

**МОДЕЛИРОВАНИЕ РЕОЛОГИЧЕСКОГО ПОВЕДЕНИЯ
МЕТАЛЛОМАТРИЧНЫХ КОМПОЗИТОВ СИСТЕМЫ AL-SiC
В УСЛОВИЯХ ВЫСОКИХ ТЕМПЕРАТУР ДЕФОРМАЦИЙ**

А.С. Смирнов, А.В. Коновалов

*Институт машиноведения УрО РАН, Россия,
smirnov@imach.uran.ru*

Композиционные материалы с матрицей из металлических материалов в процессе пластического деформирования при высоких температурах обладают сложным реологическим поведением, проявляющимся во влиянии истории нагружения на кривую сопротивления деформации. Это вызвано тем, что при повышенных температурах деформации в матрице композита происходят конкурирующие процессы упрочнения и разупрочнения. В связи с этим, для корректного описания реологического поведения металломатричных композитов (ММК) в условиях высоких температур необходимо, чтобы математические модели, описывающие реологическое поведение ММК, учитывали влияние изменения условий нагружения в процессе деформации. Ранее авторами была предложена математическая модель сопротивления деформации, описывающая реологическое поведение высоколегированных алюминиевых сплавов, в которых происходит дисперсное упрочнение [1]. Данная модель представляет собой структурно-иерархическую модель с внутренними переменными, описывающими процессы возврата, динамической рекристаллизации, а также упрочнения посредством увеличения плотности дислокаций и блокирования движения свободных дислокаций частицами или дисперсоидами (интерметаллидами, силицидами и т.п.). Модель была апробирована на сплавах АМг6, 1570С и ММК Al/15% SiC, синтезированного по жидкофазной технологии. Целью работы является верификация ранее разработанной модели сопротивления деформации для описания реологического поведения ММК АМг6/10% SiC и В95/10% SiC, изготовленных по твердофазной технологии.

Идентификация модели проводилась на ММК, которые были изготовлены с использованием методов порошковых технологий путем перемешивания упрочняющих частиц карбида кремния и алюминиевых сплавов в вибросмесителе с последующим компактированием и спеканием под давлением при высоких температурах. Из полученных таким способом ММК АМг6/10% SiC и В95/10% SiC были вырезаны цилиндрические образцы для испытания на сжатие при температуре 400 °С. Испытания проводились в диапазоне скоростей деформаций 0,1-5 с⁻¹ на пластометрической установке конструкции ИМАШ УрО РАН. На рис. 1 приведены изображения микроструктур ММК В95/10% SiC и АМг6/10% SiC в исходном недеформированном состоянии после спекания.

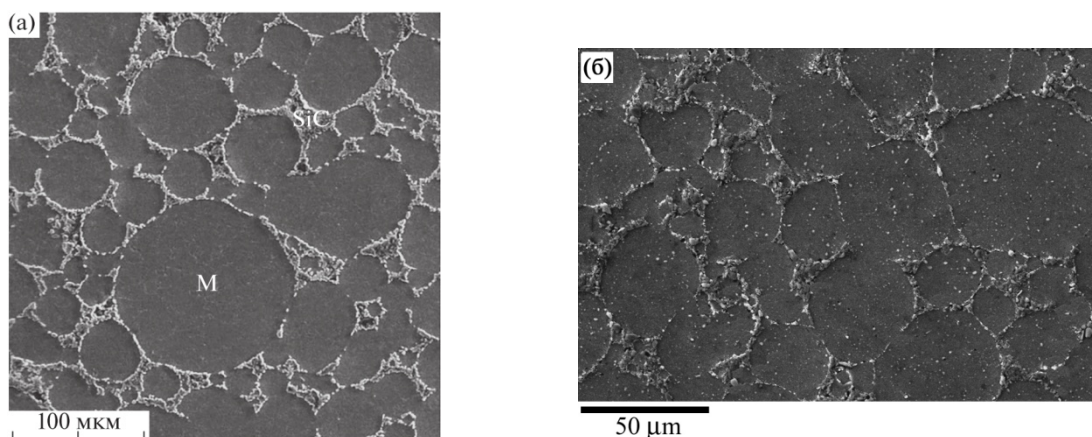


Рисунок 1 - Изображение микроструктур металломатричных композитов В95/10% SiC (а) [2] и АМг6/10% SiC (б) в исходном недеформированном состоянии после спекания

