

Юечэн Дун, И. В. Александров, Дж. Т. Ванг

ВЫСОКОСКОРОСТНОЕ ДЕФОРМАЦИОННОЕ ПОВЕДЕНИЕ УЛЬТРАМЕЛКОЗЕРНИСТОЙ МЕДИ

Исследовано высокоскоростное деформационное поведение ультрамелкозернистой (УМЗ) меди, полученной методом равноканально-углового прессования. Динамические испытания проведены с использованием разрезного стержня Гопкинсона. Установлено, что предел текучести УМЗ меди при динамических испытаниях со скоростью деформации 1500 с^{-1} равен 551 МПа , что на 222 МПа превышает предел текучести меди в исходном отожженном (ОТ) состоянии. В то же время предел текучести УМЗ состояния меди при сравнительных квазистатических испытаниях на сжатие равен всего лишь 432 МПа . Проведенные динамические испытания указывают на повышенную скоростную чувствительность напряжения течения УМЗ меди по сравнению с таковой, характерной для ее исходного ОТ состояния. При этом коэффициент скоростной чувствительности напряжения течения m в УМЗ состоянии оказался равным $0,073$, а в случае ОТ состояния $0,047$. В УМЗ микроструктуре после динамического нагружения наблюдаются признаки динамической рекристаллизации и большое количество дислокаций. При этом отсутствие адиабатических полос сдвига указывает на то, что УМЗ медь при динамическом нагружении может разрушаться пластически. *Ультрамелкозернистая медь; равноканально-угловое прессование; динамическое механическое поведение; разрезной стержень Гопкинсона*

ВВЕДЕНИЕ

Как известно, скорость деформации является одним из важных параметров, определяющих деформационное поведение металлических материалов. Первые исследования влияния скорости деформации на деформационное поведение чистой меди при уменьшении размера зерна было проведено Саггер и др. [1]. Было показано, что увеличение скорости деформации приводит к росту как предела текучести, так и коэффициента скоростной чувствительности напряжения течения m с уменьшением размера зерна. Однако отметим, что проведенные исследования фокусировались на относительно крупных зернах с размером не менее 12 мкм .

Последние годы характеризуются широким применением методов интенсивной пластической деформации (ИПД), в том числе метода равноканально-углового прессования (РКУП), для формирования объемных ультрамелкозернистых (УМЗ) наноструктурных состояний в различных металлических материалах [2, 3]. Метод РКУП является наиболее распространенным методом получения объемных заготовок с УМЗ структурой. При этом известно, что характер формирующихся УМЗ структур зависит от параметров РКУП, важнейшим из которых является число проходов. Увеличение числа проходов при РКУП обеспечивает измельчение микроструктуры исходного крупнокристаллического состояния. Первых четырех проходов, как правило, достаточно для формирования УМЗ структуры. При дальнейшем увеличении

числа проходов происходит совершенствование структуры границ зерен, растет доля высокоугловых границ зерен за счет малоугловых границ зерен [2]. При этом размер зерен практически не изменяется. Проведенные довольно многочисленные исследования свидетельствуют о том, что УМЗ металлические материалы характеризуются высокой прочностью и достаточной пластичностью при квазистатических механических испытаниях [2–7]. В то же время динамическое деформационное поведение УМЗ металлических материалов до настоящего времени исследовано в значительно меньшей степени.

Анализ деформационного поведения и оценка коэффициента скоростной чувствительности напряжения течения m при динамических испытаниях методом сжатия применительно к УМЗ состояниям Cu , Ni и сплава Al-4Cu-0,5Zr в сравнении с соответствующими крупнокристаллическими (КК) аналогами был выполнен в [4]. Оказалось, что для всех указанных металлических материалов в УМЗ состоянии при снижении температуры исследований (от комнатной до криогенной) и повышении скорости деформации (от $0,001 \text{ с}^{-1}$ до $\sim 4500 \text{ с}^{-1}$) характерно увеличение напряжения течения и коэффициента скоростной чувствительности m по сравнению с соответствующими отожженными КК состояниями. Авторы считают, что обнаруженные закономерности связаны с особенностями микроструктуры и малым размером зерен в УМЗ металлических материалах, полученных методом РКУП. В то же время характер эволюции микроструктуры при динамической деформации не исследовался.

