

## РОЛЬ ПОВЕРХНОСТНЫХ СЛОЕВ И ГРАНИЦ ЗЕРЕН В ПОЛЗУЧЕСТИ ПОЛИКРИСТАЛЛОВ ПРИ ПОВЫШЕННОЙ ТЕМПЕРАТУРЕ

*Д.В.БОРИСЮК<sup>1</sup>, Т.Ф.ЕЛСУКОВА<sup>2</sup>*

<sup>1</sup>Томский политехнический университет

<sup>2</sup>Институт физики прочности и материаловедения СО РАН

E-mail: [dasha.94.5165@mail.ru](mailto:dasha.94.5165@mail.ru)

## THE ROLE OF SURFACE LAYERS AND GRAIN BOUNDARIES IN THE CREEP OF POLYCRYSTALS AT ELEVATED TEMPERATURE

*D.V.BORISYUK<sup>1</sup>, T.F.ELSUKOVA<sup>2</sup>*

<sup>1</sup>Tomsk Polytechnic University

<sup>2</sup>Institute of Strength Physics and Materials Science

E-mail: [dasha.94.5165@mail.ru](mailto:dasha.94.5165@mail.ru)

*Annotation.* On the basis of representations of physical mesomechanics investigated patterns of structural changes in polycrystalline aluminum on different stages of creep. Stages of creep are formed as the evolution of structural deformation levels, the scale of which increases in the sequence: micro, meso, macro. In the present work we focus on the meso and macrostructural levels of deformation that had previously not been considered in the description of the laws of the solids creep.

**Введение.** Ползучесть металлов является одним из наиболее важных процессов, развивающихся в материалах при постоянной нагрузке, даже если она не превышает предела текучести материала. Традиционно механизмы ползучести поликристаллов рассматриваются с использованием моделей теории дислокаций [1-3]. Большое количество теорий и моделей ползучести, известных в литературе, является следствием сложности этого процесса, контролируемого одновременно несколькими внешними (напряжение  $\sigma$ , температура  $T$ ) и внутренними (модуль упругости, энергия дефекта упаковки и т.п.) параметрами. Все они в общем случае отражают попытку увязать действие указанных параметров в рамках микромасштабного уровня деформации, что в настоящее время не имеет смысла.

В настоящей работе анализ закономерностей ползучести поликристаллов проводится на основе представлений физической мезомеханики, в основу которой положена концепция структурных уровней деформации [4, 5]. В соответствии с этой концепцией деформируемое твердое тело рассматривается как многоуровневая система, в которой пластическое течение развивается самосогласованно как последовательная эволюция потери сдвиговой устойчивости на различных масштабных уровнях (микро, мезо и макро). В мезомеханике основные закономерности пластического течения на мезоуровне связаны с образованием диссипативных мезоструктур и фрагментацией деформируемого твердого тела. А разрушение является завершающей стадией фрагментации, когда на макроуровне образуются два фрагмента.

В физической мезомеханике очень важным является положение о том, что твердое тело необходимо рассматривать состоящим из двух самостоятельных подсистем: 3D-кристаллической и 2D-планарной (поверхностные слои и все границы раздела). Ведущую функциональную роль в нагруженном твердом теле играет планарная подсистема, с ней связаны первичные пластические сдвиги и генерация всех деформационных дефектов [6].

В этой связи цель настоящей работы: исследование масштабных уровней пластической деформации в поверхностных слоях поликристаллов при ползучести.

**Материалы и методы исследования.** В настоящей работе в качестве материала исследования использовали поликристаллический высокочистый алюминий. Он имеет высокую сдвиговую устойчивость внутренней структуры вследствие высоких значений модуля сдвига  $G$  и энергии дефекта упаковки  $\gamma$ . Плоские образцы готовили прокаткой и штамповкой с последующим отжигом. Образцы имели вид двойной лопатки с размерами рабочей части  $(37 \times 8 \times 1)$  мм<sup>3</sup>.

Подготовку поверхности образцов для структурных исследований проводили методом электролитической полировки. Для измерения зернограницного скольжения (ЗГС) и распределения деформации по поликристаллу на полированную поверхность образцов перед испытанием наносили координатную сетку.

Испытания на ползучесть проводили в условиях растягивающей нагрузки при температуре 50°C и различных напряжениях.

