

АНАЛИЗ МЕХАНИЗМОВ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ СПЛАВА  
НА ОСНОВЕ АЛЮМИНИЯ ПРИ РАЗНЫХ  
ТЕМПЕРАТУРНО-СКОРОСТНЫХ РЕЖИМАХ

© 2010 г. М. М. Мышляев, С. Ю. Миронов, Ю. А. Перлович, М. Г. Исаенкова

Представлено академиком О.А. Банных 24.08.2009 г.

Поступило 24.08.2009 г.

Сверхпластичность наблюдается в образцах при строго определенных температурно-скоростных условиях. Промышленное использование эффекта сверхпластичности требует совершенствования методов предварительной подготовки мелкозернистой и ультрамелкозернистой структур, с одной стороны, и понимания механизмов, обеспечивающих максимальное проявление эффекта, с другой. Данное исследование посвящено анализу механизмов пластической деформации при различных температурно-скоростных условиях, включая отвечающие сверхпластичному течению в материале.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДИКИ  
ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Опыты выполнены на алюминиевом сплаве 1420 (Al–5.5%Mg–2.2%Li–0.12%Zr), претерпевшем интенсивную пластическую деформацию посредством 10-кратного равноканального углового прессования (РКУП) на воздухе при 370°C по известному маршруту В [1], что привело к измельчению зерен в исходном материале до ~1.5 мкм.

Из РКУП-прутков изготавливали плоские образцы для механических испытаний. Образцы имели толщину 0.85 мм и длину рабочей части 5 мм. Их деформировали на испытательной машине Instron при одноосном растяжении вдоль их оси при различных температурах и скоростях растяжения. Направление растяжения испытываемых образцов совпадало с направлением оси

прутка. Более полное описание приготовления и испытания образцов приведено в [2, 3].

В работе [4] изучено и обсуждено механическое поведение исследуемого РКУП-сплава. В настоящей работе представлялось целесообразным исследовать текстуру в деформированных образцах и ее особенности, поскольку кристаллографическая текстура является чрезвычайно чувствительным индикатором механизмов, действующих в металлических материалах в процессе пластической деформации. Для ее анализа использован метод дифракции обратнорассеянных электронов. Текстуру исследуемых образцов описывали с помощью прямых и обратных полюсных фигур.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ  
И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты испытания образцов представлены в табл. 1. Проведен анализ изменения текстуры в процессе деформации по данным для образцов А, В, С, D и взаимной корреляции следующих характеристик:

максимальное удлинение  $\delta$  и скорость растяжения  $V$  по данным для образцов E, D, F, рассматриваемым в порядке увеличения  $V$  (0.5, 5, 50 мм/мин);

Таблица 1. Результаты испытания образцов

Образец	$T, ^\circ\text{C}$	$V, \text{мм/мин}$	$\delta, \%$
А (исходное состояние)	—	—	—
Н	450	30	120
G	275	30	100
С	370	5	500
E	370	0.5	900
В	370	5	100
F	370	50	500
D	370	5	1000

Институт металлургии и материаловедения  
им. А.А. Байкова

Российской Академии наук, Москва

Институт физики твердого тела

Российской Академии наук,

Черноголовка, Московской обл.

Институт проблем сверхпластичности металлов

Российской Академии наук, Уфа

Московский инженерно-физический институт

(технический университет)

максимальное удлинение  $\delta$  и температуры деформации  $T$  по данным для образцов G, D, H, рассматриваемым в порядке увеличения  $T$  (275, 370, 450°C).

Корреляционные зависимости характеризуются наличием максимума, соответствующего среднему образцу в каждой из указанных последовательностей.

На рисунок 1 представлены обратные и прямые полюсные фигуры образцов A, B, C и D, отвечающих возрастанию деформации.

В основу интерпретации полученных текстурных данных был заложен принцип, согласно которому действие кристаллографически регламентированных механизмов деформации, включающих скольжение и двойникование по определенным кристаллографическим плоскостям и направлениям, приводит к развитию в деформируемом материале кристаллографической текстуры, а деформация посредством взаимного сдвига зерен по некристаллографическим межзеренным границам не сопряжена с формированием кристаллографической текстуры и вызывает ослабление и рассеяние текстуры, существовавшей в материале первоначально.