Отметим, что увеличение коэффициента скоростной чувствительности напряжения течения m в чистой меди с 0,007 до 0,023 происходит также и при увеличении числа проходов РКУП от 1 до 12 [1]. При этом, как уже указывалось выше, происходит измельчение микроstructures вплоть до формирования УМЗ состояния [1]. Таким образом, не только увеличение скорости деформации, но и увеличение числа проходов РКУП (измельчение микроstructures) могут способствовать более высокой скоростной чувствительности напряжения течения. Авторы [8] увеличение коэффициента скоростной чувствительности напряжения течения m объясняют значительным уменьшением термически активируемого объема в ГЦК металлах с очень мелким размером зерен.

Kim и другие [6] исследовали сопротивление разрушению при динамической деформации сдвигом УМЗ меди, полученной методом РКУП и обладающей средним размером зерен ~ 300 – 400 нм. В образце, подвергнутом восьми проходам РКУП, были обнаружены адиабатические полосы деформации сдвигом, ответственные за разрушение заготовок с микротрещинами и пустотами.

Mishra и другие [7] рассчитали значение температуры динамической рекристаллизации в ходе высокоскоростной деформации (2500 с^{-1}) УМЗ меди, которое оказалось равным 360 K при степени деформации $\varepsilon = 0,3$. Полученный результат указывает на термическую нестабильность микроstructures УМЗ меди при высокоскоростной деформации.

Проведенный обзор литературы указывает на противоречивость довольно немногочисленных результатов проведенных исследований высокоскоростного деформационного поведения УМЗ металлических материалов. В то же время интерес к данным материалам все больше возрастает в силу привлекательности их свойств [5–7]. Таким образом, систематическое изучение динамических свойств УМЗ металлических материалов является актуальной задачей.

Целью настоящих исследований является анализ высокоскоростного деформационного поведения УМЗ меди, полученной методом РКУП с различным числом проходов.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

В качестве материала в настоящих исследованиях использовалась холоднокатаная электротехническая медь (99,97 %). Для удаления остаточных внутренних упругих напряжений 1-го рода перед проведением РКУП заготовки меди

в состоянии поставки отжигали при температуре 875 K в течение 1 часа в вакууме.

РКУП осуществляли при комнатной температуре в оснастке с внутренним углом пересечения каналов $\Phi = 90^\circ$ и внешним углом пересечения каналов в оснастке $\Psi = 20^\circ$ (рис. 1). Использовали маршрут B_C , в ходе которого заготовки поворачивали между проходами на угол 90° относительно продольной оси [9]. Деформируемые заготовки в форме прямоугольного параллелепипеда имели размеры $12 \text{ мм} \times 12 \text{ мм} \times 100 \text{ мм}$. Скорость РКУП равнялась $0,1 \text{ мм/сек}$.

Степень деформации сдвига зависит от угла пересечения каналов Φ , Ψ и числа проходов N при РКУП в соответствии с уравнением [11]:

$$\varepsilon_N = N \left[\frac{2 \cot(\Phi/2 + \Psi/2) + \Psi \csc(\Phi/2 + \Psi/2)}{\sqrt{3}} \right]. \quad (1)$$

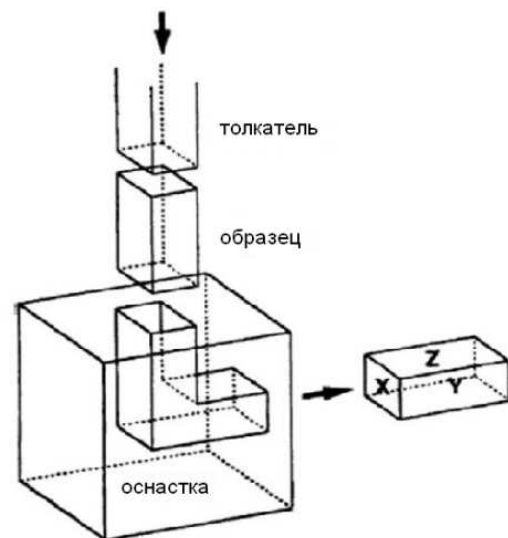


Рис. 1. Схема установки для РКУП [10]

