

Исследование структуры и свойств Structure and properties research

Физические методы исследования и контроля

Physical methods of research and monitoring

DOI: 10.26896/1028-6861-2018-84-8-25-31

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕКСТУРЫ И МЕХАНИЗМОВ ДЕФОРМАЦИИ В МАГНИЕВОМ СПЛАВЕ МА2-1пч В ПРОЦЕССЕ РОТАЦИОННОЙ КОВКИ

© Владимир Нинелович Серебряный¹, Илья Анатольевич Малышев¹,
Дмитрий Николаевич Цайклер², Наталья Сергеевна Мартыненко^{1,2},
Михаил Михайлович Морозов¹, Сергей Владимирович Добаткин^{1,2}

¹ Институт металлургии и материаловедения имени А. А. Байкова РАН (ИМЕТ РАН), Москва, Россия;
e-mail: vns@imet.ac.ru

² Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», Москва, Россия;
e-mail: caikler_dima@mail.ru

Статья поступила 28 ноября 2017 г.

Представлены результаты применения количественного рентгеноструктурного текстурного анализа (построение функции распределения ориентировок на основании измерения прямых полюсных фигур) и моделирования текстурообразования в рамках термоактивационной модели. Исследовали особенности формирования текстуры в магниевом сплаве МА2-1пч, подвергнутом ротационной ковке (РК) в диапазоне температур 400 – 350 °C. С ростом суммарных истинных деформаций до $\varepsilon = 2,77$ и понижением температуры в сплаве образуется рассеянная текстура, состоящая из базисных и наклоненных к направлению прессования базисных полюсов. Модельные текстуры хорошо согласуются с экспериментальными при условии, что РК обеспечивается действием базисного ($\{0001\}\langle11\bar{2}0\rangle$), призматического ($\{10\bar{1}0\}\langle11\bar{2}0\rangle$) скольжений и двойникования по системам $\{10\bar{1}2\}\langle1011\rangle$, $\{10\bar{1}1\}\langle1012\rangle$, $\{11\bar{2}1\}\langle1\bar{1}26\rangle$. Математическое моделирование текстур также показывает, что с ростом суммарных деформаций и понижением температуры РК активность систем двойникования возрастает в последовательности $\{10\bar{1}2\}\langle1011\rangle$, $\{10\bar{1}1\}\langle1012\rangle$, $\{11\bar{2}1\}\langle1\bar{1}26\rangle$. Полученные результаты согласуются с микроструктурными данными. Вместе с тем рассчитанные по текстуре разности ориентационных факторов между начальным состоянием сплава и состоянием после РК свидетельствуют об активизации базисного скольжения и систем двойникования, а также затрудненности призматического скольжения. Установили, что при температуре 350 °C с суммарной истинной деформацией $\varepsilon = 2,77$ основные механизмы деформации (базисное скольжение и двойникование по системам $\{10\bar{1}2\}\langle1011\rangle$, $\{10\bar{1}1\}\langle1012\rangle$, $\{11\bar{2}1\}\langle1\bar{1}26\rangle$), обеспечивающие изменение текстуры в процессе РК, стимулируют повышение механических свойств исследуемого сплава.

Ключевые слова: прямая полюсная фигура; функция распределения ориентировок; ориентационный фактор; базисное и призматическое скольжение; двойникование; термоактивационная модель текстурообразования; ротационная ковка; магниевый сплав МА2-1пч.

STUDY OF THE TEXTURE AND DEFORMATION MECHANISMS OF MA2-1pch MAGNESIUM ALLOY UPON ROTARY SWAGING

© Vladimir N. Serebryany¹, Il'ya A. Malyshev¹, Dmitriy N. Caikler²,
Natal'ya S. Martynenko^{1,2}, Mikhail M. Morozov¹, Sergey V. Dobatkin^{1,2}

¹ Baikov Institute of Metallurgy and Materials, RAS (IMET RAS), Moscow, Russia; e-mail: vns@imet.ac.ru
² National University of Science and Technology (MISIS), Moscow, Russia; e-mail: caikler_dima@mail.ru

Submitted November 28, 2017.

