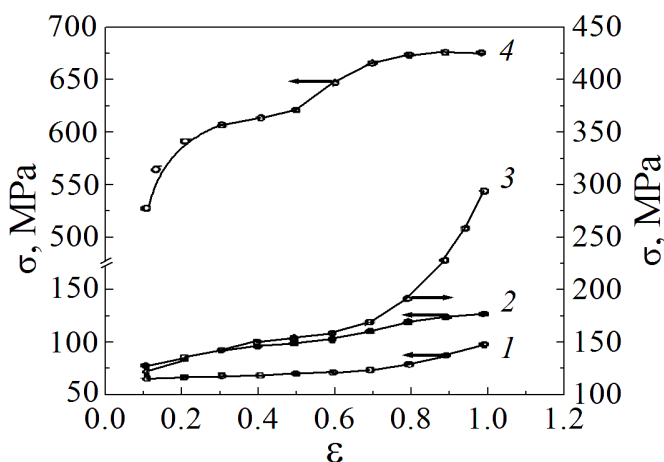
### Результаты эксперимента и обсуждение

Анализ микроструктуры литого пористого алюминия свидетельствует, что поры имеют неправильную геометрическую форму, обусловленную технологией выплавки (метод реолитья). Количественный металлографический анализ показал, что объемная доля пор составила 53%, а их средний размер – 460  $\mu\text{m}$ . Теплая гидроэкструзия приводит практически к полному залечиванию пор, при этом границы пор смыкаются, вытягиваясь вдоль направления выхода металла через матрицу. В поперечном сечении процесс залечи-

вания сопровождается изгибом и закручиванием границ, что обусловлено развитием процессов ротационной пластической деформации [6], осуществляющейся путем локальных разворотов соседних микрообластей. Теплая пластическая деформация под давлением композиционных материалов приводит практически к полному залечиванию пор, границы которых смыкаются вокруг дисперсных частиц  $TiO_2$ . Средний размер данных частиц в исследованных материалах составил 8–10  $\mu m$ , а их объемная доля – 7–9%.

На рис. 1 приведены кривые деформационного упрочнения образцов из экструдатов литых и металлооксидных материалов на основе пористого алюминия А97 и сплава АЛ2 (насыщенного частицами  $TiO_2$ ) при испытании на сжатие в условиях комнатной температуры. Известно [7], что для большинства металлов и сплавов экспериментальные кривые упрочнения при сжатии в диапазоне степеней деформации  $\epsilon$  от 0.1 до 1.25 с разными скоростями деформации могут быть аппроксимированы уравнением  $\sigma = K\epsilon^n$  (соотношение Холломоны). Вместе с тем анализ большого количества опытных данных [7] позволяет заключить, что кривые деформационного упрочнения описываются не одной, а несколькими стадиями, причем коэффициенты  $K$  и  $n$  изменяются с увеличением степени деформации. В работах [2,3] показано, что эти кривые можно описать с помощью двух стадий деформационного упрочнения. Проведенные исследования свидетельствуют, что аналогичным образом описываются и кривые деформационного упрочнения композиционных материалов.

Сравнение кривых деформационного упрочнения исследованных материалов при сжатии (рис. 1) показало, что в изученном интервале степеней деформации максимальным уровнем прочности обладает композиционный материал на основе литого пористого сплава АЛ2 (КМАЛ2), насыщенный дисперсными частицами  $TiO_2$ . Необходимо отметить, что при осадке литых



**Рис. 1.** Кривые деформационного упрочнения исследованных материалов ( $T_{def} = 20^\circ C$ , скорость деформации при сжатии  $10\text{ s}^{-1}$ ): 1 – пористый алюминий А97; 2 – пористый сплав АЛ2; 3 – композиционный материал на основе литого пористого алюминия (КМА97); 4 – композиционный материал на основе литого пористого сплава АЛ2 (КМАЛ2)