Высокоскоростная деформация осуществлялась методом разрезного стержня Гопкинсона. Схематическое изображение установки для реализации данного метода представлена на рис. 2, а. Принцип метода заключается в том, что входной стержень ударяет под действием воздушной высокоатмосферной волны стержень из исследуемого материала. Часть импульса входного стержня передается исследуемой заготовке, а часть отражается вместе с ним. В исследуемой заготовке возникает деформационная волна. Предполагая, что образец деформируется однородно и напряжения в нем распределены равномерно, динамическое напряжение, динамическая деформация и скорость деформации могут быть вычислены с помощью уравнений:

$$\varepsilon_x = \begin{cases} \sigma_x = \frac{EA}{A_x} \varepsilon_t; \\ \varepsilon_x = -\frac{2C_o}{l_o} \int_0^t \varepsilon_t dt; \\ \varepsilon = -\frac{2C_o}{l_o} \varepsilon_r \end{cases} \quad (2)$$

соответственно. Здесь ε_r и ε_t являются отраженным и прошедшим пределами волны импульса (рис. 2, б), C_o , E , A обозначают продольную скорость упругих волн, модуль Юнга и площадь поперечного сечения входного и выходного упругих стержней, а l_o и A_x – толщина и площадь поперечного сечения образца.

Для динамических испытаний использовали цилиндрические образцы длиной 10 мм с диаметром основания 10 мм, вырезанные вдоль направления РКУП. Высокоскоростные испытания проводили при комнатной температуре со

скоростями деформации, равными 1000 с^{-1} , 1500 с^{-1} , 1700 с^{-1} .

Квазистатические испытания на сжатие проводили при комнатной температуре на испытательной машине Instron CSS-44100 со скоростью деформации $6 \times 10^{-4} \text{ с}^{-1}$. Использовали цилиндрические образцы высотой 10 мм и диаметром основания 10 мм, вырезанные вдоль направления РКУП.

Микроструктура исходной ОТ и деформированных заготовок изучалась методами оптической (ОМ) и просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ). Тонкие фольги для ПЭМ исследований изготавливали используя машину для электролитической полировки МТР-1А. Утонение производили в растворе, состоящем из азотной кислоты и метанола в соотношении 1:2. ПЭМ исследования проводили на микроскопе JEOL JEM-2100 при напряжении 200 кВ.

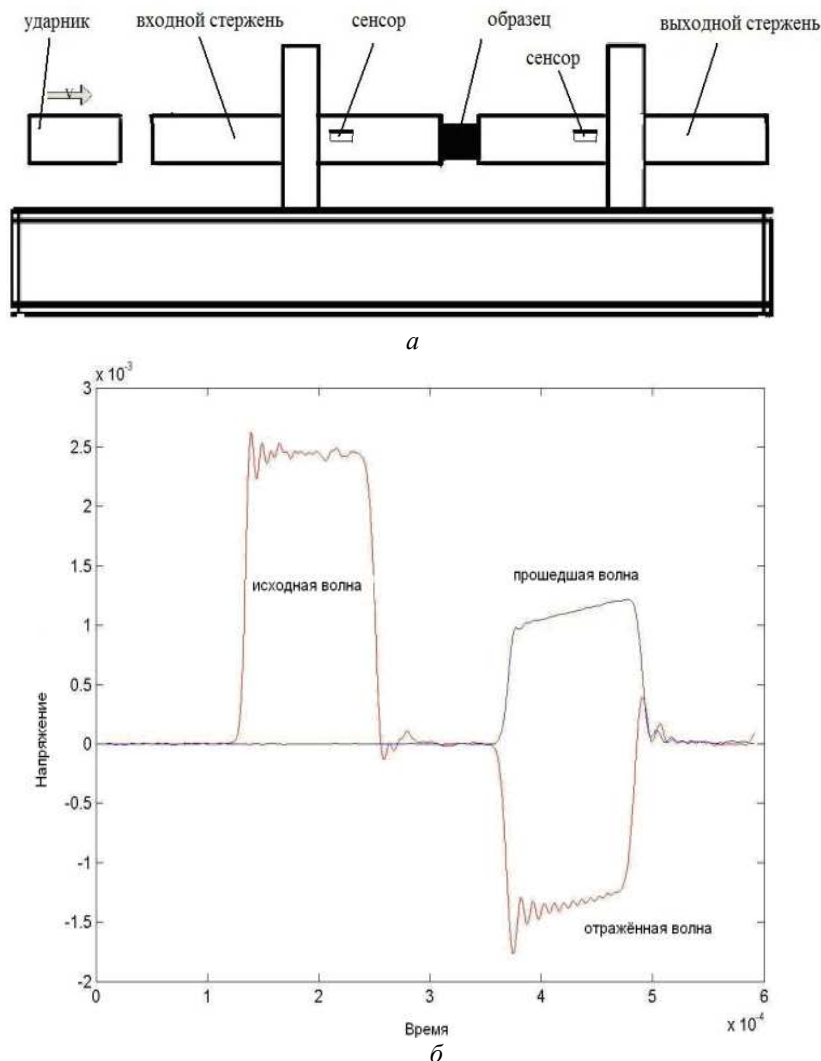


Рис. 2. Схематическое изображение установки для высокоскоростной деформации методом разрезного стержня Гопкинсона (а) и профиль исходной, прошедшей и отраженной волн (б)

