

## МОДЕЛИРОВАНИЕ СОПРОТИВЛЕНИЯ ДЕФОРМАЦИИ МЕТАЛЛОМАТРИЧНОГО АЛЮМИНИЕВОГО КОМПОЗИТА 15 % SiC/Al ПРИ ВЫСОКИХ ТЕМПЕРАТУРАХ

Смирнов А.С., Коновалов А.В., Муйземнек О.Ю.

*Институт машиноведения УрО РАН, Екатеринбург, e-mail: smirnov@imach.uran.ru*

В работе предложена модель сопротивления деформации, которая в отличие от разработанной ранее авторами модели учитывает кроме возврата и рекристаллизации эффект блокирования свободных дислокаций в процессе деформации. На основе известных из литературы экспериментальных кривых сопротивления деформации металломатричного композита 15 % SiC/Al, полученных при температурах 450 °С и 500 °С для диапазона скоростей деформаций от 0,1 до 10 с<sup>-1</sup>, выполнена идентификация данной модели сопротивления деформации. Предложенная модель сопротивления деформации с достаточно хорошей инженерной точностью описывает реологическое поведение металломатричного композита 15 % SiC/Al в рассмотренных температурно-скоростных условиях деформации.

**Ключевые слова:** модель сопротивления деформации, металломатричный композит, 15 % SiC/Al, высокие температуры

## SIMULATION OF THE STRAIN RESISTANCE OF A 15 % SiC/Al ALUMINUM METAL MATRIX COMPOSITE AT HIGH TEMPERATURES

Smirnov A.S., Konovalov A.V., Muizemnek O.Y.

*Institute of Engineering Science, Ekaterinburg, e-mail: smirnov@imach.uran.ru*

The paper proposes a model of strain resistance which, as distinct from the previously developed model, takes into consideration, besides recovery and recrystallization, the effect of blocking free dislocations under deformation. The identification of the strain resistance model is made on the basis of experimental strain resistance curves obtained for a 15 % SiC/Al metal matrix composite at temperatures of 450 °C and 500 °C and strain rates ranging between 0,1 and 10 s<sup>-1</sup>, the curves being known from the literature. The proposed strain resistance model simulates the rheological behavior of a 15 % SiC/Al metal matrix composite in the considered temperature-rate conditions of deformation.

**Keywords:** strain resistance model, metal matrix composite, 15 % SiC/Al, high temperatures

Металломатричные композиты (ММК) обладают улучшенными свойствами по сравнению с неармированными монолитными металлическими аналогами. Они имеют высокую прочность, жесткость, износостойкость, теплопроводность, повышенное сопротивление при высокотемпературных нагрузках и сопротивление на усталость, низкую плотность и коэффициент теплового расширения.

В этих материалах металл выступает в качестве матрицы, которая усиливается путем добавления неметаллических веществ, обычно керамики. При создании ММК возможно целенаправленное изменение их механических и эксплуатационных свойств путем подбора состава, изменения соотношения компонентов и методов изготовления композита. В результате эти композиционные материалы имеют разные приложения в ряде отраслей, включая автомобилестроение, электротехническую и аэрокосмическую промышленность. Из них изготавливаются детали двигателей внутреннего сгорания, тормозных систем, элементы транспортных, авиационных и ракетных конструкций, тепловые части управления силовой электроники, спортивные товары.

Исследования проводятся по изучению сопротивления деформации [1–4], влиянию режимов обработки на формирование микроструктуры [2, 5], построению моделей сопротивления деформации при горячей пластической деформации [3, 4, 6–9]. В работах [2–4, 8] показано, что для некоторых металломатричных композитов на основе алюминия форма кривых сопротивления деформации композита сильно зависит от скорости деформации. Так в металломатричном композите 15 % SiC/Al при температурах 450 °С и 500 °С в диапазоне скоростей деформаций  $\dot{\epsilon} = 5\text{--}10\text{ с}^{-1}$  сопротивление деформации  $\sigma_s$  имеет максимальный пик напряжения деформирования, после которого сопротивление деформации падает с увеличением степени деформации [3]. При этих же температурах, но при  $\dot{\epsilon} = 0,1\text{--}1\text{ с}^{-1}$  сопротивление деформации не имеет максимального пика и значение сопротивления деформации постоянно растет с увеличением степени деформации. Предложенная модель сопротивления деформации в работе [3], по мнению авторов работы, недостаточно точно описывает реологическое поведение композита, что может быть связано отсутствием в модели учёта барьерного эффекта блокирования свобод-

ных дислокаций примесными атомами и частицами SiC. В ранних работах авторов была разработана и апробирована модель сопротивления деформации на ряде сталей и алюминиевых сплавов, которая учитывает динамическую рекристаллизацию и возврат [10–12]. Структура модели позволяет добавить внутренние переменные, отвечающие за процессы, связанные упрочнением за счет барьерного эффекта.

