

05

## Первичная макрофрагментация сдвига в монокристаллах алюминия при сжатии

© Д.В. Лычагин, Л.А. Теплякова

Томский государственный архитектурно-строительный университет  
E-mail: dvl-tomsk@mail.ru

Поступило в Редакцию 7 февраля 2003 г.

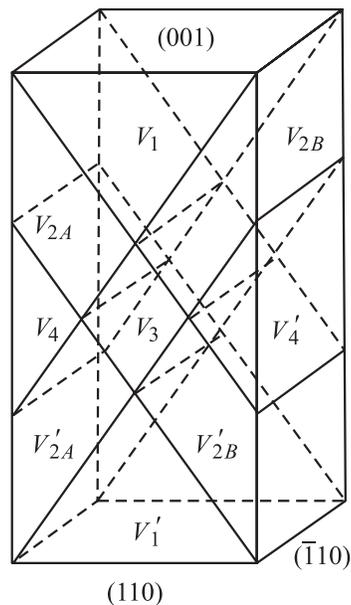
Представлены результаты экспериментального исследования картины деформационного рельефа, формирующегося на боковых гранях монокристалла алюминия на начальных этапах пластической деформации. Анализируются основные причины, от которых зависит характер разбиения монокристалла на макрофрагменты, которые отличаются друг от друга разным способом организации сдвига.

На явление разбиения монокристаллов на области с разной организацией сдвига при деформировании сжатием обращали внимание многие исследователи, но только в последнее десятилетие эти области были выделены как самостоятельный объект исследования. Их стали называть фрагментами или доменами сдвига. На макроуровне они изучались на монокристаллах ряда ГЦК металлов и сплавов, таких как никель, медь, алюминий, сплав  $Ni_3Fe$  в упорядоченном и разупорядоченном состояниях, интерметаллид  $Ni_3Ge$  [1–4]. В [5] установлено, что фрагментация сдвига наблюдается в широком интервале масштабов от макро до микро. В этой же работе экспериментально показано, что с ростом степени деформации вслед за фрагментами сдвига образуются фрагменты изгиба-кручения и поворота. Границы фрагментов могут служить местами образования полос суперлокализации деформации [6]. Между тем закономерности формирования макрофрагментов еще мало изучены и не выяснены все факторы, от которых зависит морфология макрофрагментов. Детальное изучение явления фрагментации, несомненно, важно для описания пластической деформации как процесса, протекающего на различных масштабных уровнях, в том числе, естественно, и на макроуровне. В связи с этим в настоящей работе была поставлена задача изучения закономерностей образования макрофрагментов сдвига при деформировании сжатием.

В работе исследовались монокристаллы алюминия с ориентацией оси сжатия  $[001]$  и боковых граней  $\{110\}$ . Образцы имели форму параллелепипеда с линейными размерами  $3 \times 3 \times 6$  mm. Ориентировку монокристаллов контролировали на рентгеновском аппарате ИРИС 3 по эпиграммам с точностью до  $2^\circ$ . Деформацию образцов осуществляли сжатием при комнатной температуре со скоростью  $3 \cdot 10^{-4} \text{ s}^{-1}$  на машине типа „Инстрон“. Отметим, что наиболее часто исследования деформационного рельефа выполняются на образцах, подвергнутых испытаниям на растяжение. Между тем большой интерес представляет исследование закономерностей эволюции картины следов сдвига при испытаниях на сжатие. В этом случае реализуется та же схема главных напряжений и деформаций, что и при наиболее часто используемых способах обработки металлов давлением: ковке и прокатке [7]. Картину деформационного рельефа в масштабе всего образца исследовали на растровом электронном микроскопе Tesla BS-301.

