

УДК 539.13

*Е.Ф. ДУДАРЕВ¹, Г.П. ПОЧИВАЛОВА¹, А.Н. ТАБАЧЕНКО¹, Т.Ю. МАЛЕТКИНА^{1,2}, А.Б. СКОСЫРСКИЙ¹, Д.А. ОСИПОВ¹***МИКРОПЛАСТИЧЕСКАЯ ДЕФОРМАЦИЯ СУБМИКРОКРИСТАЛЛИЧЕСКОЙ МЕДИ ПРИ КОМНАТНОЙ И ПОВЫШЕННОЙ ТЕМПЕРАТУРАХ***

Приведены результаты исследования методами дифракции обратно рассеянных электронов и рентгеновской дифрактометрии субмикрокристаллической меди, подвергнутой холодной прокатке после *abc*-прессования. Показано, что после такой комбинированной интенсивной пластической деформации сформировалась субмикрокристаллическая структура со средним размером элементов зеренно-субзеренной структуры 0.63 мкм при доле большеугловых границ ~ 70 % с типичной для меди текстурой прокатки. Представлены результаты исследования микропластической деформации меди с такой структурой в интервале температур 295–473 К и с субмикрокристаллической структурой, сформированной при холодной прокатке крупнозернистой меди.

Ключевые слова: микропластическая деформация, субмикрокристаллическая медь, зернограничное проскальзывание, релаксация внутренних напряжений.

Введение

При всех способах интенсивной пластической деформации металлов и сплавов формируется субмикрокристаллическая зеренно-субзеренная структура, для которой помимо размера зерен меньше 1 мкм характерны высокая степень неравновесности большеугловых и малоугловых границ зерен, внутренние дальнедействующие напряжения и большой свободный объем на границах зерен [1–4]. Данные особенности структуры по сравнению с крупнозернистыми рекристаллизованными аналогами могут повлиять на способность границ зерен генерировать и поглощать дислокации, на сопротивление движению дислокаций в пределах зерна и на зернограничное проскальзывание, то есть на деформационное поведение и упругопластические свойства. Естественно, что при температурах выше конечной температуры интенсивной пластической деформации испытанию подвергается образец с измененными в процессе его нагрева параметрами субмикрокристаллической структуры. Поэтому влияние температуры на деформационное поведение и напряжение течения на всех стадиях пластической деформации может быть обусловлено изменением параметров субмикрокристаллической структуры при нагреве образца до температуры испытания и вклада некоторых механизмов упрочнения в напряжение течения.

В настоящей работе исследовано влияние температуры испытания на деформационное поведение и напряжение течения на стадии микропластической деформации субмикрокристаллической меди в условиях релаксации внутренних напряжений и развития зернограничной деформации.

Материал и методики исследования

Для исследования использована медь чистоты 99.95 % с субмикрокристаллической структурой, сформированной при *abc*-прессовании со ступенчатым понижением температуры прессования с 573 до 295 К с последующей дробной прокаткой при комнатной температуре с суммарной степенью деформации 86 %. Методами дифракции обратно рассеянных электронов установлено, что в результате такой пластической деформации и последующего отжига в течение 60 мин при 373 К сформировалась однородная субмикрокристаллическая структура со средним размером элементов зеренно-субзеренной структуры 630 нм при доле большеугловых границ ~ 70 % и с характерной для прокатки меди кристаллографической текстурой (рис. 1). Форма большинства зерен неравноосная: они вытянуты в направлении прокатки, и в самых крупных из них содержатся оборванные малоугловые границы. Методами рентгеновской дифрактометрии установлено, что размер областей когерентного рассеяния равен 192 нм, а деформация кристаллической решетки достигает $1.4 \cdot 10^{-3}$.

* Работа выполнена в рамках госзадания Минобрнауки (задание № 2014/223, код проекта 727).

