

МОДЕЛИРОВАНИЕ РЕОЛОГИИ СПЛАВА АМГ6 С УЧЕТОМ ОБЪЕМНОЙ ДОЛИ ДИНАМИЧЕСКОЙ РЕКРИСТАЛЛИЗАЦИИ

А.С. Смирнов, А.В. Коновалов, В.П. Мазунин

Институт машиноведения УрО РАН, Екатеринбург

Аннотация

Приведены экспериментальные данные объемной доли динамической рекристаллизации в микроструктуре сплава АМГ6 после пластической деформации образцов при температуре 300°C в диапазоне скоростей деформаций 10÷25 с⁻¹. Изложена методика идентификации реологической модели сплава с учетом объемной доли динамической рекристаллизации.

AMG6 RHEOLOGY MODELING WITH THE ACCOUNT OF VOLUME DYNAMIC RECRYSTALLIZATION

A.S. Smirnov, A.V. Kononov, V.P. Mazunin

Engineering Science Institute Urals Department RAS, Russia, Ekaterinburg

Experimental data of a volume fraction dynamic recrystallization in a microstructure of AMG6 alloy after plastic deformation of samples are resulted at temperature 300°C in a range of strain rates 10÷25 s⁻¹. The technique of identification of the rheological model of alloy taking into account a volume fraction dynamic recrystallization is stated.

1. ВВЕДЕНИЕ

Металлы и сплавы в процессе пластической деформации при температурах 0.6–0.8 от температуры плавления обладают сложной реологией, обусловленной одновременным проявлением процессов упрочнения за счет образования и роста количества дислокаций и разупрочнения вследствие возврата и рекристаллизации [1]. В работе [2] построена иерархическая математическая модель сопротивления деформации с внутренними переменными, кинетические уравнения для которых описывают данные процессы. Модель содержит десять числовых параметров. Их значения определяются по экспериментальным данным изменения сопротивления деформации в зависимости от истории изменения скорости деформации. В модель входят две макроскопические величины: сопротивление деформации и объемная доля динамически рекристаллизованных зерен в сплаве. Практика идентификации модели показала, что для определения значений ее числовых параметров необходимо использовать экспериментальную информацию об обеих этих величинах.

Целью данной работы является разработка методики идентификации реологической модели сопротивления деформации на основе экспериментальную информацию как о сопротивлении деформации, так и об объемной доли динамически рекристаллизованных зерен.

2. РАСЧЕТ КОЭФФИЦИЕНТОВ СКОРОСТЕЙ ЭЛЕМЕНТАРНЫХ СТАДИЙ

Модель сопротивления деформации σ_s имеет вид [2]

$$\sigma_s = \sqrt{3}k + \left(\sqrt{3}/2\right)q, \quad (1)$$

$$\dot{k} = \dot{\rho}V_n - \rho\dot{V}_r,$$

$$\dot{\rho} = a_1 \exp(-a_2\rho)\dot{\varepsilon} - a_3\rho, \quad (2)$$

$$\dot{V}_r = \begin{cases} a_5\varepsilon_r R^2 (dR/dt), & \text{если } V_r \leq a_6, \\ \dot{V}_r^* \left(\frac{1-V_r}{1-a_6}\right)^{a_7} & \text{если } V_r > a_6, \\ \dot{V}_r^* = \dot{V}_r, & \text{при } V_r = a_6 \end{cases} \quad (3)$$

$$\varepsilon_r = \int_0^{t_r} \dot{\varepsilon} dt, \quad (4)$$

$$dR/dt = \dot{\varepsilon}\rho, \quad (5)$$

$$q = a_8 \ln(1 + a_9\dot{\varepsilon}). \quad (6)$$

Здесь k – напряжение текучести в законе пластического течения Мизеса, $k = a_0$ в начальный момент пластической деформации; q – функция, описывающая вязкие свойства сплава; $\dot{\varepsilon}$ – скорость деформации; ρ – величина, пропорциональная приращению плотности дислокаций в результате пластической деформации; ε_r – степень деформации до начала динамической рекристаллизации; V_n , V_r – нерекристаллизованная и динамически рекристаллизованная доли объема металла соответственно, $V_n + V_r = 1$; R – радиус рекристаллизованного зерна, $R(t_r) = 0$, t_r – момент времени начала динамической рекристаллизации, определяемый условием $\rho = a_4$; a_i ($i=0, \dots, 9$) – параметры модели, подлежащие идентификации по экспериментальным данным. Точкой сверху обозначена производная по времени t .