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

На рис. 3 показаны полученные методом ОМ фотографии микроструктуры образцов как исходном ОТ состоянии, так и в состояниях после разного числа проходов РКУП. Размер зерен в исходном ОТ состоянии составил 50 мкм. В микроструктуре видны двойники отжига (рис. 3, *a*). После первого прохода РКУП зерна сильно вытянуты вдоль направления напряжения сдвига (рис. 3, *b*). В микроструктуре видны длинные узкие полосы с большим количеством дислокаций. После 4 и 8 проходов РКУП размер зерен слишком мал для их наблюдения методом ОМ. Однако, согласно многочисленным наблюдениям методом ПЭМ, размер зерен в соответствующих состояниях меди составляет несколько сотен нанометров. При этом состояние после 8 проходов РКУП характеризуется минимальным размером зерен, равным 200–300 нм [2, 4, 6, 7].

Пределу текучести соответствует напряжение, при котором в материале начинают интенсивно накапливаться остаточные (пластические) деформации. На практике началу пластической деформации в различных металлических материалах соответствует степень деформации, примерно равная 0,2 %. Соответствующее напряжение получило название условный предел текучести при степени деформации 0,2 %. На рис. 4 представлены кривые «истинное напряжение – истинная деформация» для меди, подвергнутой динамическому нагружению со скоростью деформации, равной 1500 с^{-1} , при комнатной температуре. Как видно, кривая для исходного ОТ состояния существенным образом отличается от таковых, характерных для состояний после РКУП с разным числом проходов. Исходному ОТ состоянию соответствует предел текучести, примерно равный 200 МПа. После четвертого прохода РКУП предел текучести вырос до 524 МПа, т.е. более чем в два с половиной раза. После восьмого прохода РКУП эта величина выросла до 551 МПа. Таким образом, при динамическом нагружении для состояния, полученного в результате максимального использованного числа проходов РКУП, равного 8, характерен предел текучести почти в два с половиной раза, превышающий таковой у исходного ОТ состояния. При этом рост предела текучести при увеличении числа проходов РКУП происходит с насыщением. Для меди во всех исследованных состояниях характерно низкое деформационное упрочнение.

На рис. 5 для сравнения представлены кривые «истинное напряжение – истинная деформация» для меди в исходном состоянии, а также в состояниях после 1, 2, 4, 6 и 8 проходов РКУП, полученные при квазистатической деформации сжатием со скоростью деформации, равной $6 \times 10^{-4} \text{ с}^{-1}$, при комнатной температуре. Как видно, деформационное поведение меди после РКУП с большим числом проходов, но при одной и той же степени деформации сжатием, характеризуется значительно более высокими напряжениями течения, чем в случае исходного ОТ состояния.

Кривая деформации исходного ОТ состояния меди при квазистатических испытаниях характеризуется деформационным упрочнением, его величина существенно больше, чем в случае динамического нагружения соответствующего состояния. Предел текучести достигает примерно 90 МПа. РКУП приводит к качественному изменению характера деформационных кривых, приведенных на рис. 4. Для кривых, соответствующих состояниям после РКУП с разным числом проходов, характерно отсутствие деформационного упрочнения. При этом, если после первого прохода РКУП предел текучести оказался равным 338 МПа, то после четвертого прохода РКУП он достиг 432 МПа и при последующем увеличении числа проходов практически не менялся.

Рост предела текучести при увеличении числа проходов РКУП при квазистатических испытаниях можно объяснить увеличением плотности дислокаций и измельчением зерен (см. рис. 3). Отсутствие деформационного упрочнения в случае образцов, подвергнутых РКУП, объясняется протеканием динамического возврата. Эти результаты и их трактовка хорошо согласуются с таковыми у других авторов [1, 4–6].