The use of quantitative X-ray texture analysis (QXRTA) (construction of the orientation distribution function (ODF) proceeding from the measurement of direct pole figures) and simulation of the texture formation in the framework of thermoactivation model (TA) are considered to study the features of texture formation in MA2-1pch magnesium alloy subjected to rotary swaging (RS) at 400 – 350°C. A diffuse texture consisting of basic and inclined to the pressing direction basic poles is formed in the alloy when temperature decreases and the total true deformations increase up to $\varepsilon = 2.77$. Model textures match experimental textures rather well when RS is provided by the action of basic ($\{0001\} \langle 11\bar{2}0 \rangle$, prismatic ($\{10\bar{1}0\} \langle 11\bar{2}0 \rangle$) slip and twinning by the systems $\{10\bar{1}2\} \langle 10\bar{1}1 \rangle$, $\{10\bar{1}1\} \langle 10\bar{1}2 \rangle$, $\{11\bar{2}1\} \langle 11\bar{2}6 \rangle$). Mathematical modeling of the textures also shows that the activity of the twinning systems under consideration increases in the sequence $\{10\bar{1}2\} \langle 10\bar{1}1 \rangle$, $\{10\bar{1}1\} \langle 10\bar{1}2 \rangle$, $\{11\bar{2}1\} \langle 11\bar{2}6 \rangle$ as the total deformations grow and RS temperature decreases. Those results are consistent with the previously obtained microstructural data. However, the differences in the orientation factors calculated for the initial state of the alloy and state after RS indicated to the activation of the basal slip and twinning systems under consideration, as well as to the difficulty of prismatic sliding. The obtained data are also consistent with the results of mathematical modeling of textures. At a temperature of 350°C at a total true deformation of 2.77 the basic deformation mechanisms (the basic slip and twinning by the systems $\{10\bar{1}2\} \langle 10\bar{1}1 \rangle$, $\{10\bar{1}1\} \langle 10\bar{1}2 \rangle$, $\{11\bar{2}1\} \langle 11\bar{2}6 \rangle$) which ensure texture changes upon RS stimulate an enhance in the mechanical properties of magnesium alloy MA2-1pch bars.

Keywords: direct pole figure; orientation distribution function; orientation factor; basic and prismatic slip; twinning; thermoactivation model of texture formation; rotary swaging; magnesium alloy MA2-1pch.

Ротационная ковка (РК) — метод интенсивной пластической деформации [1, 2] — с одновременным ростом суммарной деформации и понижением температуры приводит к измельчению зерна в магниевом сплавах, что позволяет повысить их прочностные свойства [3 – 5]. Вместе с тем в процессе РК в сплавах происходит заметное изменение текстуры, характеризующееся равномерным спектром ориентировок от базисных до призматических, а также рассеянием основных ориентировок вследствие фрагментации зерен из-за двойникования [4 – 7], что при определенных режимах температуры и степени деформации способствует повышению их пластичности [5].

Цель работы — изучение эволюции текстуры и анализ механизмов деформации в магниевом сплаве MA2-1пч в процессе РК, приводящих к повышению его прочностных и пластических свойств.

Исследовали магниевый сплав MA2-1пч, содержащий, % масс.: 4,4 Al, 0,9 Zn, 0,4 Mn. РК (рис. 1) осуществляли на ротационно-ковочной машине РКМ В-2129 на образцах (прутках) сплава диаметром 20 мм, вырезанных из горячекатаной плиты вдоль направления прокатки (частота и величина хода бойков — 1920 мин⁻¹ и 3 мм соответственно). При этом на один оборот образца вокруг своей оси приходилось восемь ударов бойков. Деформацию проводили в три этапа по режимам: 1) 400 °C, $\varepsilon = 0,58$; 2) 375 °C, $\varepsilon = 0,81$ (суммарная деформация по двум режимам $\varepsilon = 1,39$); 3) 350 °C, $\varepsilon = 1,38$ (суммарная деформация по трем режимам $\varepsilon = 2,77$) [5]. Конечный диаметр прутков после РК составлял 5 мм.

Текстуру сплава в плоскости, параллельной оси прутка, исследовали на рентгеновском текстурном дифрактометре «ДРОН-7» в CuKa-излучении в режиме отражения с помощью съемки пяти неполных полюсных фигур $\{10.2\}$, $\{11.0\}$, $\{10.3\}$, $\{00.4\}$ и $\{20.2\}$ с максимальным углом наклона $\alpha_{\max} = 70^\circ$ и шагом по углам α и β (0 – 360°), равным 5° (α и β — радиальный и азимутальный углы на полюсной фигуре).

Функцию распределения ориентировок (ФРО) рассчитывали по измеряемым полюсным фигурам, представляя ее в виде суперпозиции большого числа (2000) стандартных распределений с одинаковым маленьkim рассеянием. Центры стандартных функций располагались на регулярной трехмерной сетке в ориентационном пространстве [8]. По данной ФРО также рассчитывали полные полюсные фигуры.

Построенная ФРО — эталонная функция, так как позволяет оценить трехмерную текстурную функцию с учетом ее многокомпонентности и большого рассеяния максимумов. Однако работать с таким представлением трехмерной функции чрезвычайно трудно из-за большого количества стандартных текстурных функций, часто перекрывающихся вследствие близкого их расположения в трехмерном ориентационном пространстве.

Практически всегда подобному представлению ФРО можно поставить в соответствие приближение трехмерной функции в виде суммы нескольких стандартных функций (текстурных

компонент, идеальных ориентировок с рассеянием):

$$f(\mathbf{g}) = \sum_{i=1}^N W_i f^s(g, g_i, \varepsilon_i), \quad (1)$$

где N — количество стандартных функций; W_i , g_i — объемная доля и положение центра i -й функции; ε_i — параметр рассеяния.