В модели (1)–(6) предполагается, что упрочнение происходит в результате увеличения плотности дислокаций, а разупрочнение – за счет процессов динамического и статического возврата, динамической рекри-

сталлизации. Под динамическим возвратом понимается аннигиляция дислокаций при деформации, а статический возврат обусловлен диффузионными процессами. Кинетическое уравнение (2) описывает упрочнение за счет увеличения плотности дислокаций и разупрочнение за счет процессов возврата, уравнения (3)–(5) моделируют прохождение динамической рекристаллизации, а равенство (6) учитывает вязкое проявление свойств сплава.

В модели предполагается, что 1) зародыш рекристаллизованного зерна образуется при достижении критической плотности дислокаций, характеризующейся параметром a_4 ; 2) после этого число зародышей рекристаллизации не изменяется; 3) радиус зародыша бесконечно мал; 4) динамически рекристаллизованное зерно имеет форму шара; 5) скорость роста зерна может замедляться в результате роста соседних зерен, что определяется достижением V_r значения a_6 .

3. МЕТОДИКА ИДЕНТИФИКАЦИИ ПАРАМЕТРОВ МОДЕЛИ

В модель (1)–(6) входят 10 неизвестных параметров a_i , значения которых подлежат определению по результатам экспериментов. В ранних работах [2–4] значения этих параметров находили минимизируя следующую меру отклонения опытных и расчетных значений сопротивления деформации

$$J(a_0, \dots, a_9) = \sum_{j=1}^N \int_0^{T_j} [\sigma_s^j(t) - z^j(t)]^2 dt \rightarrow \min. \quad (7)$$

Здесь j – номер эксперимента; N – количество экспериментов; T_j – время деформации образца, σ_s^j , z^j – рассчитанная по модели (1)–(6) и полученная в опыте функция сопротивления деформации, соответственно.

Полученные в результате решения задачи (7) значения параметров a_i обеспечивали близость кривых σ_s^j и z^j , однако имело место значительное отклонение расчетных данных объемной доли динамически рекристаллизованных зерен от экспериментальных.

Для устранения этой проблемы в данной работе принимается новая целевая функция для идентификации модели сопротивления деформации:

$$\Phi(a_0, \dots, a_9) = \sum_{j=1}^N \int_0^{T_j} [\sigma_s^j(t) - z^j(t)] dt + \sum_{n=1}^M [V_r^n(T_m^n) - V_g^n(T_m^n)]^2 \rightarrow \min. \quad (8)$$

Здесь второе слагаемое является мерой отклонения расчетных значений объемной доли динамически рекристаллизованных зерен V_r^n от экспериментальных значений V_g^n ; T_m^n – момент времени окончания деформации; M – количество экспериментальных данных.

4. МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОБЪЕМНОЙ ДОЛИ ДИНАМИЧЕСКИ РЕКРИСТАЛЛИЗОВАННЫХ ЗЕРЕН

Экспериментальное определение объемной доли динамически рекристаллизованных зерен в сплаве является сложной задачей. По мнению авторов для ее решения наиболее подходящим является метод дифракция обратно рассеянных электронов (ДОРЭ) [5, 6]. Данный метод позволяет с задаваемым шагом сканирования определять кристаллографическое направление в каждой точке образца. В результате можно восстановить зеренную и субзеренную структуру, а также получить информацию о местах скопления дислокаций. В настоящей работе изображения микроструктуры образцов были получены методом ДОРЭ на растровом электронном микроскопе MIRA 3 TESCAN с приставкой для анализа ДОРЭ OXFORD HKL NordlysF+.

В соответствии с работой [7] считали, что зерна имели разориентацию свыше 15° , а разориентация субзерен находилась в пределах от 2 до 15° . Для определения объемной доли динамической рекристаллизации использовали следующий алгоритм.

1. Внутри каждого зерна определяется средний угол разориентации решетки Θ_c .
2. Перебором (индивидуально для каждого сплава) определяется критический угол разориентации Θ_{max} , при котором, если $\Theta_c > \Theta_{max}$, то зерно деформированное, а при $\Theta_c \leq \Theta_{max}$ рекристаллизованное (рис. 1).