При РКУП прутков в них формируется текстура, подобная текстуре прокатки, повернутой на некоторый угол вокруг поперечного направления [5]. В первом приближении прокатку описывают как комбинацию растяжения вдоль направления прокатки и сжатия вдоль нормального направления, т.е. перпендикулярно плоскости прокатки. Сходство текстуры РКУП с повернутой текстурой прокатки свидетельствует о взаимном соответствии главных напряжений, действовавших в деформируемом материале в обоих случаях. Тогда в случае РКУП реализуется следующее напряженное состояние: направление растяжения отклонено от оси прутка на  $\sim 20^\circ$ , а направление сжатия — на  $70^\circ$  [5]. Правильность такого заключения подтверждается особенностями искажения делительной сетки, нанесенной на боковую поверхность прутка, деформируемого посредством РКУП [6]. Величины указанных выше углов зависят от особенностей процесса прессования: конструкции матрицы, наличия смазки и т.п.

Случайный характер расположения максимумов на полюсных фигурах образца A (рис. 1) объясняется произвольностью ориентации плоскости пластины, вырезаемой из прутка параллельно его оси, при неаксиальной деформационной схеме РКУП. Характеристикой рассеяния текстуры, оцениваемого по прямым и обратным полюсным фигурам, служит количество и интенсивность текстурных максимумов: по мере рассеяния текстуры число максимумов увеличивается, а их интенсивность падает. Изменение максимального значения полюсной плотности  $P$  на обратных полюсных фигурах с ростом деформации приведено

на рис. 1. В результате активизации кристаллографического скольжения размытая текстура образца A ( $P_{\max} = 1.64$ ) усиливается в образце B, что приводит к росту максимальной полюсной плотности на обратной полюсной фигуре до 3.28. В образцах C и D максимальная полюсная плотность на обратной полюсной фигуре снижается до 2.79 и 2.25 соответственно, что свидетельствует о развитии в них некристаллографических механизмов деформации.

С увеличением степени деформации от 100 до 1000% наблюдается существенное изменение кристаллографической текстуры образцов. Сначала при  $\epsilon \leq 100\%$  в образцах формируется текстура растяжения с осью  $\langle 111 \rangle$  (рис. 1, образец B), характерная для ГЦК-металлов [7]. При этом деформирующиеся зерна поворачиваются таким образом, что с направлением растяжения в них совпадают оси  $\langle 111 \rangle$ . Такая текстура формируется в ГЦК-металлах в результате активизации скольжения в системах  $\{111\}\langle 011 \rangle$ .

При увеличении степени деформации до 500% наблюдается изменение преобладающего кристаллографического направления, совпадающего с направлением растяжения, и вместо компоненты  $\langle 111 \rangle$  появляется компонента  $\langle 110 \rangle$  (рис. 1, образец C). Изменение текстуры может быть связано либо со сменой действующих систем скольжения, либо с развитием динамической рекристаллизации. Для образца, деформированного до 1000%, характерно рассеяние текстуры, что указывает на активизацию некристаллографических механизмов пластической деформации, связанных с неупорядоченным проскальзыванием зерен по межзеренным границам. Активизация таких механизмов становится возможной в силу затруднения процессов кристаллографического скольжения. Таким образом, согласно данным текстурного анализа, становится очевидным, что первоначальное преобладание кристаллографических механизмов пластической деформации с ростом степени деформации постепенно сменяется зернограницным проскальзыванием в структуре, претерпевающей динамическую рекристаллизацию.

Кристаллографическая текстура всех образцов, деформированных при 370°C с использованием разных скоростей растяжения от 0.5 до 50 мм/мин, размыта и различается лишь большей или меньшей степенью рассеяния текстуры. Однако однозначной корреляции между степенью размытия текстуры и скоростью деформирования выявить не удалось.

Зависимость максимальной деформации до разрушения образцов от температуры деформирования также характеризуется наличием максимума при 370°C и скорости растяжения 5 мм/мин. Образцам, деформированным в таких условиях, отвечает наибольшее размытие текстуры, что свидетельствует об интенсивном развитии в них зер-