Набор текстурных компонент выбирали после анализа сечений ФРО, рассчитанной из экспериментальных полюсных фигур. Полученные данные по ориентировкам, включающие три Эйлеровых угла и предварительные параметры W_i и ε_i , обрабатывали с помощью специального программного обеспечения [8].

В качестве критерия адекватности определения набора ориентировок использовали минимум величины среднеквадратичного отклонения между восстановленной по полюсным фигурам ФРО и ФРО, представленной суммой отдельных ориентировок (1).

Количественный анализ текстур методом аппроксимации большим числом гауссовых нормальных распределений дает возможность оценить обобщенные факторы Шмида для активных систем деформаций в исследуемом материале. Ориентационные факторы, зависящие от обобщенных факторов Шмида, определяли, используя следующие соотношения [9]:

$$M_i = 1/m_i, \quad (2)$$

где $m_i = \sum_{j=1}^p m_{ij} W_j$ — обобщенные факторы Шмида для базисного, призматического и пирамидального скольжений и двойникования; m_{ij} — ориентационный фактор Шмида, рассчитанный для i -й системы скольжения и j -й компоненты текстуры; W_j — объемная доля j -й компоненты текстуры; p — число компонент текстуры.

Моделирование текстуры в процессе РК проводили в рамках термоактивационной модели Тейлора с использованием компьютерной программы Texturer [10–12]. Предполагали, что пластическая деформация сплава в исследуемых интервалах температур и деформаций обеспечивается действием базисного ($\{0001\} \langle 1120 \rangle$), призматического ($\{1010\} \langle 1120 \rangle$) скольжений и двойникования по системам $\{1012\} \langle 1011 \rangle$, $\{1011\} \langle 1012 \rangle$, $\{1121\} \langle 1126 \rangle$ [5, 6] с соотношением критических напряжений сдвига (КНС), определяемых из сопоставления экспериментальных и расчетных полюсных фигур и ФРО. Объемную долю зерен, где действуют системы двойникования вместе с системами скольжения (зерна, содержащие двойники), оценивали из анализа микро-

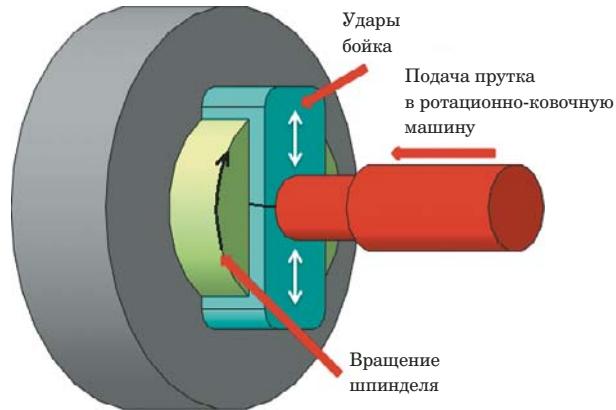


Рис. 1. Схема ротационной ковки

структурных данных [5]. В остальных зернах (не содержащих двойников) деформационные сдвиги и повороты кристаллической решетки вызваны действием только систем скольжения.

В диалоговом режиме задавали условия деформации: компоненты тензора скоростей деформации образца, степень результирующей деформации, скорость деформации (рассчитывали исходя из параметров и режимов работы РКМ), энергию активации преодоления энергетических барьеров движущимися дислокациями (зависит от температуры деформации), число кристаллитов и объемную долю зерен, в которых потенциально возможно действие двойникования. Получаемые данные содержали ориентировки исходной текстуры материала перед моделированием и набор систем скольжения и двойникования с КНС на них.

Результаты измерений текстуры после РК представлены на рис. 2. Видно, что в исходном горячекатаном состоянии в плоскости, параллельной оси прутка, преобладают рассеянные призматические ориентировки: $(1210)[0001]$, $(0110)[0001]$, $(1340)[0001]$ (объемная доля каждой — 2 %) и ориентировка $(4.10.63)[132.15]$ (объемная доля — 3 %). Объемная доля бестекстурной составляющей — 91 %. После РК (1-й этап) в сплаве происходит изменение текстуры: вместо призматических ориентировок появляются ориентировки наклоненных к оси прутка базисных полюсов $(2425)[2425]$, $(2759)[1435]$, $(0334)[0335]$, $(3473)[211.25]$ (объемные доли — 3, 5, 2,3 %) и более рассеянная базисная компонента $(0001)[2110]$ (объемная доля — 1 %). Доля не бестекстурной компоненты уменьшается до 86 %. Дальнейшая РК (2-й этап) увеличивает объемную долю базисной ориентировки $(0001)[7340]$ до 3 %, а наклоненные базисные полюса $(1211)[1217]$, $(3749)[3748]$, $(1216)[2201]$ ослабевают (их объемные доли — 3, 4, 2 %). При этом объемная доля бестекстурной компоненты возрастает