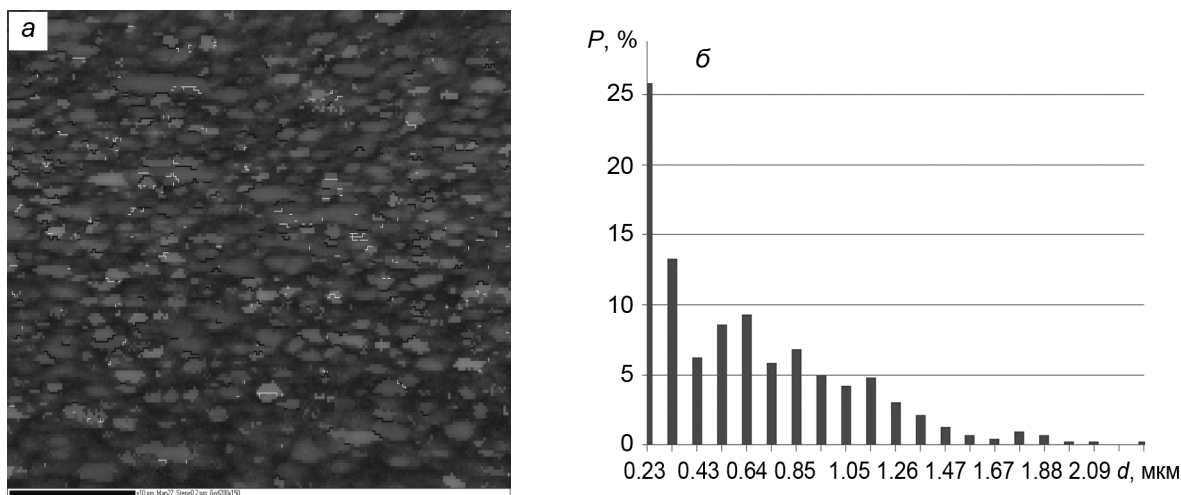


Рис. 1. Карта распределения зерен по ориентациям (а) и гистограмма их распределения по размерам (б) при субмикроструктурной структуре

Эти данные свидетельствуют о наличии внутренних напряжений второго рода, а результаты исследований упругого последствия при крупнозернистой и субмикроструктурной структуре позволяют сделать вывод о наличии при субмикроструктурной структуре напряжений первого рода (рис. 2, б). Методом низкочастотного внутреннего трения в работе [5] показано, что при изменении крупнозернистой рекристаллизованной структуры на указанную субмикроструктурную структуру понижается температура начала истинного зернограницного проскальзывания примерно с 300 до 423 К, и этот процесс интенсивно развивается. Аналогичная субмикроструктурная структура сформировалась при прокатке крупнозернистой меди.

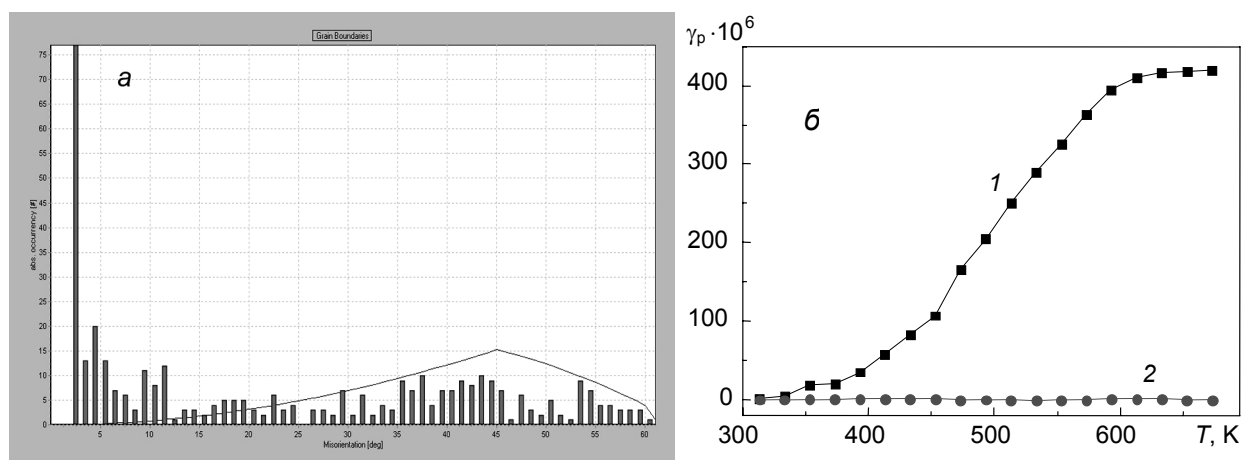


Рис. 2. Гистограмма распределения границ зерен по разориентациям (а) и самопроизвольная деформация меди (б) при субмикроструктурной (кр. 1) и крупнозернистой (кр. 2) структурах

Исследования микропластической деформации субмикроструктурной меди проводили при кручении образцов с квадратным поперечным сечением $1 \times 1 \text{ мм}^2$, ось образцов была параллельна направлению прокатки. Диаграмма деформации в координатах «напряжение сдвига τ – степень пластической деформации γ_p » была получена методом «нагрузки – разгрузки» на установке типа обратного крутильного маятника. Напряжение сдвига рассчитывали по упругой деформации образца с учетом температурной зависимости модуля сдвига.