Структурные исследования выполняли на металлографическом микроскопе Neophot-21, для трехмерного анализа геометрической структуры поверхности использовали сканирующий интерференционный микроскоп New View 6200.

**Результаты исследования.** Кривая ползучести в случае разрушения образца обычно состоит из трех стадий. На рисунке 1 представлены кривые ползучести алюминия при разных напряжениях, которые пока состоят из двух стадий т.к. до разрушения еще далеко.

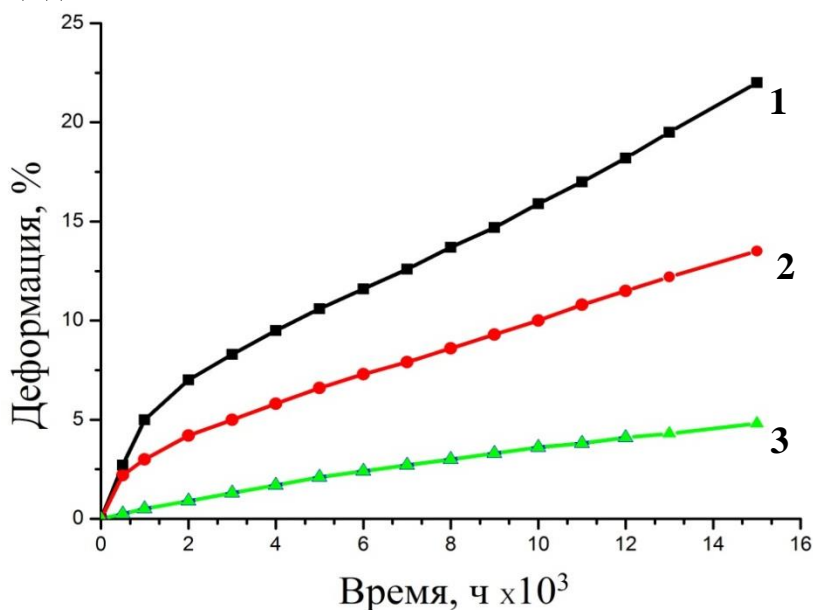


Рисунок 1 - Al A999, зависимости деформации ползучести от времени испытания при  $T=50^{\circ}\text{C}$  и различных напряжениях: 1 –  $\sigma = 1,3$  кгс/мм<sup>2</sup>; 2 –  $\sigma = 1,1$  кгс/мм<sup>2</sup>; 3 –  $\sigma = 0,9$  кгс/мм<sup>2</sup>

I стадия неустановившейся ползучести, при которой скорость деформации непрерывно понижается. В литературе ее обычно связывают с дислокационными механизмами скольжения на микроуровне, чему посвящено множество работ.

В настоящей работе основное внимание уделено мезомасштабному уровню, что соответствует II стадии ползучести. При этом преимущественно исследовали приграничные зоны и, особенно, стыки зерен.

На рисунке 2 представлена картина зоны стыка зерен А, В и С алюминия, в объеме которых реализовались крупные внутризеренные сдвиги в различных направлениях, соответствующих ориентации каждого из этих зерен.

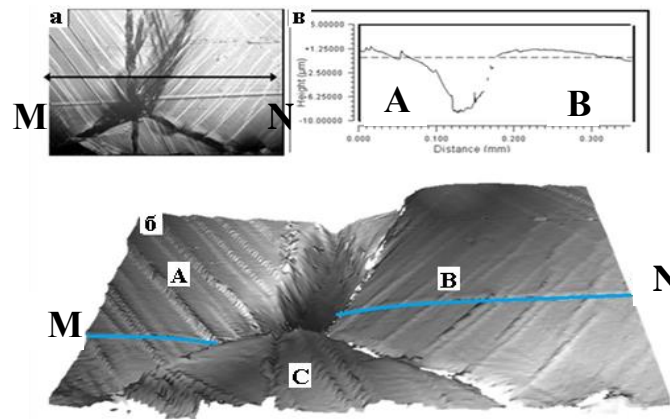


Рисунок 2 – Al A999,  $\sigma = 1,3 \text{ кг/мм}^2$ , II стадия, x200 (а), x500 (б). 3D –картина (New View)

Оптическая картина (рисунок 2, а) свидетельствует о горизонтальном сдвиге зерен А и В, что проявилось в заметном смещении частей риски MN, расположенных по разные стороны границы этих зерен. На объемной интерференционной картине этого места (рисунок 2, б) отчетливо видна сильная интрузия приграничной зоны зерен А и В с их горизонтальным перемещением друг относительно друга. Количественно интрузию демонстрирует профилограмма (рисунок 2, в). Естественно предположить, что в этой ситуации в стыке зерен сформировался мощный концентратор напряжений, который релаксировал путем генерации потока материала в приграничной зоне зерен А и В.