Результаты динамических испытаний весьма похожи на результаты квазистатических испытаний (рис. 4 и 5). Однако более подробный анализ указывает и на определенные особенности высокоскоростной деформации медных заготовок. Такие исследования были выполнены на примере меди в исходном ОТ состоянии и состоянии после четвертого прохода РКУП. В табл. 1 представлены фактические скорости и степени деформации сжатием, предел текучести, наличие трещин в подвергнутых высокоскоростной деформации образцах меди в отожженном состоянии и состояниях после четвертого и восьмого проходов РКУП.

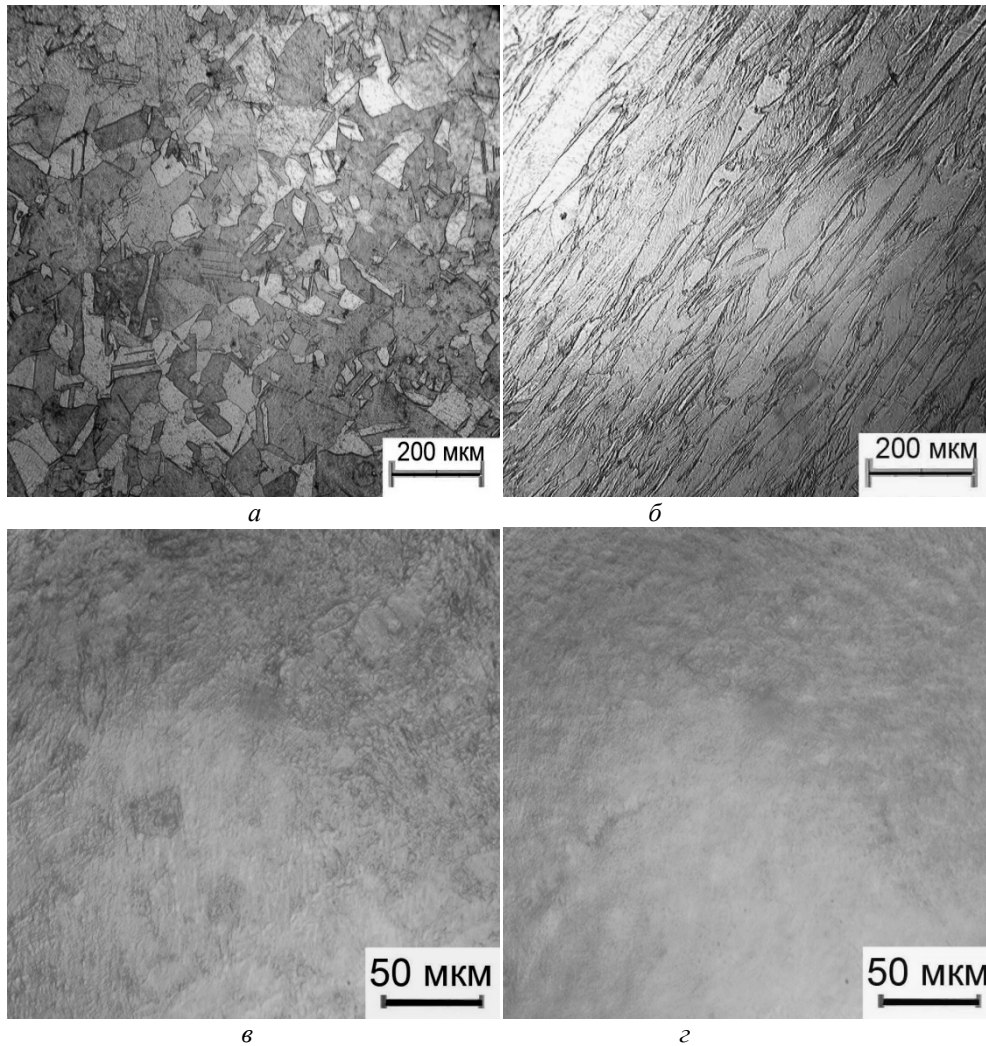


Рис. 3. Изображение микроструктуры меди в отожженном состоянии (а), после 1 прохода РКУП (б), 4 проходов РКУП (в), 8 проходов РКУП (г)

