

УДК 539.424

А. И. Морозова*, А. Н. Беляков

НИУ «БелГУ», г. Белгород

**morozova_ai@bsu.edu.ru*

ДЕФОРМАЦИОННОЕ СТАРЕНИЕ Cu–Cr–Zr СПЛАВОВ В ПРОЦЕССЕ РАВНОКАНАЛЬНОГО УГЛОВОГО ПРЕССОВАНИЯ

Предложен способ определения объемной доли дисперсных частиц, выделяющихся в процессе равноканального углового прессования (РКУП) Cu–Cr–Zr сплавов. Метод основан на применение зависимости Маттисона для оценки рассеяния электронов на атомах замещения. Результаты расчета объемной доли частиц с помощью предложенного подхода хорошо коррелируют ($R^2 = 0,92$) с объемной долей частиц, измеренной методом просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ).

Ключевые слова: медные сплавы, интенсивная пластическая деформация, равноканальное угловое прессование, прочность, электропроводность

A. I. Morozova, A. N. Belyakov

DEFORMATION AGING OF Cu–Cr–Zr ALLOYS DURING EQUAL CHANNEL ANGULAR PRESSING

A method of estimation of volume fraction of dispersed particles precipitated during equal channel angular pressing in Cu–Cr–Zr alloys was elaborated. The method involves the Matthiessen relationship for determination of electron scattering on solutes. The particles volume fraction calculated by the proposed approach correlated well ($R^2 = 0,92$) with the particles volume fraction measured by transmission electron microscopy.

Key words: copper alloys, severe plastic deformation, equal channel angular pressing, strength, electrical conductivity

Развитие электротехнической промышленности предполагает переход к применению проводящих материалов, обладающих высокой прочностью и электрической проводимостью. В связи с этим активное развитие получили методы интенсивной пластической де-

формации, среди которых выделяется равноканальное угловое прессование (РКУП). Особый интерес представляет использование дисперсионно-упрочняемых сплавов системы Cu–Cr–Zr, однако существует проблема оценки объемной доли дисперсных частиц, выделяющихся в процессе деформации этих сплавов. Целью работы является анализ метода оценки объемной доли частиц вторых фаз, выделяющихся в процессе деформации, по уравнению Маттисона в сравнении с ПЭМ.

В качестве материалов исследования использованы сплавы Cu–0,1%Cr–0,1%Zr и Cu–0,3%Cr–0,5%Zr. Сплавы подвергнуты обработке на получение пересыщенного твердого раствора при температуре 920 °С в течение 1 ч с последующим охлаждением в воду. Проведены 1–8 проходов РКУП при температуре 400 °С по маршруту V_C , угол пересечения каналов матрицы — 90°. Исследование микроструктуры проведено с помощью просвечивающего электронного микроскопа Jeol JEM 2100. Электропроводность измерена вихретоковым методом с помощью установки Константа К-6.

Объемную долю частиц вторых фаз определяли двумя методами. Использовали метод оценки объемной доли частиц вторых фаз по анализу фотографий микроструктуры. Кроме того, было предложено рассчитать объемную долю частиц по изменению электрического сопротивления в соответствии с уравнением Маттисона [1]:

$$\rho = \frac{m}{N \cdot e_э^2} \cdot \left(\frac{1}{\tau} \right) \quad (1),$$

где ρ — удельное электрическое сопротивление, m — масса электрона, $e_э$ — заряд электрона, N — общее число электронов, τ — время релаксации электрона на препятствиях.

Предположим, что время релаксации τ складывается из времени релаксации электрона на атомах Cu, Cr и Zr. Тогда

$$\rho = \frac{m_e}{N \cdot e_э^2} \left(\frac{1}{\tau_{Cu}} + \frac{1}{\tau_{Cr}} + \frac{1}{\tau_{Zr}} \right), \quad (2)$$

где τ_{Cu} — время релаксации электронов на атомах меди, равное $2,43 \times 10^{-14} \text{ с}^{-1}$, τ_{Cr} и τ_{Zr} — время релаксации электронов на атомах Cr и Zr, входящих в состав твердого раствора.