пористых образцов и образцов композиционного материала на основе литого пористого алюминия А97 (КМА97) наблюдается плавное повышение значений  $\sigma$  с ростом степени деформации, а уровень прочности пористого сплава АЛ2 незначительно превышает уровень прочности пористого алюминия. Для композиционных материалов КМАЛ2 отмечается большая разница в значениях напряжений деформации при одинаковых  $\varepsilon$ . Так, например, для материалов КМАЛ2 и КМА97 при степени деформации  $\varepsilon = 0.2$  разница в значениях  $\sigma$  составляет  $\sim 400$  МПа, а при  $\varepsilon = 1.0$   $\Delta\sigma \approx 300$  МПа.

На рис. 2 представлена зависимость плотности  $\rho$  исследованных материалов от степени деформации. Оказалось, что изменение  $\rho$  пористого материала характеризуется также двумя стадиями. При сжатии до  $\varepsilon \approx 0.2-0.3$  не происходит заметного изменения величины  $\rho$ , однако с дальнейшим повышением степени деформации плотность начинает резко возрастать.

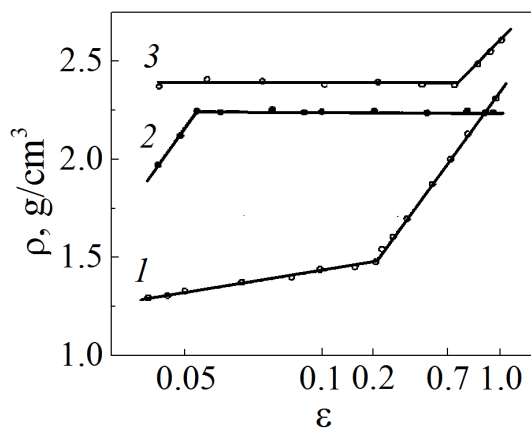
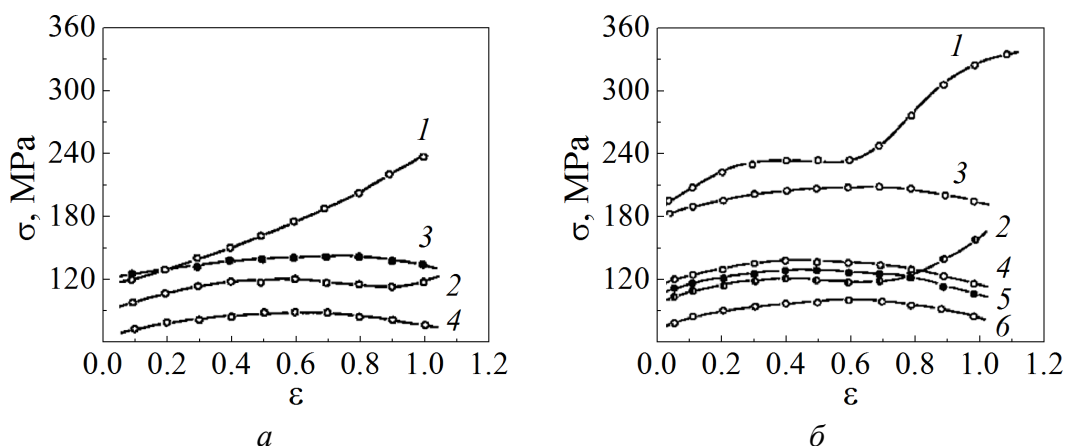


Рис. 2. Изменение плотности  $\rho$  литого пористого сплава АЛ2 (1), композиционных материалов КМАЛ2 (2) и КМА97 (3), насыщенных дисперсными частицами  $\text{TiO}_2$ , в зависимости от степени деформации  $\varepsilon$  при сжатии

Таким образом, первая стадия деформационного упрочнения ( $\varepsilon < \varepsilon_{\text{cast}}$ ) пористого материала может быть связана с увеличением плотности дислокаций в матрице (каркасе), когда отсутствуют заметные изменения плотности материала. На второй стадии деформационного упрочнения ( $\varepsilon > \varepsilon_{\text{cast}}$ ) происходит интенсивное «залечивание» пор и увеличение  $\rho$  материала, что и обуславливает аномально-высокие значения коэффициентов деформационного упрочнения [2,3].