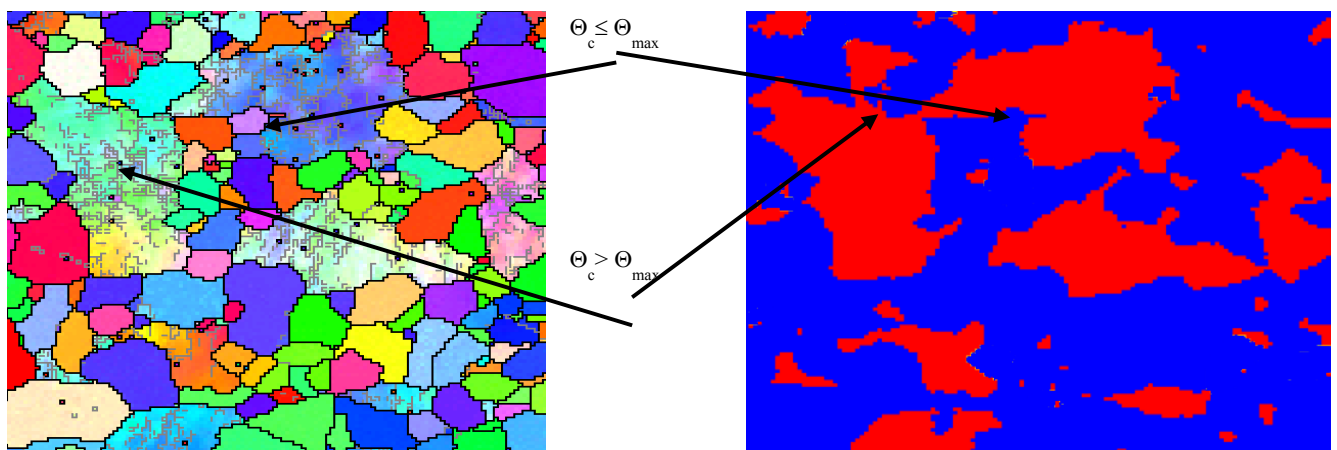


Рис. 1. Пример определения рекристаллизованных (синий) и деформированных (красный) зерен

3. Объемная доля динамически рекристаллизованных зерен V_3 определяется, как отношение площади рекристаллизованных зерен к общей площади зерен.

Методом ДОРЭ получили изображения микроструктуры образца до и после деформации в трех зонах образца, которые приведены на рис. 2. Следует отметить, что зона III соответствует переходу свободной поверхности образца в область контакта с бойком.

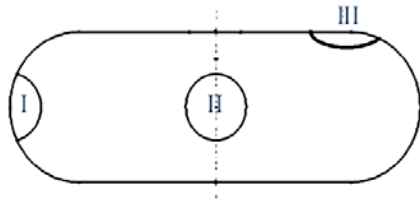


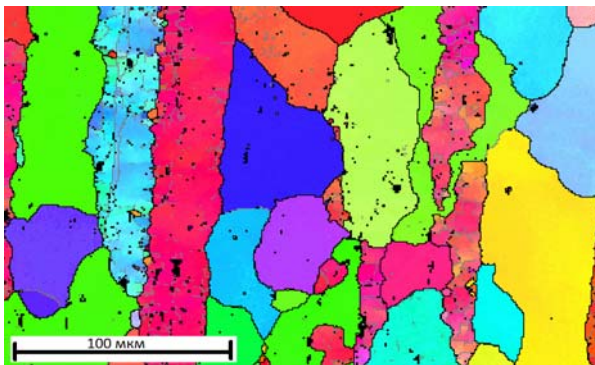
Рис. 2. Три зоны исследования микроструктуры образца после деформации

На рис. 3. приведены полученные изображения микроструктуры до и после деформации. Здесь высокоугловые границы помечены черным цветом, а низкоугловые границы – серым. Черные пятна на изображениях микроструктуры означают неопределенность в кристаллографическом направлении. В данном случае эти пятна соответствуют интерметаллидам в материале. Цвета в зернах привязаны к цветовой шкале обратной полюсной фигуры для плоскости перпендикулярной нормали плоскости шлифа, которая приведена на рис. 3д. В табл. 1. представлены данные объемной доли динамически рекристаллизованных зерен V_3 в зависимости от накопленной степени деформации ϵ в трех зонах образца.

