

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ФРАГМЕНТАЦИИ И РЕКРИСТАЛЛИЗАЦИИ В СУБМИКРОКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ МЕТАЛЛАХ И СПЛАВАХ, ПОЛУЧЕННЫХ МЕТОДОМ РКУ-ПРЕССОВАНИЯ

Нохрин А.В., Чувильдеев В.Н., Копылов В.И.^(*), Лопатин Ю.Г., Мелехин Н.В.,
Пискунов А.В., Сахаров Н.В., Смирнова Е.С.

Научно-исследовательский физико-технический институт Нижегородского государственного университета им. Н.И. Лобачевского, г. Нижний Новгород, Россия

(*) Физико-технический институт Национальной Академии Наук Беларусь, г. Минск

Nokhrin@nifli.unn.ru

В первой части работы описаны результаты исследований процесса деформационного измельчения зерен при интенсивной пластической деформации (ИПД). В качестве объектов исследования использовались металлы (медь, никель, титан, железо, алюминий), а также медные, алюминиевые, железные, титановые и магниевые сплавы, субмикрокристаллическая (СМК) структура в которых была сформирована методом равноканального углового прессования (РКУП). Температура РКУП ($T_{ркуп}$) варьировалась в интервале от 20 до 500 °C.

Установлено, что зависимость $d'(T_{ркуп})$ имеет двухстадийный нелинейный, близкий к экспоненциальному характер, причем интенсивность изменения d' с повышением $T_{ркуп}$ существенно отличается для ОЦК- и ГЦК-металлов. Установлено, что в области температур выше некоторой критической температуры T_1 , которую условно можно назвать температурой рекристаллизации при РКУП, величина d' нарастает с увеличением $T_{ркуп}$ весьма интенсивно. Продемонстрировано увеличение температуры плавления металла, соответствующее снижению гомологической температуры ИПД, приводит к уменьшению величины d' . Показано, что d' существенно зависит от концентрации легирующих элементов, находящихся в твердом растворе сплава.

Построена модель, позволяющая вычислять величину d' , который может быть получен методом РКУП. Проведен анализ силовых и энергетических условий процесса диспергирования зерен при ИПД. Показано, что процесс деформационного диспергирования структуры металлов может быть описан как аккомодационный процесс, осуществляющийся под действием внутренних напряжений и обеспечивающий релаксацию запасенной в процессе ИПД упругой энергии (связанной со стыковыми дислокациями). Рассмотрен альтернативный (по отношению к фрагментации) механизм аккомодации стыковых дислокаций – диффузионный массоперенос и показано, что при определенных условиях этот процесс может оказаться более эффективным чем фрагментация. И, несмотря на продолжающуюся деформацию, возможно прекращение «измельчения» зернистой структуры появляется предел деформационного измельчения зерен, который не может быть уменьшен при заданных условиях ИПД материала.

Описана теоретическая модель, позволяющая анализировать влияние температуры и скорости интенсивной пластической деформации на величину предела измельчения зерен металлов и сплавов, а также диффузионные свойства границ зерен субмикрокристаллических металлов и сплавов, получаемых методом ИПД. На основе анализа результатов экспериментальных данных показано, что зависимость энергии активации зернограничной диффузии в СМК материалах от температуры ИПД имеет немонотонный, с максимумом, характер. Установлено, что характер зависимости энергии активации зернограничной диффузии в СМК материалах от температуры ИПД определяется кинетикой протекания конкурирующих процессов накопления дефектов на границах зерен при ИПД и их диффузионной аккомодацией.

На основе разработанной модели обсуждаются литературные данные по диспергированию металлов, подход к описанию и анализу процесса диспергирования с использованием параметра Зинера-Холломона (Z) и, в частности необходимость привлечения представлений о развитии процессов динамической рекристаллизации при ИГД.

Во второй части работы описаны результаты исследований термической стабильности зеренной структуры, а также особенности изменений прочности и удельного электросопротивления (УЭС) при отжиге субмикрокристаллических (СМК) сплавов систем Cu–Cr и Cu–Cr–Zr, структура которых сформирована методом равноканального углового прессования (РКУП). Изучено влияние легирующих элементов и частиц второй фазы на термическую стабильность СМК сплавов системы Cu–Cr. Исследовано влияние малых добавок хрома на температуру рекристаллизации и термическую стабильность механических свойств СМК бронз. На основе анализа данных по прочности и УЭС рассчитаны зависимости размера и объемной доли дисперсных частиц второй фазы от температуры и времени отжига СМК бронз различного состава. Показано, что процессы выделения и роста частиц второй фазы в СМК сплавах контролируются диффузией по ядрам дислокаций и неравновесным границам зерен.

Предложена модель распада твердого раствора в СМК сплавах, в рамках которой описаны закономерности изменения объемной доли и размера выделяющихся частиц в зависимости от степени пересыщения твердого раствора, а также температуры и времени отжига. Описаны закономерности распада твердого раствора в случае гомогенного (выделение и рост частиц в объеме зерен) и гетерогенного механизмов (выделение и рост частиц на дислокациях и на границах зерен) как в условиях стабильной микроструктуры, так и в случае параллельного протекания процессов возврата и рекристаллизации.

Предложена модель расчета температуры рекристаллизации в СМК сплавах, в рамках которой предполагается, что температура рекристаллизации контролируется скоростью роста дисперсных частиц в объеме и по неравновесным границам зерен СМК сплавов. Получены выражения, описывающие зависимость температуры рекристаллизации от времени отжига, размера зерна, диффузионных свойств границ зерен, размера, объемной доли и характера пространственного распределения нанодисперсных частиц второй фазы, а также от термодинамических и кристаллографических параметров сплава.

На основе моделей рассчитаны оптимальные режимы низкотемпературной термической обработки, обеспечивающие решение задачи создания СМК медного сплава с одновременно повышенными характеристиками прочности и проводимости. Эффективность разработанных моделей продемонстрирована на примере СМК сплава Cu-0.8Cr-0.05Zr, в котором обеспечена повышенная твердость (220–225 H_v), электропроводность (УЭС не менее 80% от УЭС чистой меди) и термическая стабильность (температура разупрочнения более 450 °C).

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант №12-08-90003-Бел а), а также ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России на 2009–2013 годы» и ФЦП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2007–2013 годы».