На рисунке 3 представлена граница двух зерен. Здесь убедительно показано, что полосы сдвига в зерне А исходят непосредственно из границы зерен. Из этого

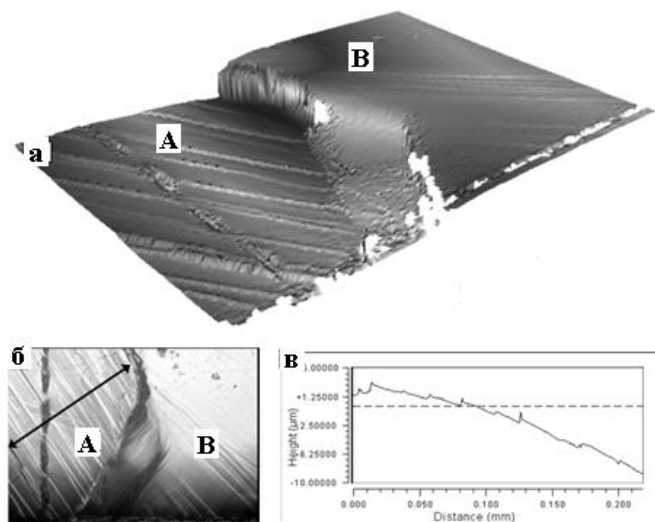


Рисунок 3 – Al A999,  $\sigma = 1,1 \text{ кг/мм}^2$ , II стадия, x500 (а), x200 (б). 3D –картина (New View)

факта следует, что первичным в данном случае является зернограничный сдвиг.

На рисунке 4 представлена другая приграничная зона. Она демонстрирует сильную кривизну зерна В в результате развития ЗГС.

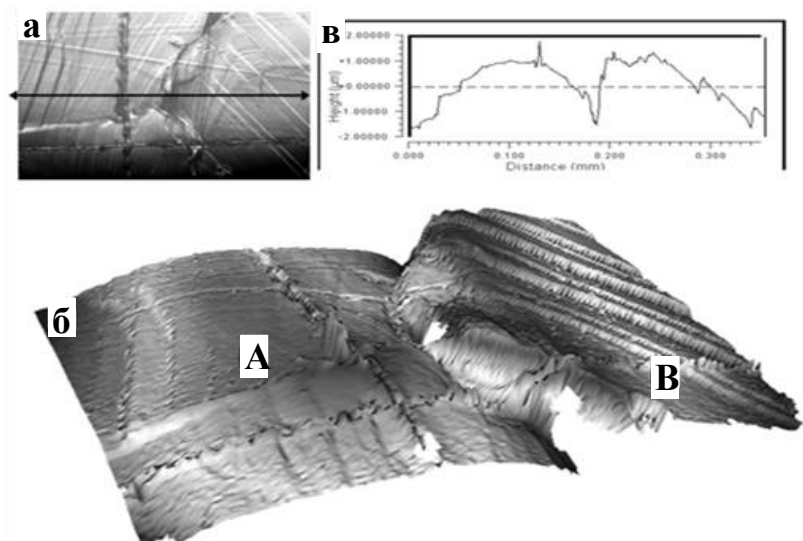


Рисунок 4 – Al A999,  $\sigma = 1,1 \text{ кг/мм}^2$ , II стадия, x200 (а), x500 (б). 3D –картина (New View)

На рисунке 5 представлена структура границы зерна В, испытывавшего ЗГС, нормальное к поверхности образца. При этом на границе выявлена система индивидуальных вертикальных полос скольжения, что также свидетельствует о первичности зернограничного сдвига.