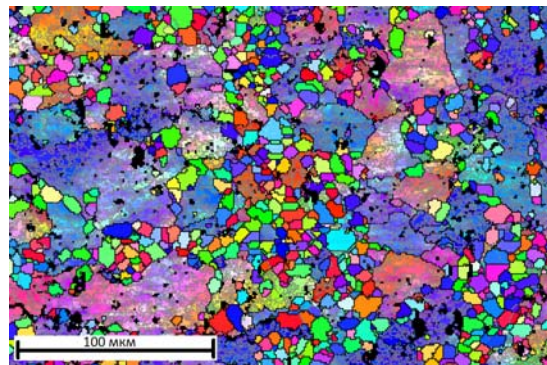
Таблица 1

Объемная доля динамически рекристаллизованных зерен

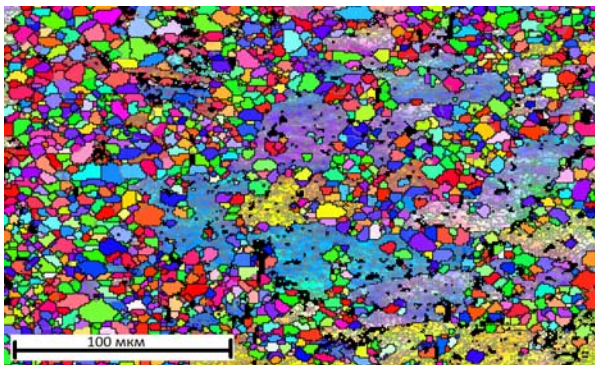
№ зоны	ϵ	V_3
I	0.73	0.39
II	1.90	0.56
III	3.28	0.76



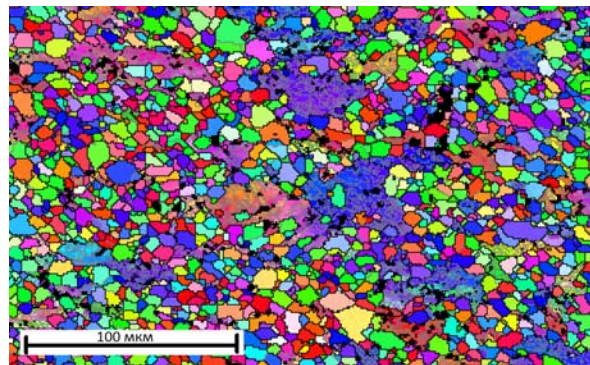
(а)



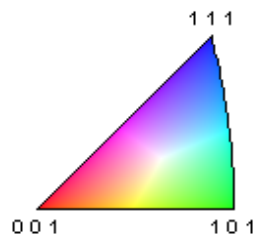
(б)



(в)



(г)



(д)

Рис.3. Изображение микроструктуры образца перед деформацией (а) и после деформации в зоне I (б), II(в) и III (г), а также обратная полюсная фигура (д)

5. ИДЕНТИФИКАЦИЯ МОДЕЛИ СОПРОТИВЛЕНИЯ ДЕФОРМАЦИИ

Из прутка сплава АМгб (Al – 92.4; Mg – 6.56; Fe – 0.27; Si – 0.16; Cu – 0.013; Mn – 0.05; Ti – 0.04; Zn – 0.02; Be – 0.0012%) диаметром 10 мм были выточены цилиндрические образцы диаметром 8 ± 0.1 мм и высотой 12 ± 0.1 мм, которые сжимали на кулачковом прессе при температуре 300°C. Опыты проводили с применением графита в качестве смазки. По методике, изложенной в работах [3, 4], определили значение коэффициента трения Кулона между образцом и бойком, равное 0.1. Полагая, что в опытах имеет место одноосное напряженное состояние образца, на основании данных об изменении скорости высоты образца (рис. 4), силе и времени его деформирования, построили экспериментальные кривые скорости деформации $\dot{\epsilon}(t)$ (рис. 5,а) и в первом приближении сопротивления деформации $\sigma_s(t)$ (рис. 5,б черные кривые) для двух различных законов деформирования.