Для композиционного материала КМАЛ2 не наблюдается заметных изменений плотности в процессе пластической деформации. Деформация  $\varepsilon$ , соответствующая переходу между стадиями, составляет  $\sim 0.05$ . Для композиционного материала КМА97 отмечается некоторое увеличение плотности  $\rho$  при степенях деформации  $\varepsilon_d \geq 0.7$ . Фрактографическое исследование изломов образцов свидетельствует не только о протекании процесса «залечивания» пор на данной стадии, но и наличии расслоения в изученном материале. Проведенный рентгеновский микроанализ частиц, присутствующих в изломе образцов КМА97, показал наличие в них большого количества титана, который является основной составляющей упрочняющей фазы – рутила.

Композиционный материал на основе алюминиевого сплава АЛ2 обладает высоким уровнем прочностных свойств при деформации на сжатие не только при комнатной, но и при более высоких температурах. На рис. 3 приведены кривые деформационного упрочнения композиционного материала КМАЛ2, полученные при температурах 300 и 500°C и скоростях сжатия  $1.5 \cdot 10^{-2} - 10 \text{ s}^{-1}$ , а также известных жаропрочных алюминиевых сплавов АК8 и САП1 по данным работы [9]. Повышение температуры испытаний и уменьшение скорости деформации способствуют снижению прочностных свойств, что связано с развитием процессов возврата. Видно, что при всех температурах испытания и скоростях деформации композиционный материал КМАЛ2 превосходит по уровню прочности известные сплавы.



**Рис. 3.** Кривые деформационного упрочнения алюминиевых сплавов при скоростях деформации  $1.5 \cdot 10^{-2}$  (а) и  $10 \text{ s}^{-1}$  (б): 1 – КМАЛ2,  $T_{\text{def}} = 300^\circ\text{C}$ ; 2 – КМАЛ2,  $500^\circ\text{C}$ ; 3 – САП1,  $350^\circ\text{C}$  [9]; 4 – САП1,  $450^\circ\text{C}$  [9]; 5 – АК8,  $300^\circ\text{C}$  [9]; 6 – АК8,  $500^\circ\text{C}$  [9]

Необходимо отметить, что кривые деформационного упрочнения приведенных алюминиевых сплавов в зависимости от вида материала носят принципиально разный характер. В то время как для уже известных жаропрочных алюминиевых сплавов увеличение степени деформации приводит сначала к повышению, а затем к снижению уровня напряжений, причем эти изменения не очень значительны (рис. 3), для композиционного материала КМАЛ2 наблюдается постоянное возрастание уровня напряжений с увеличением степени деформации  $\epsilon$ . Это возрастание наиболее заметно при температуре деформации  $300^\circ\text{C}$ .

Стандартные механические испытания на растяжение свидетельствуют, что композиционный материал КМАЛ2 обладает значительно более высоким уровнем прочностных свойств, чем КМА97. Так, например, временное сопротивление  $\sigma_t$  этих материалов составляет соответственно 250 и 70 МПа, а относительное удлинение  $\delta$  – 5 и 6%. Аналогичные испытания на растяжение при температуре  $300^\circ\text{C}$  показали, что временное сопротивление исследованных материалов составляет 130 и 30 МПа, а относительное удлинение  $\delta \approx 4$  и 5% соответственно.

### Выводы

Результаты проведенных исследований свидетельствуют, что композиты КМАЛ2 и КМА97, изготовленные из литых алюминиевых сплавов, насыщенных дисперсными частицами  $TiO_2$ , методом реолития с использованием теплой гидроэкструзии, могут применяться в качестве конструкционных жаропрочных материалов. Поскольку наилучший комплекс механических свойств получен для композита КМАЛ2 на основе литейного алюминиевого сплава АЛ2, который термически не упрочняется, можно заключить, что данный металломатричный композит имеет большой резерв в улучшении механических свойств, связанный с применением в качестве материала матрицы более сложнолегированных алюминиевых сплавов, упрочняющихся при термической обработке.