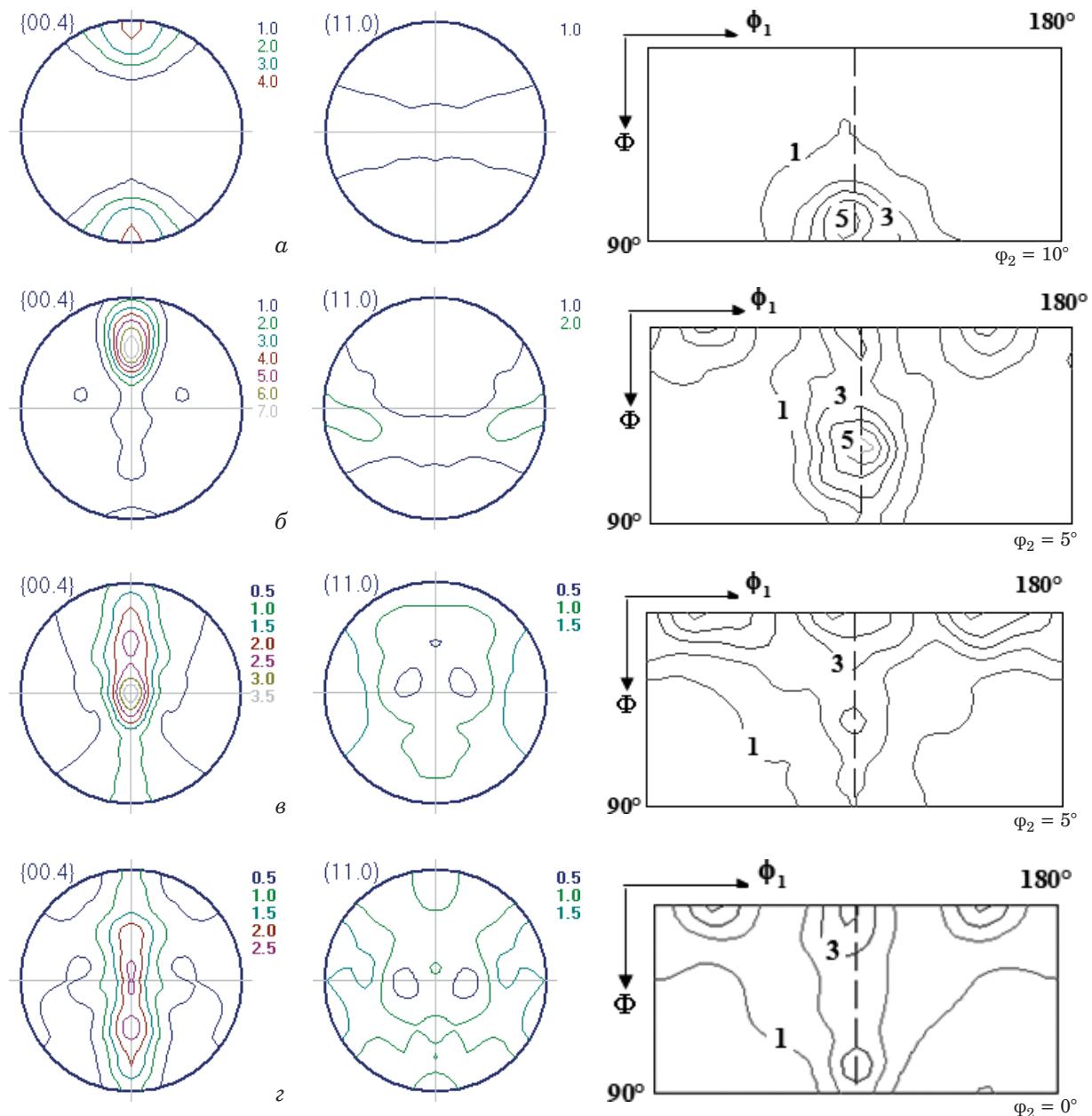


Рис. 2. Прямые полюсные фигуры {00.4}, {11.0} и сечения ФРО для сплава MA2-1пч в исходном горячекатаном состоянии (а) и после РК при 400 °С до $\varepsilon = 0,58$ (б), 375 °С до $\varepsilon = 1,39$ (в), 350 °С до $\varepsilon = 2,77$ (г)

ет до 88 %. На 3-м этапе РК текстура сплава практически не меняется. К ослабленным компонентам текстуры 2-го этапа лишь добавляются рассеянные ориентировки (1215)[4845] и (1217)[1211] (объемные доли — 1 %), а объемная доля бестекстурной компоненты остается прежней (88 %).