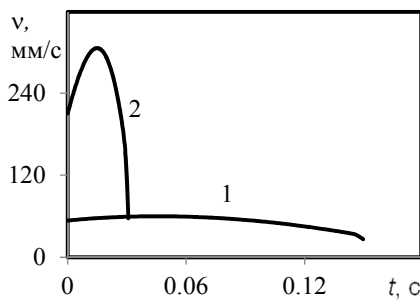


Рис. 4. Зависимости скорости изменения высоты образца v от времени деформации t , используемые при идентификации коэффициентов модели сопротивления деформации

По этим кривым выполнили идентификацию модели сопротивления деформации, решая задачу (7). Используя полученные коэффициенты модели a_i и кривую изменения скорости деформирующей плиты $v^j(t)$ в j -м эксперименте, решали методом конечных элементов задачу по сжатию цилиндрического образца плоскими плитами с известным коэффициентом трения Кулона. По результатам решения итерационно корректировали для каждого момента времени экспериментальную кривую сопротивления деформации по формуле

$$z_{k+1} = z_k \frac{P}{P_k}$$

где k – номер итерации, $k = 1, 2, \dots$; z_k – экспериментальное значение сопротивления деформации на k -й итерации, входящее в функцию (7) и (8); P_k – значение силы сжатия образца, полученное по результатам конечно-элементного моделирования на k -й итерации; P – экспериментальное значение силы деформирования образца.

Для изменённых значений экспериментальной функции сопротивления деформации снова решали задачу (7) и конечно-элементную задачу сжатия цилиндрического образца. Для расширения диапазона применимости модели по скорости деформации ис-

пользовали одновременно данные двух экспериментов на сжатие образца с разными законами изменения скорости деформации, представленными на рис. 5,а. Итерации повторяли до тех пор, пока среднее относительное отклонение δ_p экспериментальных значений силы сжатия образца от значений, полученных по результатам конечно-элементного моделирования, в сумме для двух разных экспериментов деформирования не станет меньше заданного малого значения, которое установили, равным 2%. Величину δ_p , рассчитывали по формуле

$$\delta_p = \frac{1}{N} \sum_{j=0}^N \frac{\int_0^{T_j} |P_s^j(t) - P_p^j(t)| dt}{\int_0^{T_j} P_s^j(t) dt} \cdot 100\%.$$

Здесь T_i – время деформации образца для i -го эксперимента; P_s^i – экспериментальное значение силы сжатия образца для i -го эксперимента; P_p^i – значение силы сжатия образца, полученные по результатам конечно-элементного моделирования для i -го эксперимента.

По этим коэффициентам с использованием экспериментальных данных, приведенных на рис. 5,а, построена кривая сопротивления деформации (красная линия) на рис. 5,б. Из данного рисунка видно как трение повлияло на восстановление кривой сопротивления деформации только с использованием экспериментальной информации о силе и высоте образца.

В табл. 2 приведены коэффициенты, полученные по описанной выше методике.

Таблица 2

Коэффициенты модели сопротивления деформации, полученные по функции (7)

a_0	a_1	a_2	a_3	a_4	a_5	a_6
68	1959	0.054	0.023	3.88	0.029	0.094
a_7	a_8	a_9	Идентификация		Верификация	
			δ_p	δ_v	δ_p	δ_v
0.18	10.4	302.4	1.7	71	1.3	45

С целью верификации, полученных коэффициентов модели сопротивления деформации промоделировали сжатие образца, деформируемого по закону, приведенному на рис. 6,а. На рис. 6,б черной линией показана экспериментальная сила сжатия образца, а красной – расчетная. Среднее относительное отклонение δ_p составило 1.3%, что даже меньше, чем при идентификации (см. табл. 2).

Экспериментальное значение объемной доли динамической рекристаллизации (см. табл. 1) было получено для образца, деформируемого по закону, который приведен на рис. 6,а. Для этого образца по результатам конечно-элементного моделирования были получены законы деформации зон I – III (см. рис.2), изображенные на рис. 7.