Модель сопротивления деформации имеет следующий вид:

$$\sigma_s = \sqrt{3}k + \frac{\sqrt{3}}{2}q, \quad q = a_8 \ln(1 + a_9 \dot{\varepsilon}),$$

$$k = a_0 + \rho V_n (a_{10} + a_{11} V_p)^{a_{12}}, \quad \dot{\rho} = a_1 \exp(-a_2 \rho) \dot{\varepsilon} - a_3 \rho,$$

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

$$V_n = 1 - V_r - V_p, \quad \dot{V}_p = a_{13} \dot{\varepsilon} - a_{14} \frac{V_n}{1 + \rho}, \quad \varepsilon_r = \int_0^{t_r} \dot{\varepsilon} dt, \quad \frac{dR}{dt} = \dot{\varepsilon} \rho \quad \text{при } \rho > a_4.$$

Здесь σ_s – напряжение сжатия (растяжения) при одноосном напряженном состоянии (сопротивление деформации); $a_0 = k(t_0)$, t_0 – момент времени начала пластической деформации; q – функция, описывающая вязкие свойства материала; ρ – величина, пропорциональная приращению плотности дислокаций за счет пластической деформации; ε_r – степень деформации, накопленная до начала динамической рекристаллизации; V_n , V_r – нерекристаллизованная и рекристаллизованная доли объема металла, соответственно; V_p – приращение объема, характеризующего скопления дислокаций, заблокированных включениями и примесными атомами; R – радиус рекристаллизованного зерна, $R(t_r) = 0$, t_r – момент времени начала динамической рекристаллизации, определяемый условием $\rho = a_4$; a_i ($i = 0, \dots, 14$) – параметры модели, подлежащие идентификации по опытным данным. Объем V_n , V_r и V_p должны удовлетворять следующему равенству: $V_n + V_r + V_p = 1$. В начальный момент времени до деформации $V_n = 1$, $V_r = 0$, $V_p = 0$.

Параметры модели нашли, минимизируя одновременно по трем экспериментальным кривым сопротивления деформации среднеквадратичное отклонение расчетных значений сопротивления деформации $\sigma_s(t)$ от экспериментальных $z(t)$

$$J(a_0, \dots, a_{14}) = \sum_{j=1}^3 \int_0^T [\sigma_s(t) - z(t)]^2 dt,$$

где T – время деформации образца.

На рис. 2 приведен общий вид законов нагружения образцов. Результаты идентификации модели сопротивления деформации показаны на рис. 3 сплошными линиями, а точками изображены экспериментальные данные. Коэффициенты модели приведены в таблице. Из рис. 3 видно, что модель с приемлемой точностью описывает реологическое поведение исследуемых композитов.