Таким образом, в процессе РК с одновременным понижением температуры и повышением суммарной степени деформации в сплаве происходит трансформация призматических компонент в базисные и наклоненные к оси прутка базисные ориентировки. На 2-м и 3-м этапах РК наблюдается заметное рассеяние ориентировок (по сравнению с 1-м этапом).

Механизмы деформации, приводящие к изменению текстуры при РК, изучали, моделируя текстуры в рамках термоактивационной модели. Параметры модели для каждого из режимов подбирали исходя из наилучшего совпадения экспериментальных и модельных прямых полюсных фигур (рис. 3):

1-й режим — общее число участвующих в расчетах зерен — 1299; температура деформации — 400 °С (соответствует параметру $U/kT = 30$, где U — энергия активации преодоления энергетических барьеров движущимися дислокациями, k — постоянная Больцмана, T — абсолютная температура); величина истинной деформации $\varepsilon = 0,58$; скорость деформации $e = 40 \text{ с}^{-1}$ (расчи-

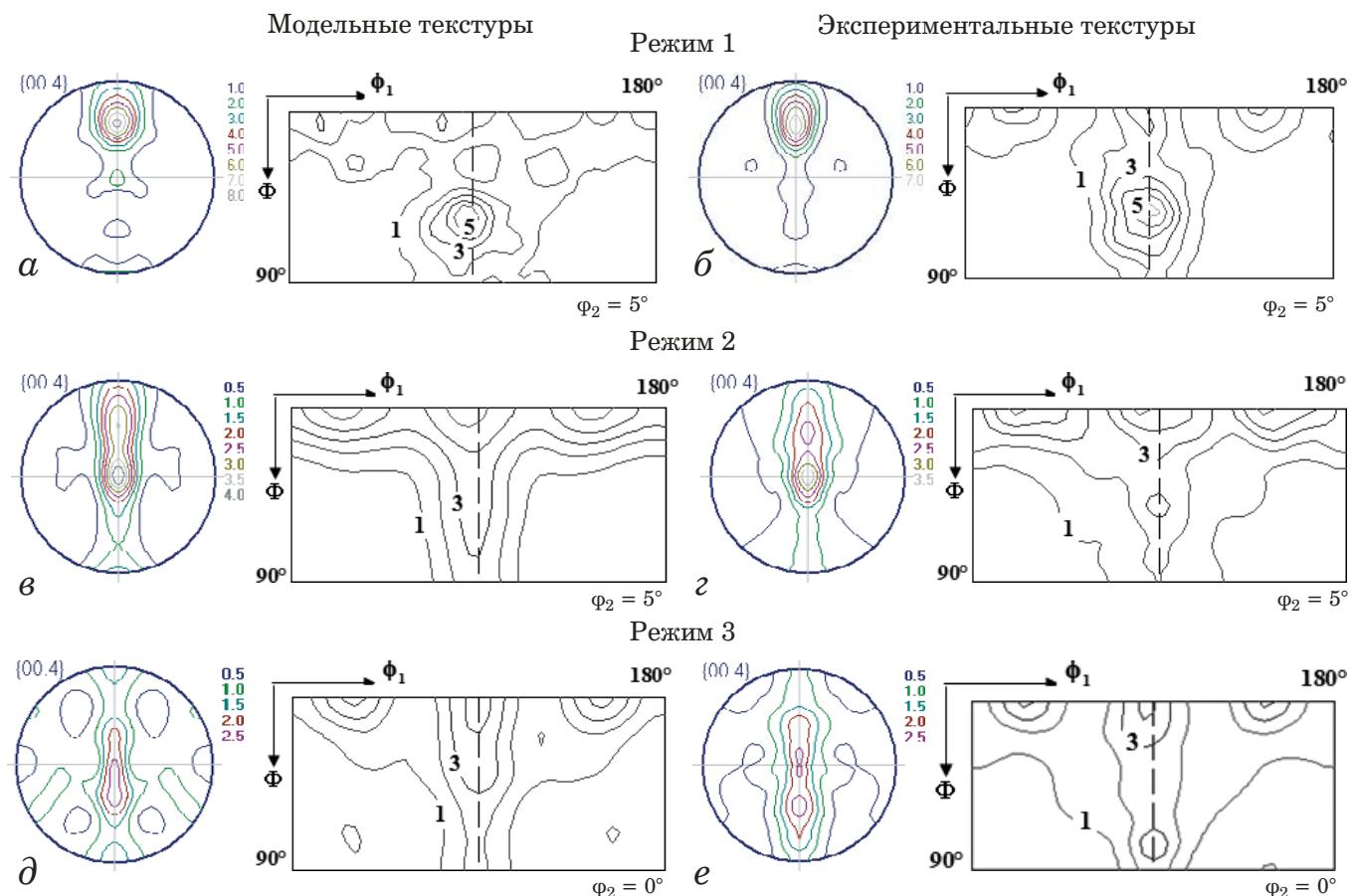


Рис. 3. Модельные и экспериментальные прямые полюсные фигуры {00.4} и сечения ФРО для сплава MA2-1пч после РК при 400 °C до $\varepsilon = 0,58$ (*а, б*); 375 °C до $\varepsilon = 1,39$ (*в, г*); 350 °C до $\varepsilon = 2,77$ (*д, е*)