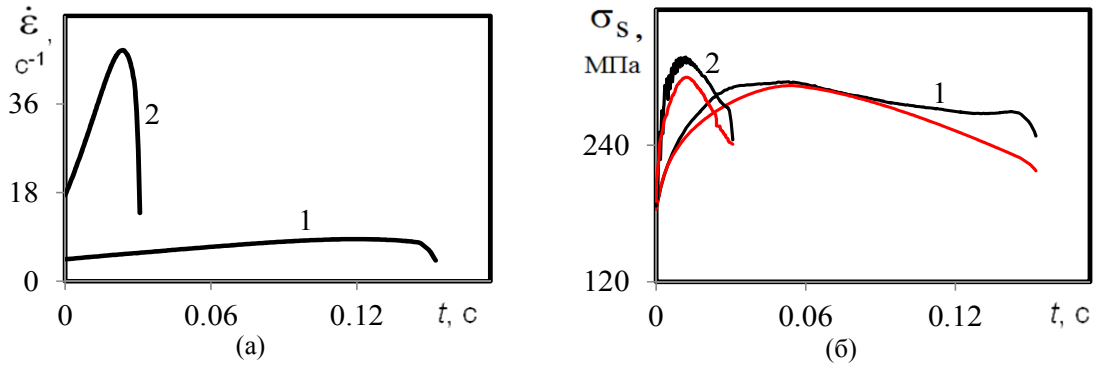


Рис. 5. Зависимости скорости деформации $\dot{\epsilon}$ (а) и сопротивления деформации σ_s (б) от времени t

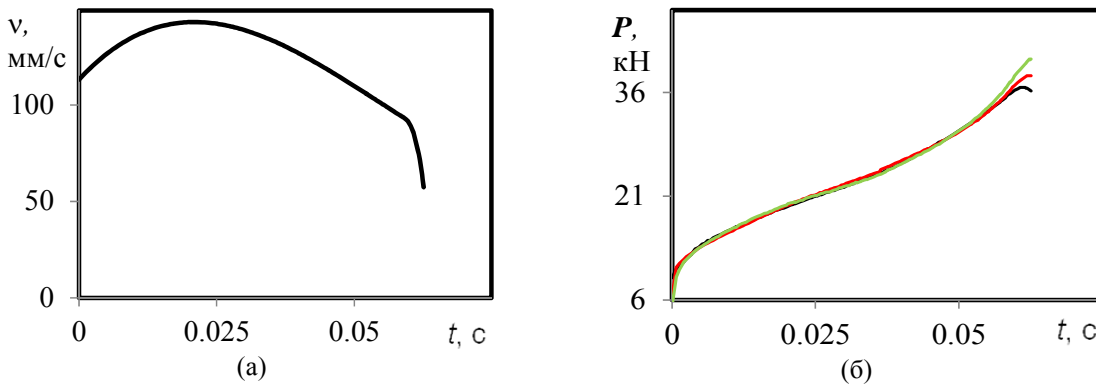


Рис. 6. Зависимость скорости изменения высоты образца v (а) и силы деформации образца P (б) от времени, используемые при верификации коэффициентов модели сопротивления деформации. Черные кривые – экспериментальные данные, цветные – результаты моделирования

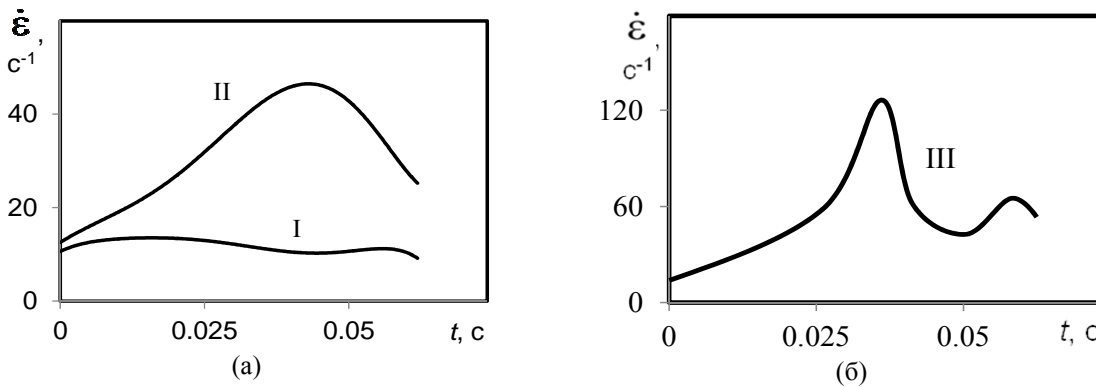


Рис. 7. Зависимость скорости деформации $\dot{\epsilon}$ от времени t для трех зон образца

Идентификацию модели сопротивления деформации с учетом объемной доли динамической рекристаллизации проводили по функции цели (8). Для этого одновременно на вход модели подавали законы 1 и 2 (см. рис. 5,а), а также законы деформации зон I и II.