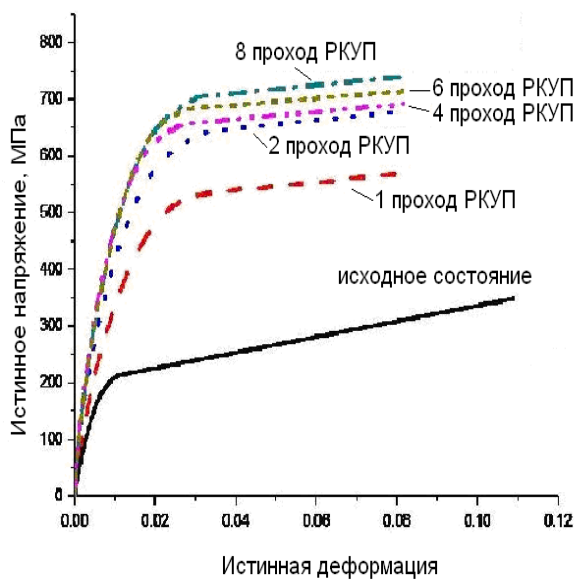


Рис. 4. Зависимости «истинное напряжение – истинная деформация». Динамическая деформация со скоростью 1500 с^{-1} . Комнатная температура

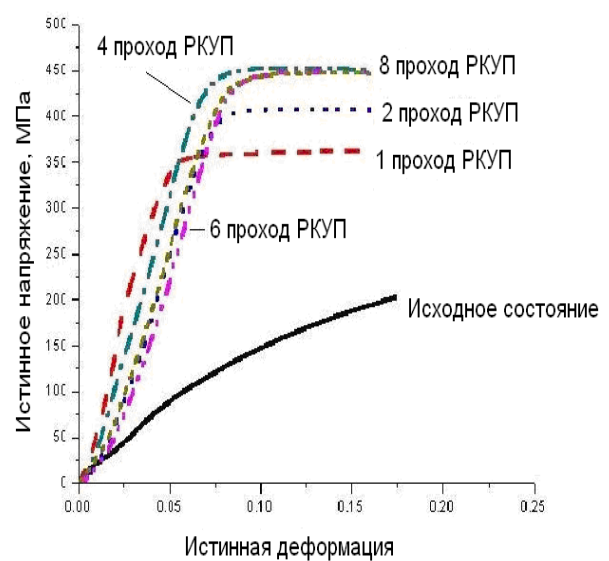


Рис. 5. Зависимости «истинное напряжение – истинная деформация». Скорость деформации $6 \times 10^{-4} \text{ с}^{-1}$. Комнатная температура

Таблица 1

Данные о подвергнутых высокоскоростной деформации образцах меди в исходном ОТ состоянии и состояниях после четвертого и восьмого проходов РКУП

| Состояние | Скорость деформации, с ⁻¹ | Предел текучести (МПа) | Степень деформации сжатием, % | Наличие трещин |
|-----------------------------|--------------------------------------|------------------------|-------------------------------|----------------|
| Исходное ОТ | 1142 | 217 | 20,9 | Отсутствуют |
| | 1437 | 222 | 21,5 | |
| | 1744 | 225 | 23,4 | |
| После четырех проходов РКУП | 1035 | 510 | 14,6 | Отсутствуют |
| | 1434 | 524 | 16,7 | |
| | 1734 | 533 | 19,1 | |
| После восьми проходов РКУП | 1030 | 549 | 18,1 | Отсутствуют |
| | 1431 | 551 | 19,3 | |
| | 1731 | 553 | 20,1 | |

Видно, что предел текучести растет с увеличением числа проходов РКУП при всех исследованных высоких скоростях деформации. Максимальное значение напряжения течения, равное 553 МПа, наблюдается в случае образца, подвергнутого восьми проходам РКУП, при максимальной скорости деформации, равной 1700 с⁻¹. В то же время анализ результатов должен производиться с учетом того факта, что строго зафиксировать скорость при высокоскоростной деформации невозможно. Степень деформации сжатием образцов также является функцией фактической скорости при высокоскоростной деформации. Из анализа результатов, приведенных в табл. 1 и на рис. 4, следует, что существует тенденция к росту степени деформации сжатием при росте скорости деформации. Этот процесс сопровождается небольшим увеличением предела текучести.

