

**Ольга Анатольевна Яковцева<sup>1\*</sup>, Зарнигор Салимджон кизи Тураева<sup>1</sup>,  
Тамила Маратовна Марданшина<sup>1</sup>, Руслан Юрьевич Барков<sup>1</sup>, Андрей  
Геннадьевич Мочуговский<sup>1</sup>, Анастасия Владимировна Михайловская<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС», г. Москва

\**yakovtseva.aa@misis.ru*,

## ВЛИЯНИЕ ДОБАВОК НА ВКЛАДЫ МЕХАНИЗМОВ СВЕРХПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ Al-Mg-Mn-Cr-Zr

Получены сплавы системы Al-Mg-Mn-Cr-Zr с добавкой легирующих элементов Zn/Si стандартной термомеханической обработкой. Проанализированы в широком температурно-скоростном интервале испытания со ступенчатым изменением скорости и с постоянной скоростью деформации, выбраны оптимальные условия – температура 480 °С и скорость 0.005 1/с. Определены закономерности влияния состава сплавов на эволюцию микрозеренной структуры и развитие пористости при деформации с помощью светового и сканирующего электронного микроскопов. Количественно определены вклады каждого механизма сверхпластической деформации в зависимости от состава.

*Ключевые слова:* сверхпластичность, алюминиевые сплавы, механизмы деформации, микроструктура, зернограничное скольжение, внутризеренное дислокационное скольжение, диффузионная ползучесть.

***Olga A. Yakovtseva, Zarnigor Turaeva, Tamila M. Mardanshina, Ruslan Yu. Barkov, Andrey G. Mochugovskiy, Anastasia V. Mikhaylovskaya***

## EFFECT OF ADDITIVES ON THE CONTRIBUTIONS OF SUPERPLASTIC DEFORMATION MECHANISMS OF Al-Mg-Mn-Cr-Zr

Alloys of the Al-Mg-Mn-Cr-Zr system with a Zn/Si addition of alloying elements were obtained by standard thermomechanical treatment. Tests with a step by step changing strain rate and with a constant strain rate were analyzed in a wide temperature-strain rate range, the optimal conditions were selected - a temperature of 480 °C and a strain rate of 0.005 1/s. The patterns of the influence of the alloy composition on the evolution of the micrograin structure and porosity during deformation were determined using light and scanning electron microscopes. The contributions of each mechanism of superplastic deformation were quantitatively determined depending on the composition.

*Keywords:* superplasticity, aluminum alloys, deformation mechanisms, microstructure, grain boundary sliding, intragranular dislocation sliding, diffusion creep.

Современная промышленность быстро и динамично развивается. Все новые методы и материалы находят свое применение, однако развитие уже известных методов и улучшение используемых сплавов также привлекают внимание исследователей. Сверхпластическая формовка нашла свое применение в мелко- или среднесерийном производстве для авиа- и автопромышленности [1]. Сверхпластическая формовка позволяет получить на прессе при достаточно дешевой оснастке детали сложной формы за одну технологическую операцию при определенных температурно-скоростных условиях. Воспроизведение тонкого рельефа и возможность получения сложных форм привлекает заказчиков к использованию этого метода.

Наиболее применяемыми для сверхпластической формовки являются алюминиевые и титановые сплавы. Алюминиевые сплавы широко применяются для всех областей промышленности из-за своего распространения в природе, цены и хороших механических свойств [2, 3]. Разработка новых более дешевых материалов взамен используемых (например, сплава AA5083) всегда является актуальной задачей для исследователей.

Для изменения температурно-скоростных условий формовки или улучшения качества деталей из сплава необходимо понимание процессов, проходящих во время сверхпластической деформации. В связи с чем значимым является количественная оценка вкладов механизмов сверхпластической деформации и их изменение в процессе деформации.

Целью работы являлось определить влияние состава твердого раствора алюминия на эволюцию микроструктуры и вклады действующих при сверхпластической деформации механизмов в сплавах системы Al-Mg-Mn-Cr-Zr, легированных цинком или кремнием.

Стандартный сплав AA5083, модифицированный добавками циркония и цинка/кремния, получали литьем в медную водоохлаждаемую изложницу. Затем следовал гомогенизационный отжиг, горячая прокатка с толщины 20 мм на 60% и заключительная прокатка при комнатной температуре до толщины листа 1 мм.

Исходная микроструктура сплавов после холодной прокатки представлена волокнами, ширина которых варьируется от 9 до 16 мкм. Полученные листы подвергали отжигу, имитирующему выдержку в печи до начала сверхпластической деформации в интервале температур 440-520 °С. Микрозернистая структура слабо зависит от температуры и не зависит от наличия цинка или кремния, средний размер варьируется от 6 до 9 мкм.