Экспериментальное значение сопротивления деформации z в функции (8) принималась равным значению сопротивления деформации, полученного после применения методики учета трения, описанной выше. Значение V_3 получено экспериментально и представлено в табл. 1. Коэффициенты идентификации приведены в табл. 3, а на рис. 5б зеленым цветом приведены результаты конечно-элементного моделирования сжатия образцов. Среднее относительное отклонение δ_p со-

ставляло 2.6%, что не намного хуже, чем при идентификации по функции (7).

Таблица 3

Коэффициенты модели сопротивления деформации, полученные по функции (8)

a_0	a_1	a_2	a_3	a_4	a_5	a_6
68	12763	0.046	4.765	5.08	0.018	0.074
a_7	a_8	a_9	Идентификация		Верификация	
			δ_p	δ_v	δ_p	δ_v
1.64	0.18	346.8	2.6	6.5	1.5	11.3

Однако среднее относительное отклонение объемной доли динамической рекристаллизации δ_v стало значительно меньше, чем при идентификации по функции (7), и составило 6.5% (см. табл. 2 и 3). Значение δ_v рассчитывали по формуле

$$\delta_v = \frac{1}{M} \sum_{n=1}^M \frac{|V_r^n - V_3^n|}{V_3^n} \cdot 100\%.$$

Верификацию, полученных коэффициентов модели сопротивления деформации (см. табл. 3), выполнили по закону сжатия образца, приведенному на рис. 6,а. На рис. 6,б зеленой кривой показаны результаты моделирования. Среднее относительное отклонение δ_p составило 1.5%. Для проверки адекватности коэффициентов, описывающих прохождение динамической рекристаллизации, в зоне III образца была рассчитана объемная доля V_r по закону деформации, приведенному на рис. 7,б. Среднее относительное отклонение δ_v для зоны III составило 11.3%, что можно считать приемлемым результатом при выполнении инженерных расчетов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Предложена методика идентификации реологической модели сопротивления деформации основанная на экспериментальных данных по сопротивлению деформации и объемной доле динамической рекристаллизации.

2. Методика апробирована на примере сплава АМг6 при температуре деформации 300°C.

Работа выполнена при поддержке проекта Офи УрО РАН №12-1-002-РЦ и Программы фундаментальных исследований Президиума РАН № 25 (проект 12-П-1-1027)

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Полухин П.И., Горелик С.С., Воронцов В.К. Физические основы пластической деформации. Учебное пособие для вузов. М.: Металлургия, 1982. 584 с.
2. Коновалов А.В. Вязкопластическая модель сопротивления металла высокотемпературной деформации // *Металлы*. 2005. № 5. С. 94–98.
3. Коновалов А.В., Смирнов А.С. Идентификация модели сопротивления деформации металлов по результатам испытаний на сжатие образцов // *Заводская лаборатория. Диагностика материалов*. 2010. Том 76, № 1. С. 53–56.
4. Коновалов А.В. Смирнов А.С. Экспериментальная база и методика идентификации определяющих соотношений упруговязкопластической среды // *Физико-химическая кинетика в газовой динамике*. 2010. Т.9. - URL: <http://www.chemphys.edu.ru/article/186/> (дата обращения: 21.12.2011).
5. Robert A. Schwarzer. Automated Crystal Lattice Orientation Mapping Using a Computer-controlled SEM// *Micron*. 1997, vol. 28, № 3, Pp. 249–265.
6. F. Springer. Recent Developments in Automated Crystal Orientation Mapping (ACOM) – Quantitative Evaluation and Graphical Representation of Individual Grain Orientation Data. *Material Science Forum*. 1998. Pp. 191–200.
7. Горелик С.С., Добаткин С.В., Капуткина Л.М. Рекристаллизация металлов и сплавов. 3-е изд. М.: МИСИС, 2005. 432 с.