Микропластическая деформация субмикроструктурной меди

При квазистатическом нагружении образец подвергается не только термическому, но и силовому воздействию. Вследствие этого влияние параметров субмикроструктурной структуры и температуры испытания на деформационное поведение и напряжение течения на стадии микропластической деформации может быть иным, чем температуры отжига. В настоящей работе про-

ведено сопоставительное исследование влияния температуры испытания меди при двух субмикроструктурных структурах. Одна субмикроструктурная структура была сформирована посредством интенсивной пластической деформации со ступенчатым понижением температуры с последующей прокаткой при 295 К со степенью сжатия около 86 %, вторая – при прокатке крупнозернистой рекристаллизованной меди при тех же деформационных и скоростных режимах прокатки, что и в первом случае.

При обеих субмикроструктурных структурах для исследования микропластической деформации использовали образцы длиной 55 мм с квадратным сечением $1 \times 1 \text{ мм}^2$. Ось образцов соответствовала направлению прокатки. При комнатной температуре при обоих способах формирования субмикроструктурных структур закономерности деформационного поведения одинаковые: микропластическая деформация развивается в две стадии (рис. 3). Двухстадийное развитие микропластической деформации сохраняется при температурах испытания вплоть до 473 К. На первой стадии связь между напряжением τ и степенью микропластической деформации γ_p линейная, а на второй – параболическая. Однако коэффициенты упрочнения на первой и второй стадиях, напряжение течения и напряжение перехода от первой ко второй стадии микропластической деформации (макроскопический предел упругости) сильно уменьшаются при повышении температуры испытания. В то же время степень микропластической деформации в момент завершения первой стадии, наоборот, увеличивается. При этом напряжение течения при температурах испытания ниже 373 К при субмикроструктурной структуре, сформированной при прокатке крупнозернистой меди, остается больше, чем при субмикроструктурной структуре, сформированной при прокатке субмикроструктурной меди. По-видимому, это является следствием разной величины внутренних напряжений, разного размера элементов зеренно-субзеренной структуры и разной доли большеугловых границ зерен.

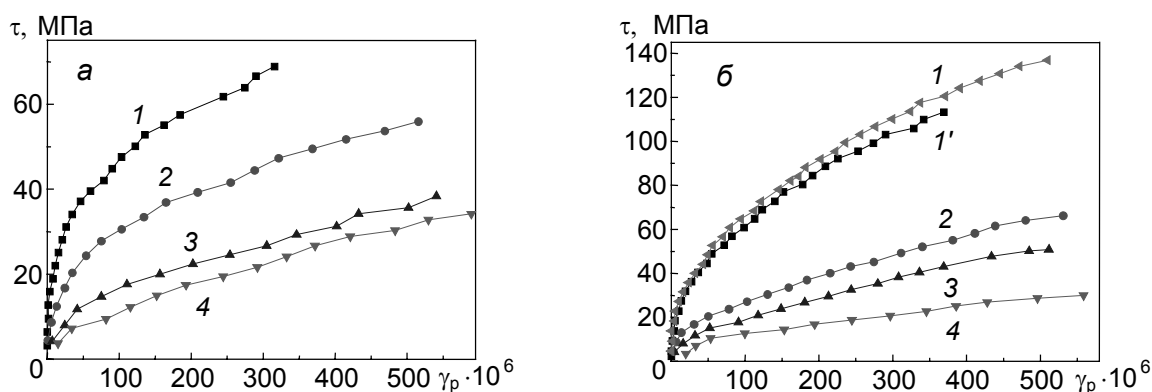


Рис. 3. Диаграммы деформации при кручении меди после *abc*-прессования с последующей холодной прокаткой (а) и крупнозернистой меди после холодной прокатки (б) при различных температурах испытаний, К: кр. 1 и 1' – 293, кр. 2 – 373, кр. 3 – 423 и кр. 4 – 473

Двухстадийное развитие микропластической деформации дает основание заключить, что при температурах деформации вплоть до 473 К последовательно реализуется пластическая деформация в отдельных зернах и в конгломерате зерен, то есть на микро- и мезомасштабном уровнях локализации пластической деформации.