Проведены испытания для выбора оптимальных температурно-скоростных условий деформации. Кривые напряжение-скорость деформации имеют характерную для сверхпластических сплавов сигмоидальную форму. Напряжение при деформации не превышает 20 МПа во всем температурном 460-520 °С интервале деформации, оптимальной выбрана скорость деформации 0.005 1/с, где для всех сплавов показатель скоростной чувствительности  $m$  превышает значение 0.5. Выбрана температура

деформации 480 °С, обеспечивающая во всех сплавах удлинения более 200% ( $\approx 1.2-1.6$ ).

Во время деформации при выбранном температурно-скоростном режиме наблюдали небольшое вытягивание зерна вдоль направления деформации, средний размер зерна 8-10 мкм.

Для определения механизмов деформации сплавов на полированную поверхность, деформированных до 100% (0.7) образцов, наносилась маркерная сетка при помощи ионного фокусированного пучка (рис. 1а). Сетка с шагом 10 мкм размерами 100x100 мкм<sup>2</sup> использовалась для анализа зернограницного скольжения и сетка 40x40 мкм<sup>2</sup> – для анализа внутризеренного дислокационного скольжения. Третий известный для сверхпластической деформации механизм, аналогично механизмам ползучести – диффузионная ползучесть, определяли без использования маркерной сетки, а по вкладу складчатых зон, вновь появившихся при деформации.

Образцы сплавов деформировали последовательно трижды (рис. 1б-г), истинную деформацию образцов определяли по изменениям размеров маркерной сетки.

Смещения линий маркерной сетки вдоль и поперек оси деформации заметны уже при небольшой деформации, что говорит о развитии вклада зернограницного скольжения. В сплаве Al-Mg-Mn-Cr-Zr-Zn при добавленной деформации до 0.4 (суммарно деформация составила 1.1=200%) вклад зернограницного скольжения менее  $\approx 35\%$ , тогда как в сплаве Al-Mg-Mn-Cr-Zr-Si при той же деформации значения достигают 50%, т.е. зернограницное скольжение является основным механизмом сверхпластической деформации.

Также вклад внутризеренного дислокационного скольжения выше в сплаве с кремнием 25% против 10% в сплаве с цинком, так как размытие внутри тела зерна в сплаве Al-Mg-Mn-Cr-Zr-Si заметно сильнее.

Расчет диффузионной ползучести определил основной механизм сверхпластической деформации в сплаве Al-Mg-Mn-Cr-Zr-Zn, где вклад составил более 50%, тогда как в сплаве с добавкой кремния вклад диффузионной ползучести около 25%, что говорит о аккомодационной роли в процессе деформации.