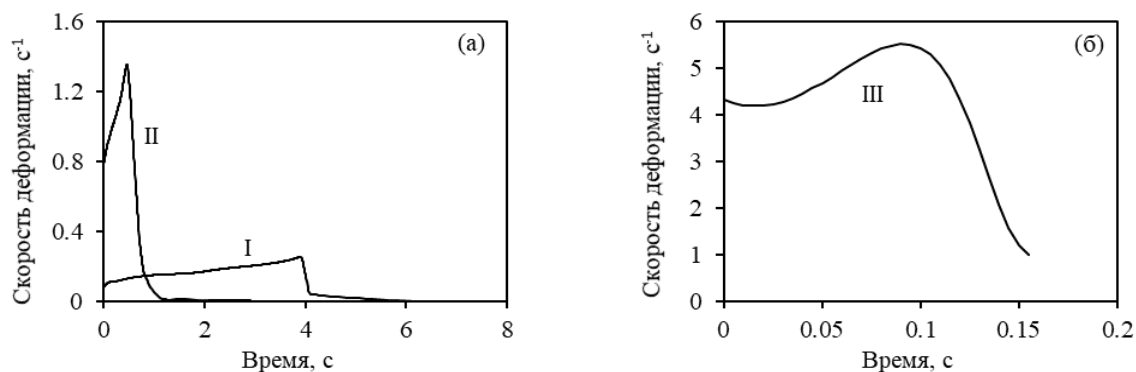


Рисунок 2 - Примеры зависимости скорости деформации образца от времени, используемые при идентификации модели сопротивления деформации для ММК В95/SiC 10% и АМг6/10% SiC

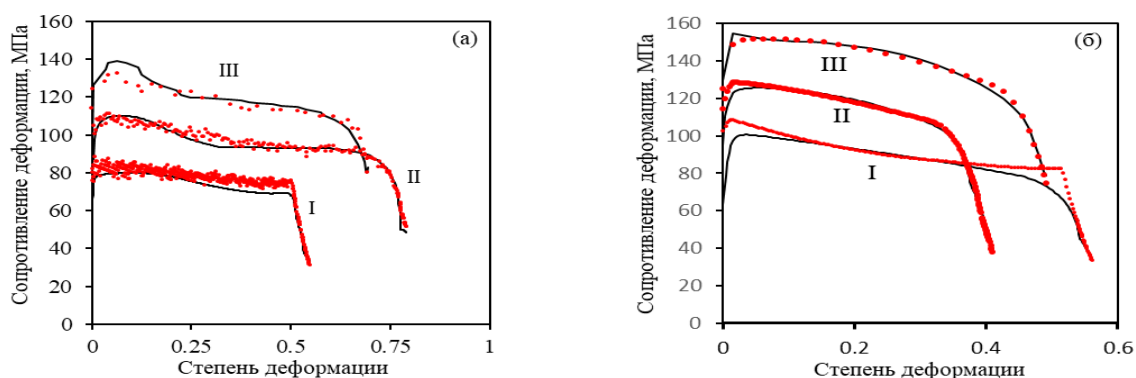


Рисунок 3 - Экспериментальная и рассчитанная по модели зависимость сопротивления деформации от степени деформации для ММК В95/10% SiC (а) и АМг6/10% SiC (б)

Таблица - Коэффициенты модели сопротивления деформации для ММК В95/10% SiC и АМг6/10% SiC при 400 °С

ММК	a_0	a_1	a_2	a_3	a_4	a_5	a_6	a_7	a_8	a_9	a_{10}	a_{11}	a_{12}	a_{13}	a_{14}
В95/10% SiC	3	3972	0,01	1	83	0,0	0,2	0,4	2	1	10	0,0	11	1,3	0,0004
АМг6/10% SiC	2	80297	0,02	0,0	23	53	0,0	3,4	2	1	0,3	0,0	2,0	1,2	34

Работа выполнялась при частичной финансовой поддержке РФФ грант № 14-19-01358 в части реологического исследования ММК В95/10% SiC; РФФИ грант № 16-08-00160 в части реологического исследования ММК АМг6/10% SiC, а также по плану работ по теме № 0391-2016-0001 ИМАШ УрО РАН в части моделирования реологического поведения композитов.

Список литературы

1. Smirnov A. S., Konovalov A. V., Muizemnek O. Yu. Modelling and Simulation of Strain Resistance of Alloys Taking into Account Barrier Effects // Diagnostics, Resource and Mechanics of materials and structures. 2015. № 1. С. 61-72.
2. Пугачева Н.Б., Мичуров Н.С., Сенаева Е.И., Быкова Т.М. Структура и теплофизические свойства алюмоматричных композитов // Физика металлов и металловедение. 2016. Т. 117. № 11. С. 1188–1195.