Наконец, следует отметить, что при комнатной температуре напряжение течения на второй стадии микропластической деформации сильно зависит от зеренной структуры, при которой началась холодная прокатка. При исходной крупнозернистой структуре оно значительно больше, чем при субмикроструктурной структуре, сформированной при *abc*-прессовании, однако при этом при температурах ниже 370 К меньше термическая стабильность структуры и напряжения течения.

При деформации кручением меди с обеими субмикроструктурными структурами, сформированными при холодной прокатке, установлено, что при температурах вплоть до 473 К деформационное поведение в области микропластической деформации не изменяется – микропластическая деформация протекает в две стадии. Сильное изменение характеристик микропластической деформации при повышении температуры является следствием низкой термической стабильности

структуры с сохранением последовательности локализации пластической деформации на микро- и мезомасштабном уровнях. Даже при сильном уменьшении внутренних напряжений и повышении интенсивности истинного зернограницного проскальзывания сохраняется двухстадийное развитие микропластической деформации.

Следует отметить, что отжиг образцов при 353 К после холодной прокатки не повлиял на деформационное поведение на стадии микропластической деформации при комнатной температуре и привел лишь к небольшому уменьшению напряжения течения (рис. 3, б, диаграммы деформации субмикроструктурной меди до (кривая *I*) и после отжига (кривая *I'*)). Это уменьшение напряжения течения может быть следствием перераспределения дислокаций с уменьшением их плотности, а также уменьшением внутренних напряжений. Несмотря на то, что при температурах выше 373 К увеличивается интенсивность процессов возврата при обеих субмикроструктурных структурах, температурная зависимость напряжения течения не усиливается (таблица).

Температурная зависимость напряжения течения τ (МПа) субмикроструктурной меди

Температура деформации, К	295	373	423	473
Прокатка крупнозернистой меди	104	48	37	21
Прокатка меди после <i>abc</i> -прессования	67	45	26	22

В то же время при температурах ниже 373 К у прокатанной крупнозернистой меди температурная зависимость напряжения течения выражена значительно сильнее, чем у меди, прокатанной после *abc*-прессования. Вероятно, это является следствием разного вклада в напряжение течения субструктурного упрочнения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Валиев Р.З., Александров И.А. Наноструктурные материалы, полученные интенсивной пластической деформацией. – М.: Логос, 2000. – 272 с.
2. Колобов Ю.Р., Валиев Р.З., Грабовецкая Г.П. и др. Зернограницная диффузия и свойства наноструктурных материалов. – Новосибирск: Наука, 2001. – 232 с.
3. Носкова Н.И., Мулюков Р.Р. Субмикроструктурные и нанокристаллические металлы и сплавы. – Екатеринбург: УрО РАН, 2003. – 279 с.
4. Валиев Р.З., Рааб Г.И., Гундеров Д.В. и др. // Нанотехника. – 2006. – № 2. – С. 32-43.
5. Дударев Е.Ф., Почивалова Г.П., Табаченко А.Н. и др. // Вестник Тамбовского университета. – 2016. – Т. 21. – Вып. 3. – С. 978–981.

¹ Национальный исследовательский Томский государственный университет,
г. Томск, Россия

Поступила в редакцию 20.07.16.

² Томский государственный архитектурно-строительный университет,
г. Томск, Россия

Дударев Евгений Федорович, д.ф.-м.н., профессор, гл. науч. сотр. лаб. физики неупругости материалов,
e-mail: dudarev@spti.tsu.ru;

Почивалова Галина Прокофьевна, к.ф.-м.н., ведущ. инженер лаб. физики неупругости материалов;

Табаченко Анатолий Никитович, к.ф.-м.н., ведущ. науч. сотр. лаб. металлографии;

Малеткина Татьяна Юрьевна, к.ф.-м.н., доцент каф. инновационных технологий;

Скоцырский Анатолий Брониславович, инженер-исследователь лаб. металлографии;

Осипов Денис Андреевич, магистрант.