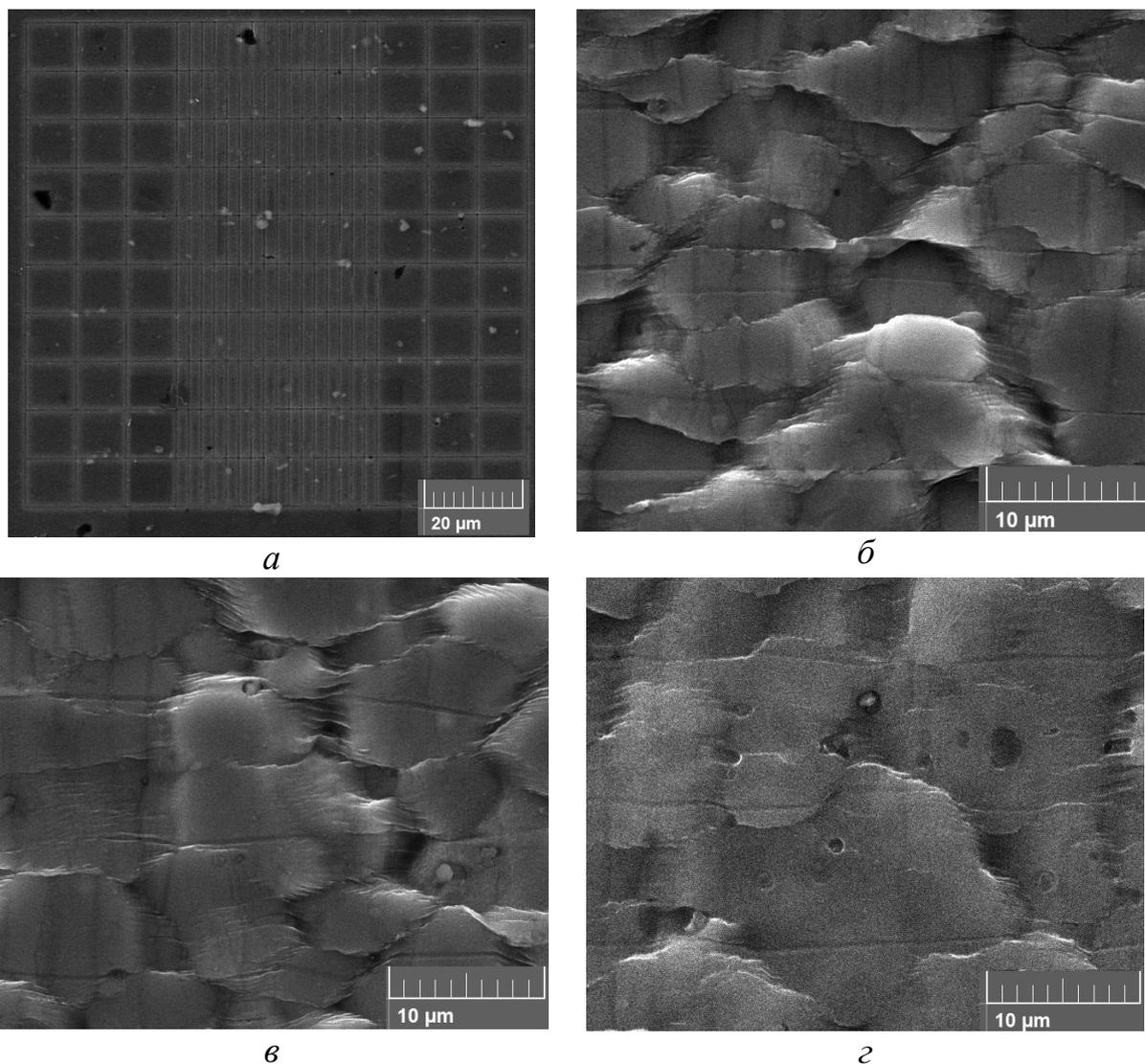


Рис. 1. Рельеф поверхности сплавов *а* – с исходной маркерной сеткой, после добавленной деформации 0.4 при температуре 480 °С и скорости 0.005 1/с *б* –Al-Mg-Mn-Cr-Zr, *в* –Al-Mg-Mn-Cr-Zr-Zn, *г* –Al-Mg-Mn-Cr-Zr-Si

В результате работы проведено сравнение микроструктуры в зависимости от легирующего элемента цинка или кремния, определены температурно-скоростные условия сверхпластической деформации и количественно проанализированы вклады действующих при сверхпластической деформации механизмов. Сплавы с исходным размером зерна до 10 мкм последовательно деформированы, наличие добавки цинка или кремния не сказывается на стабильности микроструктуры, однако при температуре 480 °С и скорости деформации 0.005 1/с в сплаве с цинком основным механизмом является диффузионная ползучесть, тогда как в сплаве с кремнием зернограничное скольжение, за счет чего снижается полученное относительное удлинение с 1.6 до 1.2 из-за большего развития пористости.

*Работа выполнена в рамках проекта РНФ № 23-79-01155.*

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Langdon T. G. Seventy-five years of superplasticity: historic developments and new opportunities // *Journal of Materials Science*. 2009. № 22 (44). С. 5998–6010.
2. Hsiao I. C., Huang J. C. Deformation mechanisms during low- and high-temperature superplasticity in 5083 Al-Mg alloy // *Metallurgical and Materials Transactions A: Physical Metallurgy and Materials Science*. 2002.
3. Xu X. [и др.]. Influence of large amount Zn on mechanical properties and corrosion resistance of 5083 hot rolled aluminum alloy // *Applied Physics A*. 2020. № 9 (126). С. 713.

## REFERENCES

1. Langdon T. G. Seventy-five years of superplasticity: historic developments and new opportunities // *Journal of Materials Science*. 2009. № 22 (44). С. 5998–6010.
2. Hsiao I. C., Huang J. C. Deformation mechanisms during low- and high-temperature superplasticity in 5083 Al-Mg alloy // *Metallurgical and Materials Transactions A: Physical Metallurgy and Materials Science*. 2002.
3. Xu X. [etc.]. Influence of large amount Zn on mechanical properties and corrosion resistance of 5083 hot rolled aluminum alloy // *Applied Physics A*. 2020. № 9 (126). С. 713.