тывали из параметров ротационно-ковочной машины РКМ В-2129). Деформация осуществлялась за счет действия базисного ($\{0001\} \langle 11\bar{2}0 \rangle$), призматического ($\{10\bar{1}0\} \langle 11\bar{2}0 \rangle$) скольжений и двойникования по системе $\{1012\} \langle 1011 \rangle$ (ее наличие подтверждено методом просвечивающей электронной микроскопии [5]) с соотношением КНС 1:1,3:1 соответственно; доля двойниковых зерен — 20 % (соответствует металлографическим исследованиям [5]). Тензор деформации для 300 из 1299 зерен (23 %) имел диагональный вид (значения диагональных элементов: $e_{11} = 0,5$, $e_{22} = 0,5$, $e_{33} = -1,0$, доля случайных деформаций — 15 %). Для 999 зерен (77 %) его действие осуществлялось с поворотом на 55° вокруг

продольной оси прутка, что, вероятно, обусловлено деформацией зерен в полосах сдвига, ориентированных под тем же углом (это связано с особенностями процесса РК). Полосы сдвига, как преимущественные области деформации, присутствуют при РК в поверхностных и промежуточных слоях по сечению прутков [7];

2-й режим — общее число участвующих в расчетах зерен — 1499; температура деформации — 375 °C (соответствует $U/kT = 40$); величина истинной деформации $\varepsilon = 0,81$; скорость деформации $e = 40 \text{ c}^{-1}$. В 999 зернах из 1499 (66,6 %) деформация осуществлялась за счет действия базисного ($\{0001\} \langle 11\bar{2}0 \rangle$), призматического ($\{10\bar{1}0\} \langle 11\bar{2}0 \rangle$) скольжений и двойникования по системе

Ориентационные факторы для основных систем деформаций для различных режимов РК сплава MA2-1пч

Режим РК	Скольжение		Двойникование		
	базисное $\{0001\} \langle 11\bar{2}0 \rangle$	призматическое $\{10\bar{1}0\} \langle 11\bar{2}0 \rangle$	$\{1012\} \langle 1011 \rangle$	$\{1011\} \langle 1012 \rangle$	$\{11\bar{2}1\} \langle 112\bar{6} \rangle$
Исходное состояние	6,0	4,0	4,7	4,9	5,1
$T = 400 \text{ } ^\circ\text{C}, \varepsilon = 0,58$	4,5	5,0	4,8	4,6	4,4
$T = 375 \text{ } ^\circ\text{C}, \varepsilon = 1,39$	4,8	6,0	3,9	4,0	4,3
$T = 350 \text{ } ^\circ\text{C}, \varepsilon = 2,77$	4,5	5,7	4,2	4,2	4,3

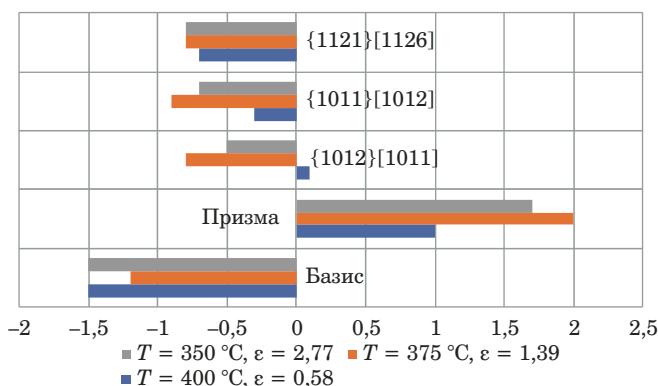


Рис. 4. Значения ΔM для действующих систем деформаций в процессе РК в сплаве MA2-1пч

$\{10\bar{1}\} \langle \bar{1}012 \rangle$ [5] с соотношением КНС 1:1,2:0,9 (доля двойниковых зерен — 40 %). Тензор деформации имел диагональный вид ($e_{11} = 0,5$, $e_{22} = -1,0$, $e_{33} = 0,5$, доля случайных деформаций — 15 %). В остальных 500 зернах (33,4 %) деформация осуществлялась за счет действия базисного ($\{0001\} \langle 1120 \rangle$), призматического ($\{1010\} \langle 11\bar{2}0 \rangle$) скольжений и двойникования по системе $\{1012\} \langle 1011 \rangle$ [5] с соотношением КНС 1:1,2:0,7 (доля двойниковых зерен — 40 %). Тензор деформации имел диагональный вид ($e_{11} = 0,5$, $e_{22} = 0,5$, $e_{33} = -1,0$, доля случайных деформаций — 15 %). Сочетание таких тензоров деформации связано с взаимно перпендикулярными направлениями ударов бойков по боковой поверхности прутков (см. рис. 1). Суммарная деформация прутков сплава после 1-го и 2-го этапов РК составила 1,39;

