

ФЕНОМЕНОЛОГИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ДИНАМИЧЕСКОЙ РЕКРИСТАЛЛИЗАЦИИ АВИАЦИОННЫХ СПЛАВОВ

©2011 А. И. Хаймович, О. С. Сурков

Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет)

Используя представление течения поликристаллической деформируемой среды как системы двух взаимосвязанных компонентов – континуальной и зернограничной структур, были получены полевые уравнения их термодинамического взаимодействия, которые легли в основу феноменологических моделей динамической рекристаллизации, полученных на основе диаграмм рекристаллизации. Представленные модели динамической рекристаллизации стали ЭИ437 и титанового сплава ВТ9 иллюстрируют предложенный подход.

Динамическая рекристаллизация, напряженно-деформированное состояние, поликристаллическая среда.

В настоящее время разработка и совершенствование технологических процессов обработки металлов давлением и резанием, связанных с интенсивными пластическими деформациями в локальной области, часто производятся эмпирически, что приводит к огромным временным и финансовым затратам. В связи с этим задача разработки математических моделей и исследования с их помощью условий устойчивости данных процессов является весьма актуальной.

С этой целью авторами были получены и исследованы новые системы уравнений движения деформируемой среды с учетом её поликристаллической структуры, а также был определен способ, с помощью которого тепловое и напряженно-деформированное состояние рассчитывается из полевых уравнений и экспериментальных диаграмм динамической рекристаллизации. При построении моделей рассматривались функции состояния среды, связывающие напряжения и скорости деформаций, определяемые с помощью термодинамики необратимых процессов.

Модели динамической рекристаллизации в соответствии с проведенными теоретическими исследованиями представляются в форме зависимости (1):

$$\frac{d_i - (d_i)_0}{(d_i)_0} = (-1)^n a_0 \cdot \alpha_{T_n} (T_\varepsilon - T_0) \times \left[\exp \left(\frac{Q}{R} \left(\frac{1}{T_n} - \frac{1}{T_0} \right) \right) \right]^{a_1} [1 - a_{2i} (\dot{\varepsilon}_2^v)^{a_3}]^2, \quad (1)$$

где d_i - размер зерна после рекристаллизации, измеренный в направлении оси i ; $(d_i)_0$ - исходный размер зерна; α_{T_n} - коэффициент тепловой миграции границ зерен при температуре T_n (при $T_n=273K$ α_{T_n} равен коэффициенту линейного расширения); Q - энергия активации самодиффузии; R - универсальная газовая постоянная; $\dot{\varepsilon}_2^v$ - интенсивность скорости деформации; T_ε - условная температура, характеризующая изменение температуры T_0 в процессе деформирования. Значение T_ε соответствует статистической оценке конечной температуры процесса деформации, при которой произошло изменение размеров зерна. Неизвестные коэффициенты $a_1, a_3, a_0 = (f_{ii})_0 (1 - f_p^w)$,

$a_{2i} = \frac{1 - f_p^w}{f_p^w (f_{ii})_0 (\dot{\varepsilon}_{2\varepsilon}^v)^{a_3}}$ определяются экспериментально.

По известным экспериментально найденным из (1) коэффициентам $a_0 \dots a_3$ и оценочному значению $\dot{\varepsilon}_{2\varepsilon}^v$ находятся неизвестные параметры f_p^w и $(f_{ii})_0$, входящие в состав a_0 и a_{2i} . Коэффициент n в (1) принимает значение 1, если динамическая рекристаллизация сопровождается уменьшением зерна, и $n=0$, если зерно увеличивается.

Параметр f_p^w характеризует степень восприимчивости деформируемой поликри-

таллической среды к динамической рекристаллизации, а параметр $(f_{ii})_0$ характеризует текстурообразование в направлении оси i .

Статистическое моделирование динамической рекристаллизации производилось с помощью модуля нелинейного регрессионного анализа программного обеспечения Statistica v7 разработки компании StatSoft Inc. Неизвестные коэффициенты, входящие в модель (1), рассчитывались методом наименьших квадратов при оценке невязок по методу Гаусса-Ньютона.

Адаптированные математические модели динамической рекристаллизации были получены при априори принятом значении $\alpha_0 = 0,01$. Для горячей прокатки сплава ЭИ437 физические константы в (1) принимались следующими: $\alpha_{T_n} = 1,2 \cdot 10^{-5}$,

$\frac{Q}{R} = 30,67 \cdot 10^3 \text{ K}$. Начальный размер зерна

$(d_i)_0$ составил 16 мкм. Для процесса высокоскоростной горячей осадки титанового сплава ВТ9 физические константы в (1) принимались следующими: $\alpha_{T_n} = 0,9 \cdot 10^{-5}$,

$\frac{Q}{R} = 38,7 \cdot 10^3 \text{ K}$. Начальный размер зерна

$(d_i)_0$ составил 20 мкм.

Неизвестные коэффициенты $T_\varepsilon, a_1, a_{2i}$ определялись из экспериментальных диаграмм рекристаллизации, построенных в форме $d_i = f(T_0, e)$, e – степень деформации. Рассчитанные коэффициенты и соответствующие им статистики приведены в табл. 1.