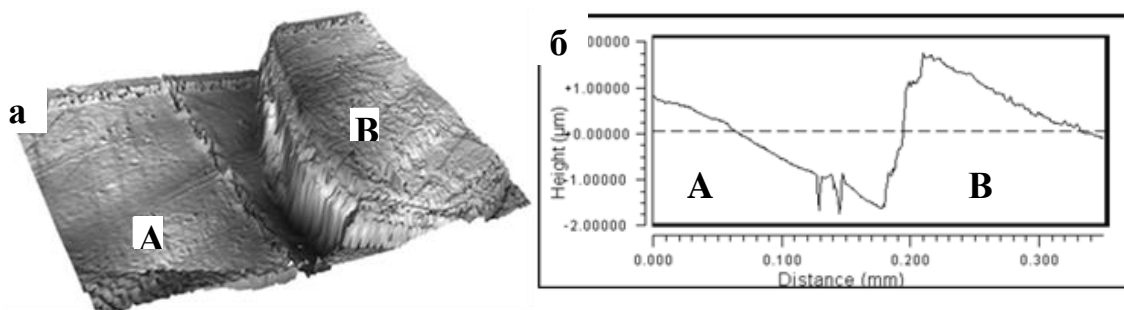


Рисунок 5 – Al A999,  $\sigma = 1,3 \text{ кг/мм}^2$ , II стадия, x500. 3D –картина (New View)

На рисунке 6 представлена еще одна приграничная зона зерен А и В алюминия. Здесь наблюдается сильно выраженный разрыв риски при ее пересечении с границей зерен, что свидетельствует об интенсивном зернограничном проскальзывании зерен А и В (рисунок 6, а). При этом сформировался очень грубый поверхностный рельеф из множественных полос сдвига на поверхности зерен, совмещенных с интрузией его правой части (рисунок 6 б, в).

Как видно из рисунков 2-6, где представлена картина структурных изменений на II стадии ползучести алюминия, наиболее эффективными концентраторами напряжений являются границы и, особенно, стыки зерен, от которых развиваются основные процессы, приводящие к ползучести материала. В этих условиях значи-

тельная часть деформации реализуется за счет скольжения по границам зерен и их поворотов.

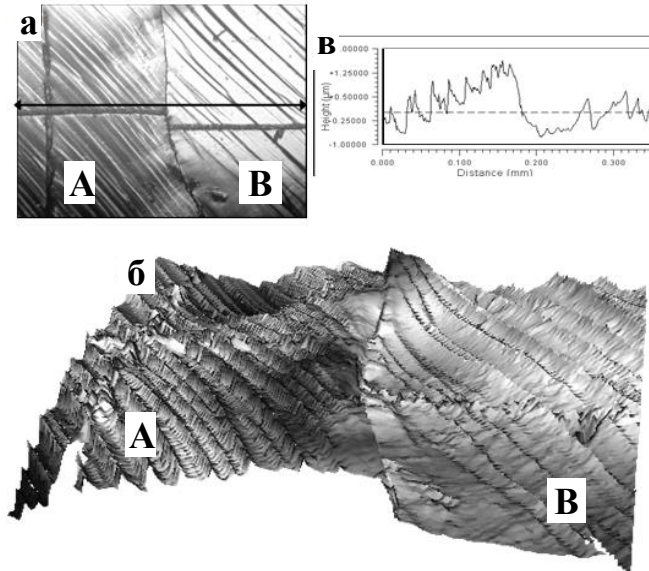


Рисунок 6 – Al A999,  $\sigma = 1,3 \text{ кг/мм}^2$ , II стадия, x200 (а), x500 (б). 3D –картина (New View)

Количественную оценку зернограницного скольжения проводили измерением расстояния между концами разорвавшейся риски на границе зерен. Результаты измерений приведены на рисунке 7.