Целью данной работы является описание реологического поведения металломатричного композита 15 % SiC/Al с помощью модели сопротивления деформации, учитывающей динамический возврат и рекристаллизацию, а также барьерный эффект блокирования свободных дислокаций при температурах 450 °С и 500 °С в диапазоне скоростей деформаций  $\dot{\varepsilon} = 0,1 - 10 \text{ с}^{-1}$ .

### Модель сопротивления деформации

В качестве математической модели сопротивления деформации была взята математическая модель из работы [10], учитывающая упрочнение за счет приращения плотности дислокаций, а разупрочнение за счет прохождения динамической рекристаллизации и возврата. Поскольку в высоколегированных алюминиевых сплавах с большим количеством включений может наблюдаться барьерный эффект блокирования границ зерен, субзерен и сводных дислокаций [13–16], то в модель сопротивления деформации были дополнительно введены внутренние параметры, отвечающие за блокирование движения свободных дислокаций примесными атомами и включениями. Модель сопротивления деформации имеет следующий вид:

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

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

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

$$V_n = 1 - V_r - V_p, \quad \dot{V}_p = a_{13} \dot{\varepsilon},$$

$$\varepsilon_r = \int_0^{t_r} \dot{\varepsilon} dt, \quad \frac{dR}{dt} = \dot{\varepsilon} \rho \quad \text{при } \rho > a_4.$$

Здесь  $\sigma_s$  – 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;  $\rho$  – величина, пропорциональная приращению плотности дислокаций за счет пластической деформации;  $\varepsilon_r$  – 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 при-

месными атомами;  $R$  – радиус рекристаллизованного зерна,  $R(t_r) = 0$ ,  $t_r$  – момент времени начала динамической рекристаллизации, определяемый условием  $\rho = a_4$ ;  $a_i$  ( $i = 0, \dots, 13$ ) – 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  $V_n = 1$ ,  $V_r = 0$ ,  $V_p = 0$ .

Модель сопротивления деформации идентифицировали с использованием кривых сопротивления деформации металломатричного композита 15 % SiC/Al, взятых из работы [3]. В этой работе в качестве

матричного материала использовался алюминиевый сплав (Cu – 4,1; Mg – 0,64; Mn – 0,54; Fe – 0,37; Si – 0,34; Zn – 0,1; Ti – 0,019; Al – ост., % по массе). К дан-

ному сплаву в объеме 15% был добавлен порошок из SiC с размером частиц 12 мкм. Исходная микроструктура образцов приведена на рис. 1.

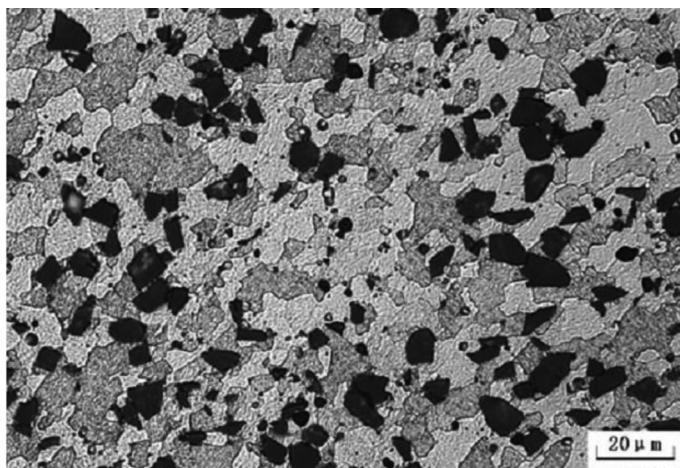


Рис. 1. Исходная микроструктура композита SiC/Al [3]

### Результаты идентификации

На рис. 2 маркерами приведены экспериментальные значения сопротивления деформации композита 15% SiC/Al при температурах испытаний 450 °C и 500 °C, взятые из работы [3].