Учитывая, что предельная растворимость Cr $\approx 0,6$, а Zr $\approx 0,12$ ат. % [2], время релаксации электронов на 1 атоме хрома и 1 атоме циркония равно $1,43 \times 10^{-13} \text{ с}^{-1}$ и $3,49 \times 10^{-14} \text{ с}^{-1}$ соответственно. Зная время релаксации на 1 атоме, можно оценить время релаксации электрона на атомах, вхо-

дящих в состав пересыщенного твердого раствора. Тогда время релаксации электронов τ_X на атомах Cr и Zr, присутствующих в твердом растворе:

$$\tau_X = \frac{m_{X_{\text{крит}}}}{m_{X_i}} \frac{m_e}{N \cdot e^2 \cdot (\rho_{X_{\text{крит}}} - \rho_{\text{Cu}})}, \quad (3)$$

где $m_{X_{\text{крит}}}$ — максимальная растворимость легирующего элемента, m_X — массовая доля легирующего элемента в твердом растворе, $\rho_{X_{\text{крит}}}$ — удельное электрическое сопротивление твердого раствора с предельным содержанием растворенного легирующего элемента, ρ_{Cu} — электросопротивление чистой меди.

Таким образом, из уравнений (1–3) можно рассчитать количество легирующих элементов, участвующих в формировании частиц, как разницу между количеством легирующих элементов после закалки и после деформации. Формула для определения объемной доли частиц f имеет вид:

$$f = \frac{m_{X_0} - m_{X_i} Ar_{\text{Cu}} V_{\text{част}}}{Ar_X N_{\text{ат. част}} V_{\text{яч. Cu}} (m_{X_i} + 25)}, \quad (4)$$

где m_{X_0} — доля легирующего элемента в твердом растворе после закалки, f — объемная доля частиц, $N_{\text{ат. част}}$ — число атомов легирующего элемента в частице, $V_{\text{яч. Cu}}$ — объем элементарной ячейки меди, $V_{\text{част}}$ — объем частицы хрома, Ar_X — атомная масса легирующего элемента, Ar_{Cu} — атомная масса меди.

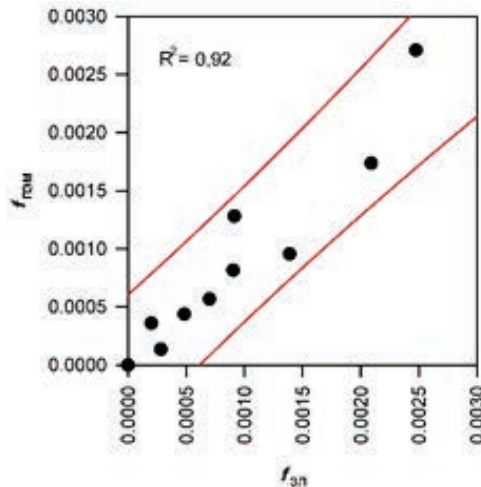


Рис. Соотношение между объемной долей частиц, измеренной методом ПЭМ $f_{\text{ПЭМ}}$ и рассчитанной по изменению электрической проводимости $f_{\text{эл}}$

На рисунке представлено сопоставление экспериментальных значений объемной доли частиц (расчет по фотографиям ПЭМ и по предложенному подходу). Представленные данные свидетельствуют о хорошей корреляции двух методов расчета объемной доли частиц для Cu–Cr–Zr сплавов, что свидетельствует о достоверной оценке объемной доли частиц по изменению электрической проводимости.

Литература

1. Matthiessen A. On the Influence of Temperature on the Electric Conducting-Power of Alloys // Philosophical Transactions of the Royal Society 1864. V. 154. P. 167–200.
2. High strength and good electrical conductivity in Cu-Cr alloys processed by severe plastic deformation / S. V. Dobatkin [et al.] // Materials Letters. 2015. V. 153. P. 5–9.