Каждая точка на кривых зависимости ЗГС от времени является усредненным значением ЗГС по десяти измерениям. Видно, что зернограницное скольжение изменяется в процессе ползучести по такому же закону, как и общая деформация, что свидетельствует о том, что ведущим механизмом ползучести в данных условиях яв-

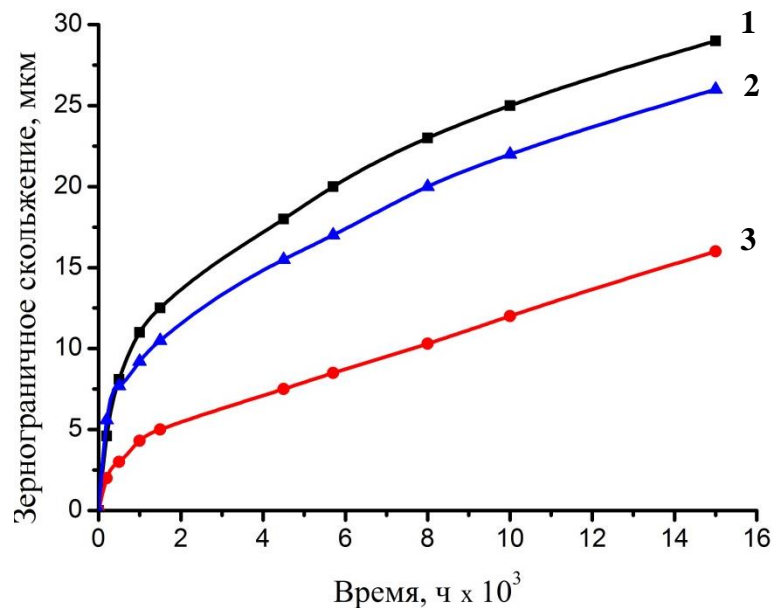


Рисунок 7 - Al A999, зависимости зернограницного скольжения от времени испытания при  $T=50^0 \text{ C}$  и различных напряжениях: 1 –  $\sigma = 1,3 \text{ кгс/мм}^2$ ; 2 –  $\sigma = 1,1 \text{ кгс/мм}^2$ ; 3 –  $\sigma = 0,9 \text{ кгс/мм}^2$

ляется ЗГС.

**Заключение.** В результате выполненной работы исследована функциональная роль планарной подсистемы в рамках многоуровневого описания пластической деформации поликристаллов, когда учитывается самосогласование 3D-кристаллической и 2D-планарной подсистем. Выявлена определяющая роль поверхностных слоев и, преимущественно, приграничных зон в развитии пластической деформации при ползучести поликристаллического алюминия. Установлены следующие основные закономерности:

1. Зернограничное скольжение в поликристаллических образцах высокочистого алюминия при ползучести вызывает развитие многоуровневых трансляционно – ротационных мод аккомодационного пластического течения с последующим расстрескиванием поверхностного слоя.

2. Методом лазерной профилометрии (New View) выявлены эффекты: основная аккомодационная деформация поворотного типа локализована в приграничных зонах, в которых материал испытывает вихревую деформацию (экструзия – интрузия, мезовихри, ламельная структура); вязкое вихревое пластическое течение в приграничной зоне связано с эффектами локализованной кривизны, которая генерирует экструзию материала, его расслоение.

Все эти данные свидетельствуют о первичности зернограничного скольжения при ползучести. Следовательно, для повышения сопротивления поликристалла ползучести следует блокировать в нем развитие зернограничного скольжения.

#### **Список литературы**

1. Розенберг В. М. Ползучесть металлов. – М.: Металлургия, 1975. – С. 7 – 16.
2. Трофилов В. И., Мильман Ю. В., Фирстов С. А. Физические основы прочности тугоплавких металлов. - Киев: Наукова думка, 1975 – 315с.
3. Пуарье Ж. П. Высокотемпературная пластичность кристаллических тел. – М. Металлургия, 1982. – 272с.
4. Панин В. Е., Гриняев Ю. В., Данилов В. Н. и др. Структурные уровни деформации при ползучести поликристаллов // Структурные уровни пластической деформации и разрушения. – Новосибирск: Наука, 1990. – с. 99 – 114.
5. Панин В. Е., Гриняев Ю. В., Елсукова Т.Ф., Иванчин А. Г. Структурные уровни деформации твердых тел.// Изв. Вузов. Физика. – 1982, №1 – С.1 – 8.
6. Панин В. Е., Панин А. В., Елсукова Т. Ф., Попкова Ю. Ф. Фундаментальная роль кривизны кристаллической структуры в пластичности и прочности твердых тел // Физическая мезомеханика. – 2014 – том 17 - №6 – с.7 - 18