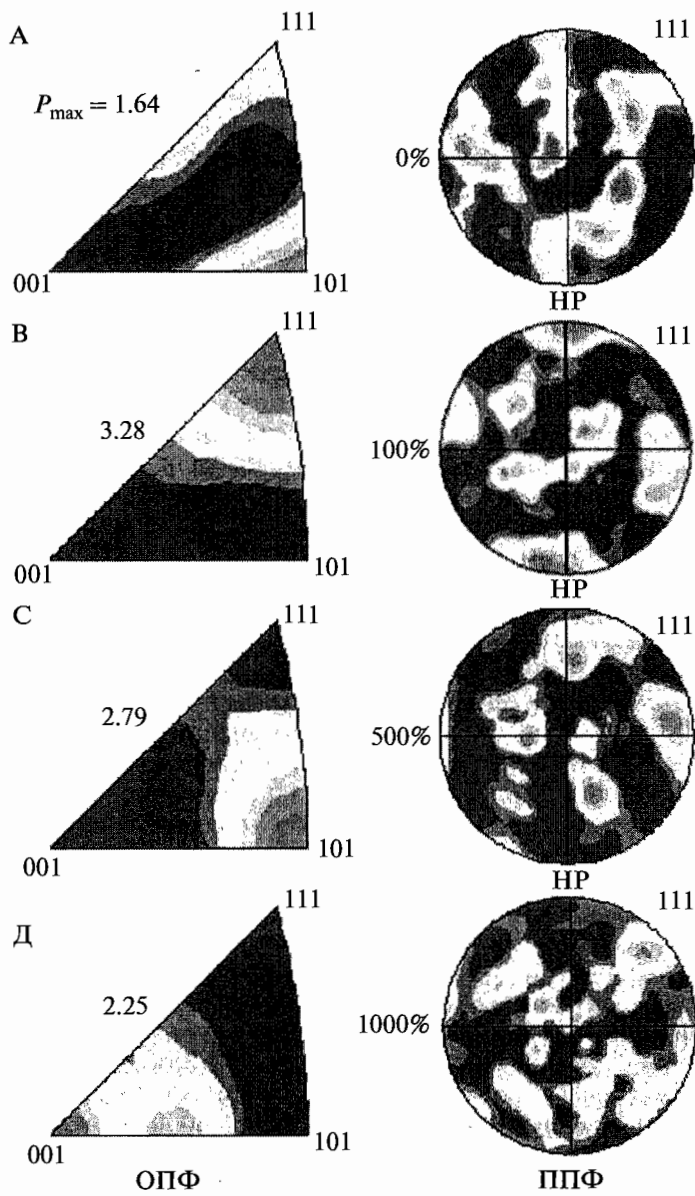


Рис. 1. Эволюция текстуры в процессе растяжения при 370°С. ОПФ и ППФ — обратные и прямые полюсные фигуры. НР — направление растяжения.  $P$  — максимальная полюсная плотность.

нограничного проскальзывания. При температурах деформирования выше 370°С происходит интенсивный рост зерен, что приводит к появлению отдельных острых текстурных максимумов, случайно располагающихся на полюсных фигурах. Одновременное варьирование температуры и скорости деформирования не позволяет надежно выявить роль каждого из этих факторов при температурах ниже температуры, оптимальной для сверхпластического течения.

Таким образом, методом дифракции обратно-рассеянных электронов исследованы кристаллографическая текстура и ее особенности в образцах, деформированных по разным температурно-

скоростным режимам. Текстуру исследуемых образцов описывали с помощью прямых и обратных полюсных фигур.

Изучена эволюция текстуры в процессе деформации в условиях сверхпластичности. Установлено, что в процессе пластической деформации в этих условиях происходит существенное изменение текстуры образцов. Показано, что на начальном этапе деформирования пластическая деформация происходит в результате активизации внутризеренного кристаллографического скольжения по системам {111}<011>. С ростом степени деформации внутризеренное скольжение сменя-

ется зернограницным проскальзыванием в условиях динамической рекристаллизации.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Furukawa M., Iwahashi Y., Horita Z. et al. // Math. Sci. Eng. 1998. V. A257. P. 328.
2. Мышляев М.М., Миронов С.Ю., Коновалова Е.В. и др. // Физика металлов и металловедение. 2006. Т. 102. № 3. С. 350–354.
3. Мышляев М.М., Камалов М.М., Мышляева М.М., Коновалова Е.В. // Материаловедение. 2007. Т. 4. С. 35–41.
4. Мышляев М.М., Шнейцман В.В., Камалов М.М. ФТТ. 2001. Т. 43. С. 833.
5. Perlovich Yu., Isaenkova M., Fesenko V. et al. // Materials Sci. Forum. 2006. V. 503/504. P. 859–864.
6. Baik S.C., Estrin Yu., Kim H.S. et al. // Materials. Sci. Forum. 2002. V. 408/412. P. 697–702.
7. Вишняков Я.Д., Бабарэко А.А., Владимиров С.А., Эгиз И.В. Теория образования текстур в металлах и сплавах. М.: Наука, 1979. 320 с.