3-й режим — общее число участвующих в расчетах зерен — 1500; температура деформации — 350°C (соответствует $U/kT = 50$); величина истинной деформации $\varepsilon = 1,38$; скорость деформации $e = 40 \text{ c}^{-1}$. В 1000 зернах из 1500 (66,7 %) деформация осуществлялась за счет действия базисного ($\{0001\} \langle 1120 \rangle$), призматического ($\{1010\} \langle 11\bar{2}0 \rangle$) скольжений и двойникования по системе $\{1011\} \langle 1012 \rangle$ [5] с соотношением КНС 1:1,2:0,9 (доля двойниковых зерен — 60 %). Тензор деформации имел диагональный вид ($e_{11} = 0,5$, $e_{22} = -1,0$, $e_{33} = 0,5$, доля случайных деформаций — 15 %). В остальных 500 зернах (33,3 %) деформация осуществлялась за счет действия базисного ($\{0001\} \langle 1120 \rangle$), призматического ($\{1010\} \langle 11\bar{2}0 \rangle$) скольжений и двойникования по системе $\{1121\} \langle 1126 \rangle$ [6, 13] с соотношением КНС 1:1,2:0,9 (доля двойниковых зерен — 60 %). Тензор деформации имел диагональный вид ($e_{11} = 0,5$, $e_{22} = 0,5$, $e_{33} = -1,0$, доля случайных деформаций — 15 %). Сочетание таких тензоров деформации также обусловлено взаимно перпендикулярными направлениями ударов бойков по боковой поверх-

ности прутков. Суммарная деформация прутков после трех этапов РК составила 2,77.

В таблице приведены значения ориентационных факторов, рассчитанных из (1) – (2), для основных систем деформаций, обеспечивающих формоизменение прутков сплава в процессе РК. Видно, что с понижением температуры деформации и увеличением суммарной истинной деформации ориентационные факторы базисного скольжения и систем двойникования уменьшаются, а ориентационные факторы призматического скольжения возрастают. Разность в ориентационных факторах (ΔM) между режимами РК и начальным состоянием сплава характеризует изменение активности систем деформаций в зависимости от изменения параметров обработки.

На рис. 4 приведены значения ΔM по режимам деформации сплава. Отрицательные величины ΔM указывают на рост активизации соответствующей системы деформации, положительные, напротив, — на ее понижение. Абсолютные значения ΔM показывают степень этих эффектов.

РК активирует в сплаве базисное скольжение и все исследуемые системы двойникования. Вместе с тем действие призматического скольжения затруднено. С ростом суммарной истинной деформации и понижением температуры активность базисного скольжения практически не меняется, активность же действующих систем двойникования возрастает, что согласуется с микроструктурными данными [5]. Результаты моделирования текстурообразования при РК также подтверждают рост активности систем двойникования при переходе от 1-го ко 2-му и 3-му режимам деформирования.

Таким образом, проведенные исследования показали, что РК магниевого сплава MA2-1пч в диапазоне температур $350 - 400^{\circ}\text{C}$ и суммарных истинных деформаций $0,58 - 2,77$ превращает начальную острую призматическую текстуру в рассеянную, состоящую из базисных и наклоненных к оси деформирования базисных ориентировок, степень рассеяния которых возрастает с ростом суммарной деформации и понижением температуры деформирования. Результаты моделирования текстур в рамках термоактивационной модели и анализ ориентационных факторов действующих систем деформации свидетельствуют, что такое изменение текстуры вызвано активизацией базисного скольжения и ряда систем двойникования и затрудненностью действия призматического скольжения. Исследования текстуры и выявленные механизмы деформации сплава дают дополнительную информацию для объяснения наблюданного эффекта повышения его механических свойств в процессе РК.