Параметры модели нашли, минимизируя одновременно по четырем экспериментальным кривым сопротивления деформации для каждой температуры в отдельности среднеквадратичное отклонение расчетных

значений сопротивления деформации  $\sigma_s(t)$  от экспериментальных  $z(t)$

$$J(a_0, \dots, a_{13}) = \sum_{j=1}^4 \int_0^T [\sigma_s(t) - z(t)]^2 dt,$$

где  $T$  – время деформации образца. Результаты идентификации модели сопротивления деформации приведены на рис. 2 сплошными линиями. Коэффициенты модели приведены в таблице.

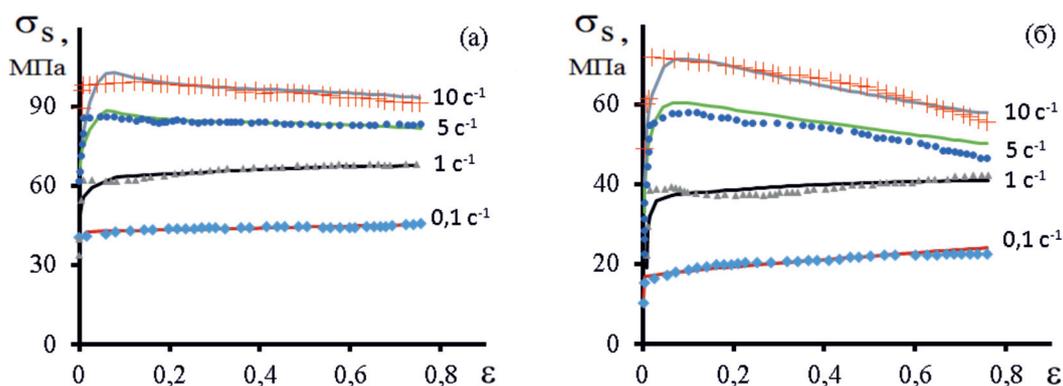


Рис. 2. Зависимость сопротивления деформации  $\sigma_s$  от степени деформации  $\epsilon$  металломатричного композита при температуре 450 °C и 500 °C. Маркерами показаны экспериментальные зависимости из работы [3], сплошные кривые построены по результатам идентификации модели сопротивления деформации

### Коэффициенты модели сопротивления деформации

T, °C	$a_0$	$a_1$	$a_2$	$a_3$	$a_4$	$a_5$	$a_6$	$a_7$	$a_8$	$a_9$	$a_{10}$	$a_{11}$	$a_{12}$	$a_{13}$
450	8	4373	0,12	62	5,7	117	0,144	1,63	29	0,36	0,68	149	2,05	0,019
500	6	4589	0,15	57	4,3	137	0,044	1,14	14	1,02	0,91	140	3,49	0,005

### Обсуждение результатов идентификации модели

Как видно из рис. 2 поведение композита можно разделить на два типа в зависимости от скорости деформации. Материал упрочняется при скоростях деформаций  $\dot{\varepsilon} = 0,1-1 \text{ с}^{-1}$ , а при скоростях деформаций  $\dot{\varepsilon} = 5-10 \text{ с}^{-1}$  композит имеет максимальный пик напряжения деформирования, после которого происходит разупрочнение материала. Такое реологическое поведение модель сопротивления деформации учитывает, и из расчетных кривых сопротивления деформации видно, что модель достаточно хорошо описывает разупрочнение и упрочнение материала.

Среднее относительное отклонение  $\delta$  экспериментальных кривых от рассчитанных составило 2% для температуры испытания 450 °С и 3% для температуры испытания 500 °С. Величину  $\delta$  вычисляли по формуле

$$\delta_p = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^{N=4} \frac{\int_0^{T_j} |\sigma_s(t) - z(t)| dt}{\int_0^{T_j} z(t) dt} \cdot 100 \%,$$

где  $j$  – номер эксперимента;  $N$  – общее количество опытов во всех экспериментах, используемых при идентификации;  $T_j$  – время деформации образца для  $j$ -го эксперимента;  $z$  и  $\sigma_s$  – экспериментальное и полученное по результатам идентификации модели сопротивления  $j$ -го эксперимента значение сопротивления деформации.