Коэффициент скоростной чувствительности, определенный с использованием соотношения $m = \delta \ln \sigma / \delta \ln \dot{\epsilon}$, является одним из ключевых параметров, полезных для понимания кинетики деформации в металлах с УМЗ или нанокристаллической микроструктурой. На рис. 7 представлены экспериментальные данные, иллюстрирующие зависимость коэффициента скоростной чувствительности напряжения течения m от размера зерна для меди и никеля. Эти результаты были получены в результате исследований, выполненных в настоящей статье и другими исследователями [5, 7–9, 12, 13]. Как видно, в целом наблюдается тенденция к росту коэффициента скоростной чувствительности напряжения течения m при уменьшении размера зерен. На это также указывают разные значения тангенса угла наклона кривых зависимости напряжения течения от скорости деформации (рис. 6) и соответствующие значения коэффи-

циента скоростной чувствительности напряжения течения m 0,047 и 0,073 для исходного ОТ состояния и состояния после 8 проходов РКУП соответственно. Полученные в настоящей работе значения коэффициента скоростной чувствительности оказались на уровне самых высоких значений, полученных другими исследователями. При этом тенденция повышения коэффициента скоростной чувствительности напряжения течения m по мере уменьшения размера зерна соответствует тенденции, обнаруженной другими указанными выше исследователями.

Анализ микроструктуры образцов, подвергнутых РКУП с большим числом проходов и последующей высокоскоростной деформации, указывает на отсутствие в микроструктуре адиабатических полос сдвига (рис. 8). Известно, что формирование адиабатических полос сдвига приводит к разрушению образцов [6, 7]. Таким образом, обнаруженное в настоящей работе отсутствие адиабатических полос сдвига благоприятно с точки зрения последующей пластической деформации и роста пластичности УМЗ образцов.

Как было показано выше, увеличение числа проходов РКУП сверх четвертого сопровождается замедлением роста напряжения течения при последующей высокоскоростной деформации. Такая закономерность характерна и для случая квазистатических испытаний аналогичных УМЗ образцов. Однако, если при квазистатических испытаниях наблюдается равновесие между деформационным упрочнением и динамическим возвратом, то в случае высокоскоростной деформации наблюдается равновесие между деформационным упрочнением и динамической рекристаллизацией. О протекании последней свидетельствует ПЭМ изображение, представленное на рис. 8.

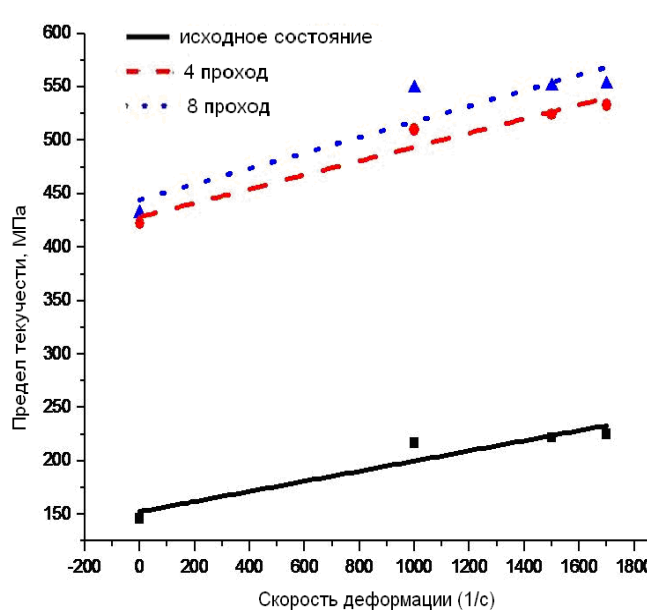


Рис. 6. Зависимости «предел текучести – скорость деформации» для разных состояний меди

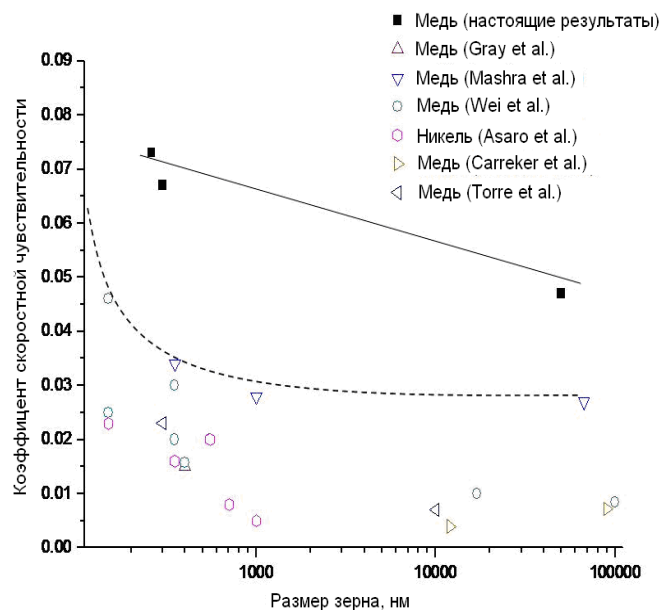
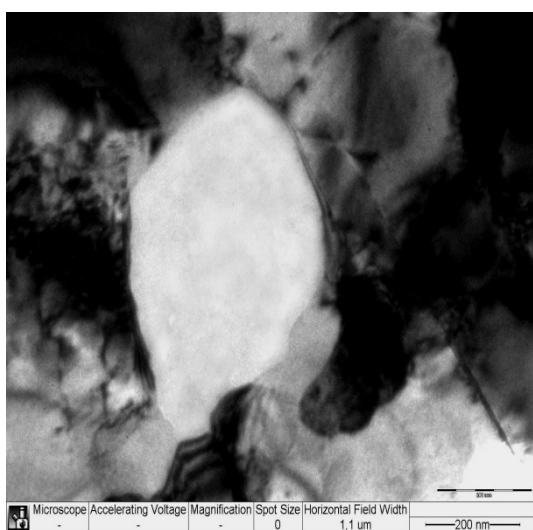