ЛИТЕРАТУРА

1. Радюченко Ю. С. Ротационная ковка. Обработка деталей на ротационно- и радиально-обжимных машинах. — М.: МАШГИЗ, 1962. — 186 с.
2. Grosman F., Piela A. Metal flow in the deformation gap at primary swaging / Journal of Materials Processing Technology. 1996. Vol. 56. P. 404 – 411.
3. Русин Н. М. Изменение структуры магниевого сплава AM60 + 0,3 % TiC при ротационной ковке / Известия вузов. Цветная металлургия. 2008. № 3. С. 46 – 51.
4. Gan W., Huang Y., Wang R., Wang G., Srinivasan A., et al. Microstructures and mechanical properties of pure Mg processed by rotary swaging / Materials and Design. 2014. Vol. 63. P. 83 – 88.
5. Мартыненко Н. С., Лукьянова Е. А., Серебряный В. Н., Горшенков М. В., Морозов М. М. и др. Влияние ротационной ковки на структуру, текстуру и механические свойства промышленного магниевого сплава MA2-1пч / Технология легких сплавов. 2016. № 4. С. 68 – 76.
6. Knauer E., Freudenberger J., Marr T., Kauffmann A., Schultz L. Grain Refinement and Deformation Mechanisms in Room Temperature Severe Plastic Deformed Mg-AZ31 / Metals. 2013. Vol. 3. P. 283 – 297.
7. Gan W., Huang Y., Wang R., Zhong Z., Hort N., et al. Bulk and local textures of pure magnesium processed by rotary swaging / Journal of Magnesium and Alloys. 2013. Vol. 1. P. 341 – 345.
8. Куртасов С. Ф. Методика количественного анализа текстур прокатки материалов с кубической симметрией кристаллической решетки / Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2007. Т. 73. № 7. С. 41 – 44.
9. Серебряный В. Н., Добаткин С. В., Копылов В. И. Влияние текстуры и микроструктуры на механические свойства сплава MA2-1 после равноканального углового прессования / Технология легких сплавов. 2009. № 3. С. 28 – 35.
10. Вальтер К., Куртасов С., Никитин А., Торина Е. Моделирование текстур деформации в высокотемпературном квартце / Физика земли. 1993. № 6. С. 45 – 48.
11. Куртасов С. Ф. Методика моделирования текстур деформации / Заводская лаборатория. 1993. Т. 59. № 11. С. 31 – 34.
12. Мельников К. Е., Серебряный В. Н. Методика моделирования текстур деформаций материалов с различными типами структур / Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2007. Т. 73. № 6. С. 39 – 42.
13. Stanford N. Observation of {112̄1} twinning in a Mg-based alloy / Philos. Mag. Lett. 2008. Vol. 88. P. 379 – 386.

REFERENCES

1. Radyuchenko Yu. S. Rotary swaging. Processing of parts on rotational and radial-crimping machines. — Moscow: MASHGIZ, 1962. — 186 p. [in Russian].
2. Grosman F., Piela A. Metal flow in the deformation gap at primary swaging / Journal of Materials Processing Technology. 1996. Vol. 56. P. 404 – 411.
3. Rusin N. M. Change in the structure of the magnesium alloy AM60 + 0.3% TiC with rotary swaging / Izvestiya vuzov. Tsvetnaya metallurgiya. 2008. N 3. P. 46 – 51 [in Russian].
4. Gan W., Huang Y., Wang R., Wang G., Srinivasan A., et al. Microstructures and mechanical properties of pure Mg processed by rotary swaging / Materials and Design. 2014. Vol. 63. P. 83 – 88.
5. Martynenko N. S., Lukyanova E. A., Serebryany V. N., Gorshenkov M. V., Morozov M. M., et al. The rotary swaging effect on structure, texture and mechanical properties of the manufactured magnesium alloy MA2-1hp / Tekhnol. Legk. Splavov. 2016. N 4. P. 68 – 76 [in Russian].
6. Knauer E., Freudenberger J., Marr T., Kauffmann A., Schultz L. Grain Refinement and Deformation Mechanisms in Room Temperature Severe Plastic Deformed Mg-AZ31 / Metals. 2013. Vol. 3. P. 283 – 297.
7. Gan W., Huang Y., Wang R., Zhong Z., Hort N., et al. Bulk and local textures of pure magnesium processed by rotary swaging / Journal of Magnesium and Alloys. 2013. Vol. 1. P. 341 – 345.
8. Kurtasov S. F. Quantitative rolling texture analysis of the materials having cubic symmetry of crystal lattice / Zavodskaya laboratoriya. Diagnostika materialov. 2007. Vol. 73. N 7. P. 41 – 44 [in Russian].
9. Serebryany V. N., Dobatkin S. V., Kopylov V. I. Texture and microstructure effect on mechanical properties of the MA2-1 alloy after equal channel angular pressing / Tekhnol. Legk. Splavov. 2009. N 3. P. 28 – 35 [in Russian].
10. Val'ter K., Kurtasov S., Nikitin A., Torina E. Deformation texture simulation in a high-temperature quartz / Fizika zemli. 1993. N 6. P. 45 – 48 [in Russian].
11. Kurtasov S. F. Deformation texture simulation technique / Zavodskaya laboratoriya. 1993. Vol. 59. N 11. P. 31 – 34 [in Russian].
12. Mel'nikov K. E., Serebryany V. N. Method of modeling of the deformation textures of materials with different types of structures / Zavod. Labor. Diagn. Mater. 2007. Vol. 73. N 6. P. 39 – 42 [in Russian].
13. Stanford N. Observation of {112̄1} twinning in a Mg-based alloy / Philos. Mag. Lett. 2008. Vol. 88. P. 379 – 386.