### Выводы

Из результатов идентификации модели сопротивления деформации по известным из литературы опытным данным можно заключить, что предложенная модель сопротивления деформации с достаточно хорошей инженерной точностью описывает реологическое поведение металломатричного композита 15% SiC/Al при высокотемпературной пластической деформации при температурах 450 °С и 500 °С для диапазона скоростей деформаций от 0,1 до 10  $\text{с}^{-1}$ .

*Работа выполнена при финансовой поддержке РФФ (проект №14-19-01358).*

### Список литературы

1. Mazen A.A. Effect of deformation temperature on the mechanical behavior and deformation mechanisms of Al-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> metal matrix composites // Journal of Materials Engineering and Performance. – 1999. – Т. 8, № 4. – С. 487–495.
2. Rajamuthamilselvan M., Ramanathan S. Development of processing map for 7075 Al/20% SiC p composite // Journal of Materials Engineering and Performance. – 2012. – Т. 21, № 2. – С. 191–196.
3. Yang Y., Li F., Yuan Z., Qiao H. A modified constitutive equation for aluminum alloy reinforced by silicon carbide particles at elevated temperature // Journal of Materials Engineering and Performance. – 2013. – Т. 22, № 9. – С. 2641–2655.
4. Gangolu S., Rao A. G., Prabhu N., Deshmukh V. P., Kashyap B. P. Hot Workability and Flow Characteristics of Aluminum-5 wt.% B4C Composite // Journal of Materials Engineering and Performance. – 2014. – С. 1–8.
5. Mondal C., Singh A. K., Mukhopadhyay A.K., Chattopadhyay K. Effects of different modes of hot cross-rolling in 7010 aluminum alloy: Part II. mechanical properties anisotropy // Metallurgical and Materials Transactions A: Physical Metallurgy and Materials Science. – 2013. – Т. 44, № 6. – С. 2764–2777.
6. Puchi-Cabrera E. S. A constitutive description for aluminum-0.1 pct magnesium alloy under hot working conditions // Metallurgical and Materials Transactions A: Physical Metallurgy and Materials Science. – 2003. – Т. 34, № 12. – С. 2837–2846.
7. Gouttebroze S., Mo A., Grong Ø., Pedersen K. O., Fjær H.G. A new constitutive model for the finite element simulation of local hot forming of aluminum 6xxx alloys // Metallurgical and Materials Transactions A: Physical Metallurgy and Materials Science. – 2008. – Т. 39 A, № 3. – С. 522–534.
8. Zhang P., Li F., Wan Q. Constitutive equation and processing map for hot deformation of SiC particles reinforced metal matrix composites // Journal of Materials Engineering and Performance. – 2010. – Т. 19, № 9. – С. 1290–1297.
9. Asgharzadeh H., Simchi A., Kim H. S. Hot deformation of ultrafine-grained Al6063/Al 2O<sub>3</sub> nanocomposites // Journal of Materials Science. – 2011. – Т. 46, № 14. – С. 4994–5001.
10. Коновалов А.В. Вязкопластическая модель сопротивления металла высокотемпературной деформации // Металлы. – 2005. № 5. – С. 94–98.
11. Коновалов А.В., Смирнов А.С. Вязкопластическая модель сопротивления деформации стали 08X18H10T при температуре горячей деформации // Металлы. – 2008. № 2. – С. 55–59.
12. Смирнов А.С., Коновалов А.В., Муйземнек О.Ю. Идентификация модели сопротивления деформации металлических материалов с учетом объемной доли динамически рекристаллизованных зерен // Деформация и разрушение материалов. – 2013. № 9. – С. 7–13.
13. Zhu S. M., Nie J. F. Serrated flow and tensile properties of a Mg-Y-Nd alloy // Scripta Materialia. – 2004. – Т. 50, № 1. – С. 51–55.
14. Wang C., Xu Y., Han E. Serrated flow and abnormal strain rate sensitivity of a magnesium–lithium alloy // Materials Letters. – 2006. – Т. 60, № 24. – С. 2941–2944.
15. Zhongjun W., Weiping J., Jianzhong C. Study on the Deformation Behavior of Mg-3.6% Er Magnesium Alloy // Journal of Rare Earths. – 2007. – Т. 25, № 6. – С. 744–748.
16. Anjabin N., Karimi Taheri A., Kim H. S. Simulation and experimental analyses of dynamic strain aging of a supersaturated age hardenable aluminum alloy // Materials Science and Engineering A. – 2013. – Т. 585. – С. 165–173.