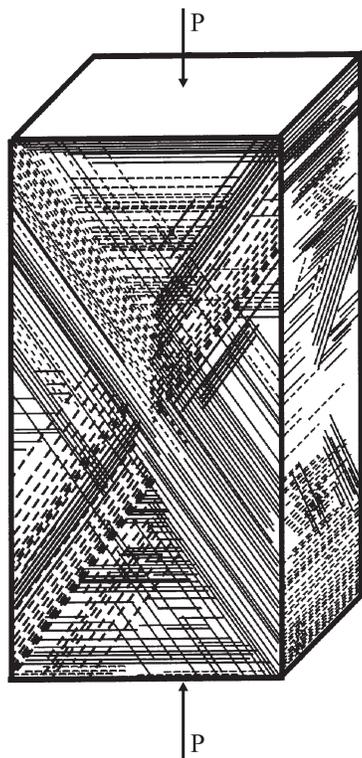
При исследованной ориентации оси сжатия равнонагруженными являются 8 (или 16 с учетом знака направления сдвига) систем октаэдрического скольжения. При этом на каждой из боковых граней монокристалла можно ожидать появления трех систем следов сдвига: двух наклонных и одной горизонтальной. Так, на грани  $(110)$  наклонные системы следов созданы сдвигом по плоскостям  $(\bar{1}11)$  и  $(1\bar{1}1)$ , а горизонтальные являются результатом сдвига по плоскостям  $(111)$  и  $(1\bar{1}\bar{1})$ . Если предположить, что из четырех семейств октаэдрических плоскостей основной макросдвиг происходит только по двум семействам, симметрично ориентированным относительно оси сжатия, то можно провести разбиение монокристалла на объемы, как представлено на рис. 1. В макрообъемах  $V_{2A} + V_3 + V'_{2A}$  и  $V_{2B} + V_3 + V'_{2B}$  плоскости октаэдрического сдвига имеют выходы на все боковые поверхности образца, а в макрообъемах  $V_1$  и  $V'_1$  плоскости сдвига с одной стороны контактируют с пуансонами испытательной машины. И наконец, макрообъемы  $V_4$  и  $V'_4$  имеют выход на свободные поверхности с трех сторон. В первом случае движение носителей сдвига может осуществляться по четырем направлениям (с учетом направлений противоположного знака) к свободным поверхностям. В объемах, примыкающих к пуансонам испытательной машины, движение носителей затрудняется в направлении к поверхности контакта.

На рис. 2 представлена схема типичной картины деформационного рельефа, формирующегося на двух взаимно перпендикулярных гранях



**Рис. 1.** Выделенные макрообъемы при макросдвиге по двум семействам октаэдрических плоскостей в деформированных ГЦК монокристаллах с ориентацией оси сжатия  $[001]$  и боковыми гранями  $\{110\}$ .

монокристалла после небольших степеней деформации. Как и следовало ожидать, наблюдается три системы следов сдвига. Несмотря на высокую симметрию ориентации оси нагружения, системы следов сдвига на гранях развиты неодинаково. На грани (110) одна из наклонных систем следов сдвига является более развитой. Наибольшая часть следов этой системы локализована в области, ограниченной выходами параллельных плоскостей октаэдра, проходящих через противоположные вершины грани, т.е. сдвиг происходил в объемах  $V_{2A} + V_3 + V'_{2A}$  (рис. 1). Визуально эта область с высокой плотностью следов воспринимается в виде макрополосы сдвига. Следующей по степени развитости является вторая наклонная система следов сдвига. Она является результатом сдвига в макрообъемах  $V_{2B} + V_3 + V'_{2B}$ . Плотность следов в этой системе меньше, чем в вышерассмотренной. По сути, эта система является



**Рис. 2.** Схема картины деформационного рельефа, сформированного на двух взаимно перпендикулярных гранях монокристалла алюминия после деформации на  $\varepsilon = 0.05$  (сплошными линиями изображены светлые следы, пунктирными — темные).

вторичной. В ней также можно выделить макрополосу сдвига. Третья система следов сдвига (система горизонтальных следов) локализована на грани (110) преимущественно в верхней и нижней ее частях (рис. 2). Для этой системы характерна невысокая плотность следов.