1. *В.В. Васильев, В.Д. Протасов, В.В. Болотин и др.*, Композиционные материалы, Машиностроение, Москва (1990).
2. *А.А. Емельянов, И.П. Конакова, Е.Л. Фурман*, ФММ № 3, 136 (1992).
3. *Б.М. Эфрос, И.П. Конакова, А.А. Емельянов, Я.Е. Бейгельзимер, Т.П. Заика, Н.В. Шишкова, В.М. Шепель*, ФТВД 3, № 3, 115 (1993).
4. *А.А. Емельянов, И.П. Конакова*, Влияние пластической деформации и добавок дисперсного упрочнителя на структуру и свойства композиционных материалов на основе литых пористых алюминиевых сплавов. Применение композиционных материалов в народном хозяйстве, Солигорск (1992), с. 77.
5. *Ю.Т. Антонишин, Т.М. Маслакова, В.П. Лесников, Б.М. Эфрос*, ФТВД вып. 30, 55 (1989).
6. *В.В. Рыбин*, Большие пластические деформации и разрушение металлов, Металлургия, Москва (1986).
7. *В.А. Кроха, М.З. Ерманок*, Изв. АН СССР, Металлы № 1, 149 (1991).
8. *Р. Хоникомб*, Пластическая деформация металлов, Мир, Москва (1972).
9. *П.Г. Полухин, Г.Я. Гун, А.М. Галкин*, Сопrotивление пластической деформации металлов и сплавов, Металлургия, Москва (1976).

*В.М. Efros, I.P. Konakova, N.B. Efros, V.S. Tyutenko*

### EFFECT OF HOT HYDROEXTRUSION ON THE STRUCTURE AND THE PROPERTIES OF COMPOSITES BASED ON ALUMINUM ALLOYS

The structure and the mechanical properties of composite materials obtained from porous aluminum A97 and porous alloy AL2 saturated by dispersible particles of  $TiO_2$  have been studied. Form modifications, size and volume of pores in tested materials after hot hydrodynamic extrusion have been investigated. Deformation hardening curves of composition materials within the temperature range of 20–500°C at the strain rate of  $1.5 \cdot 10^{-2}$ – $10 \text{ s}^{-1}$  have been obtained. It is shown that composition materials obtained from porous alloy AL2 are of high hot-resistance properties.

**Keywords:** porous aluminum alloys, composites, hot hydroextrusion, mechanical properties

**Fig. 1.** Deformation hardening curves of the tested materials ( $T_{\text{def}} = 20^\circ\text{C}$ , deformation rate of compression is  $10 \text{ s}^{-1}$ ): 1 – porous aluminum A97; 2 – porous alloy AL2; 3 – composite based on casted porous aluminum (KMA97); 4 – composite based on casted porous alloy AL2 (KMAL2)

**Fig. 2.** Density  $\rho$  of casted porous alloy AL2 (1), composites KMAL2 (2) and KMA97 (3), saturated by dispersed particles of  $\text{TiO}_2$  vs degree of deformation  $\varepsilon$  under compression

**Fig. 3.** Deformation hardening curves of aluminum alloys at the deformation rate of  $1.5 \cdot 10^{-2}$  (a) и  $10 \text{ s}^{-1}$  (б): 1 – KMAL2,  $T_{\text{def}} = 300^\circ\text{C}$ ; 2 – KMAL2,  $500^\circ\text{C}$ ; 3 – SAP1,  $350^\circ\text{C}$  [9]; 4 – SAP1,  $450^\circ\text{C}$  [9]; 5 – AK8,  $300^\circ\text{C}$  [9]; 6 – AK8,  $500^\circ\text{C}$  [9]