Таблица 1. Расчетные коэффициенты математической модели динамической рекристаллизации

| Обозначение коэффициента | Значение коэффициента | Стандартное отклонение | Коэффициент Стьюдента (t) |
|---|-----------------------|------------------------|---------------------------|
| Сплав ЭИ437. Степень достоверности модели – 78% | | | |
| a_1 | 0,156 | 0,00459 | 33,891 |
| a_{2i} | 2,571 | 0,2913 | 8,824 |
| $T_\varepsilon, ^\circ\text{K}$ | 1073,090 | 88,4839 | 9,042 |
| Титановый сплав ВТ9. Степень достоверности модели – 90% | | | |
| a_1 | 0,141 | 0,00097 | 145,541 |
| a_{2i} | 0,565 | 0,09272 | 6,095 |
| $T_\varepsilon, ^\circ\text{K}$ | 1191,465 | 16,4696 | 55,767 |

Экспериментальные данные по динамической рекристаллизации для сплава ЭИ437 (рис. 1) брались из [1]. Экспериментальные данные для титанового сплава ВТ9 (рис. 2) были получены авторами статьи.

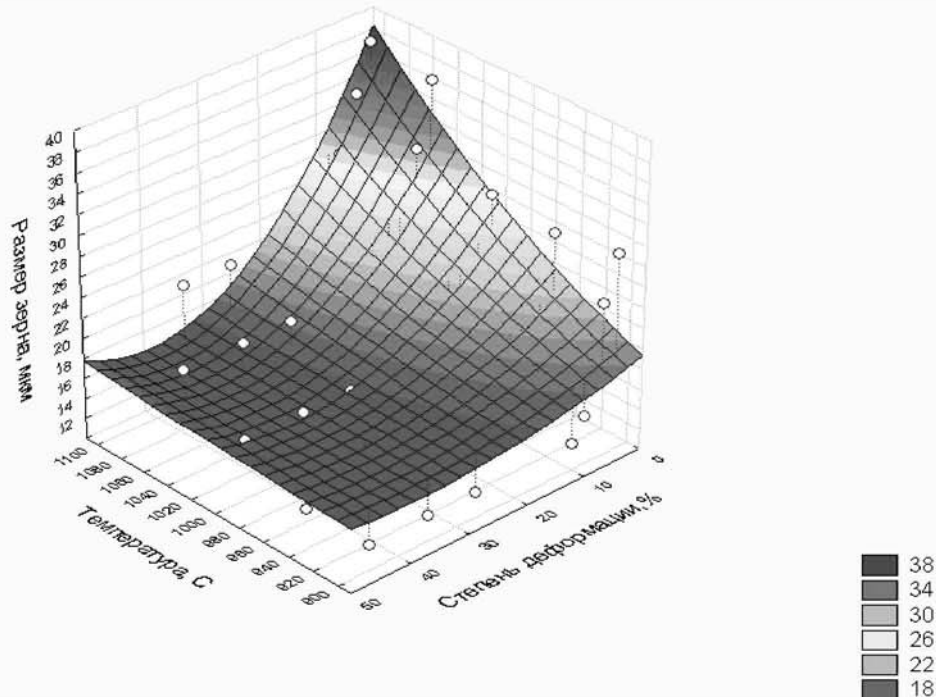


Рис.1. Поверхность динамической рекристаллизации (визуализация математической модели) и экспериментальные точки для горячей прокатки стали ЭИ437