Таким образом, в монокристаллах алюминия, ориентированных для множественного скольжения, с самого начала пластической деформации сдвиг локализуется во вполне определенных областях монокристалла,

т.е. развивается фрагментация сдвига на макроуровне. Важно подчеркнуть, что, несмотря на высокую симметрию ориентировки монокристалла, из четырех равнонагруженных плоскостей октаэдрического скольжения макролокализация сдвига происходит только в двух из них, причем и их активность неодинакова. Другими словами, при сжатии высокосимметричного монокристалла наблюдается существенная асимметрия сдвига в масштабе образца. Причинами возникновения асимметрии сдвига могут быть: 1) даже незначительные отклонения от точной ориентировки, 2) неконтролируемая непараллельность пуансонов испытательной машины друг другу и торцам образца, 3) неровность поверхности торцов, приводящая к возникновению пятен контакта. В результате реализации хотя бы одной из этих причин возникновение асимметрии сдвига в обычных условиях деформирования в значительной степени предопределено. Однако какая из возможных систем сдвига начнет работать первой, предсказать до опыта практически невозможно. Возникшая асимметрия сдвига сказывается на морфологии первичных макрофрагментов: в области монокристалла, где идет образование и развитие деформации по одной системе сдвига, деформация по другой системе затруднена.

Известно [7], что при деформировании сжатием в соседних макрообъемах образца возможна реализация разных схем главных напряжений. В приторцевых областях за счет силы трения между пуансоном и образцом реализуется схема всестороннего сжатия, а в центральной части образца при умеренных деформациях и высоте больше ширины образца имеет место схема одноосного сжатия. Сопоставление этих схем со схемами локализации систем следов сдвига (рис. 2) и схемами выделенных макрообъемов (рис. 1) позволяет сделать вывод, что при сжатии форма макрофрагментов однозначно определяется формой образца, ориентацией оси сжатия и граней монокристалла, т.е. его кристаллогеометрическими характеристиками. Логично такую фрагментацию называть первичной. Она развивается с самого начала пластической деформации. Первичные фрагменты (макрофрагменты) являются наиболее крупными из фрагментов, образующихся в исследованных монокристаллах при пластической деформации сдвигом. Их линейные размеры соизмеримы с линейными размерами монокристалла.

При проведении анализа следует особо отметить важность учета кристаллографической ориентации боковых граней монокристалла. Действительно, как установлено в настоящей работе, от взаимной ориен-

тации направлений сдвига и боковых граней монокристалла зависит, в какой из областей кристалла начнется сдвиг, а также линейные размеры этих областей. Наиболее интенсивный сдвиг наблюдается в тех макрообъемах монокристалла, в которых направление сдвига начинается и заканчивается на свободных поверхностях.

## Список литературы

- [1] *Старенченко В.А., Черных Л.Г., Иванова Н.Ю.* // Изв. вузов. Физика. 1989. № 8. С. 116–118.
- [2] *Абзаев Ю.А., Старенченко В.А., Соловьева Ю.В.* и др. // Прикладная механика и техническая физика. 1998. Т. 39. № 1. С. 154–159.
- [3] *Теплякова Л.А., Куницына Т.С., Конева Н.А.* и др. // Физическая мезомеханика. 2000. Т. 3. № 5. С. 77–82.
- [4] *Теплякова Л.А., Шаехов Р.В., Лычагин Д.В.* // Современные проблемы прочности. Труды II междунар. семинара. Новгород: НовГУ, 2001. Т. 1. С. 168–172.
- [5] *Теплякова Л.А.* // Автореф. дис. ...докт. физ.-мат. наук. Томск, 1999. 43 с.
- [6] *Старенченко В.А.* Автореф. дис. ...докт. физ.-мат. наук. Томск, 1991. 39 с.
- [7] *Губкин С.И.* Пластическая деформация металлов. М.: Металлургиздат, 1961. Т. 1. 376 с.