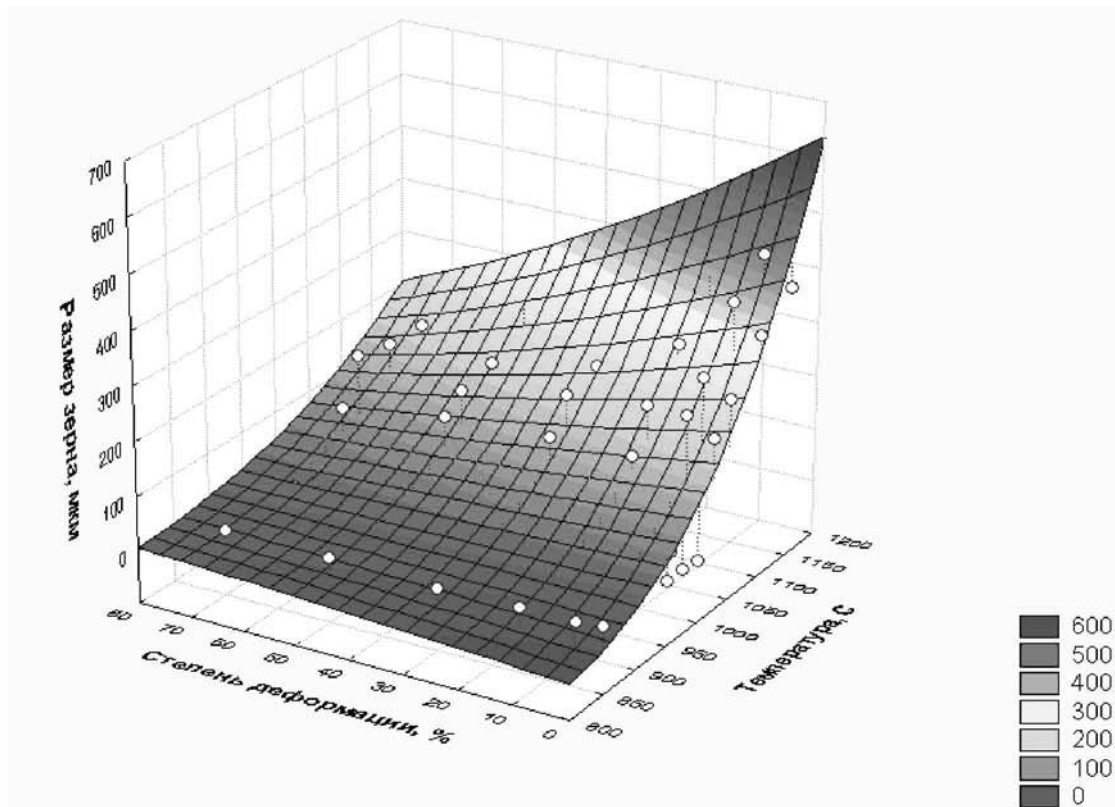


Рис.2. Поверхность динамической рекристаллизации (визуализация математической модели) и экспериментальные точки для горячей осадки титанового сплава BT9

Анализ приведенных диаграмм показывает, что область определения по температуре начала деформирования T_0 для рассматриваемой модели динамической рекристаллизации лежит в интервале

$$\Delta_{\min} < \left| \frac{T_{\varepsilon} - T_0}{T_{\varepsilon}} \right| < \frac{\Delta T}{2T_{\varepsilon}}, \quad (2)$$

где ΔT - температурный интервал, в пределах которого варьировалось значение T_0 при расчете значений коэффициентов, входящих в модель (1);

Δ_{\min} - минимальная величина, обеспечивающая устойчивость расчетов по (1). Для рассматриваемых моделей разумно принять $\Delta T = 500\text{K}$, $\Delta_{\min} \approx 0,001$.

Выводы

1. Экспериментально на основе приведенных численных моделей динамической рекристаллизации подтверждена гипотеза о представлении поликристаллической деформируемой среды для континуальной теории пластичности как двухкомпонентной среды, образованной динамически рекристаллизуемыми зернами и их границами.

2. Модель динамической рекристаллизации в форме 1 достоверно описывает процесс рекристаллизации в закритической области для рассмотренных поликристаллических материалов, подвергнутых интенсивной пластической деформации.

3. Совокупность 3 коэффициентов текстурообразования $(f_{ii})_0, i = \{x, y, x\}$, соотношенных к соответствующим значениям интенсивностей скоростей и температуры деформации, и коэффициент склонности материала к динамической рекристаллизации f_{ρ}^w однозначно определяют поведение поликристаллических материалов в процессе рекристаллизации.

Работа выполнена при финансовой поддержке Правительства Российской Федерации (Минобрнауки), на основании постановления Правительства РФ №218 от 09.04.2010.

Библиографический список

1. Горелик, С.С. Рекристаллизация металлов и сплавов [Текст] / С.С. Горелик. - М.: Металлургия, 1967.- 402с.

THE PHENOMENOLOGICAL MODELS OF THE DYNAMIC RECRYSTALLIZATION OF ALLOYS FOR AVIATION

©2011 A. I. Khaimovich, O. S. Surkov

Samara State Aerospace University named after academician S.P. Korolyov
(National Research University)

On the basis of representation of a plastic flow in the polycrystalline media in which grains and their borders interact with themselves as two diverse, but the interconnected structures, the mathematical model containing the equations of movement of continuum taking into account thermomechanical interaction of specified structures has been developed. The thermal and is intense-stress and strain condition according to model are calculated from the field equations and experimental diagrams dynamic recrystallization. The presented numeric models of the dynamic recrystallization for alloy ЭИ437 and titanic alloy BT9, confirm the proposed setting.

Dynamic recrystallization, stress and strain fields, polycrystalline media.

Информация об авторах

Хаймович Александр Исаакович, кандидат технических наук, доцент кафедры производства двигателей летательных аппаратов, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет). Тел.: (846) 267-47-76. E-mail: berill_samara@bk.ru. Область научных интересов: технология машиностроения.

Сурков Олег Станиславович, кандидат технических наук, доцент кафедры производства двигателей летательных аппаратов, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет). Тел.: (846) 267-47-76. E-mail: ossvbm@mail.ru. Область научных интересов: технология машиностроения.

Khaimovich Alexander Isaakovich, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of Manufacture of engines of flying machines department, Samara State Aerospace University named after academician S.P. Korolyov (National Research University). E-mail: berill_samara@bk.ru. Area of research: technology of mechanical engineering, processing of metals by pressure.

Surkov Oleg Stanislavovich - Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of Manufacture of engines of flying machines department, Samara State Aerospace University named after academician S.P. Korolyov (National Research University). E-mail: ossvbm@mail.ru. Area of research: technology of mechanical engineering.