Рис. 7. Зависимости «коэффициент скоростной чувствительности напряжения течения m – размер зерна» для меди



a



b

Рис. 8. ПЭМ изображения микроструктуры образца, подвергнутого четырем проходам РКУП и последующей высокоскоростной деформации: (а) рекристаллизованное зерно, (б) дислокации

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Обнаружено значительное увеличение предела прочности меди в сформированном в результате 8 проходов РКУП УМЗ состоянии меди по сравнению с исходным ОТ состоянием. При этом при высокоскоростной деформации со скоростью деформации, равной 1500 с^{-1} , предел текучести равен 551 МПа, что существенно превышает предел текучести, характерный для ис-

ходного ОТ состояния и равный 222 МПа при соответствующей скорости деформации. В то же время в случае аналогичного УМЗ состояния при квазистатических испытаниях предел текучести оказался равен 432 МПа.

8 проходов РКУП медной заготовки привели к росту коэффициента скоростной чувствительности напряжения течения от 0,047 до 0,073.

В образцах УМЗ меди, подвергнутых высокоскоростной деформации, обнаружены следы динамической рекристаллизации.

В образцах УМЗ меди, подвергнутых высокоскоростной деформации, не обнаружено адиабатических полос сдвига, что свидетельствует о благоприятных условиях для протекания пластической деформации с сохранением пластичности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Carreker Jr R. P., Hibbard Jr W. R.** Tensile deformation of high-purity copper as a function of temperature, strain rate, and grain size // *Acta Metal.* 1953. Vol. 1. P. 654–655, 657–663.

2. **Valiev R. Z., Langdon T. G.** Principles of equal-channel angular pressing as a processing tool for grain refinement // *Prog. Mater. Sci.* 2006. Vol. 51. P. 881–981.

3. **Valiev R. Z., Islamgaliev R. K., Alexandrov I. V.** Bulk Nanostructured Materials from Severe Plastic Deformation // *Prog. Mater. Sci.* 2000. Vol. 45. P. 103–189.

4. Paradox of strength and ductility in metals processed by severe plastic deformation / R. Z. Valiev [et al.] // *J. Mater. Res.* 2002. Vol. 17. P. 5–8.

5. Influence of strain rate & temperature on the mechanical response of ultrafine-grained Cu, Ni, and Al-4Cu-0.5Zr / G. T. Gray III [et al.] // *Nanostructured Mater.* 1997. Vol. 9. P. 477–480.

6. Dynamic deformation and fracture behavior of ultra-fine-grained pure copper fabricated by equal channel angular pressing / Kim Yang Gon [et al.] // *Mater. Sci. Eng A.* 2008. Vol. 504. P. 163–168.

7. High-strain-rate response of ultra-fine-grained copper / A. Mishra [et al.] // *Acta Mater.* 2008. Vol. 56. P. 2770–2783.

8. **Torre F.H.D., Pereloma E.V., Davies C.H.J.** Strain hardening behaviour and deformation kinetics of Cu deformed by equal channel angular extrusion from 1 to 16 passes // *Acta Mater.* 2006. Vol. 54. P. 1135–1146.

9. The shearing characteristics associated with equal-channel angular pressing / M. Furukawa [et al.] // *Mater. Sci. Eng A.* 1998. Vol. 257. P. 328–332.

10. Influence of Pressing Speed on Microstructural Development in Equal-Channel Angular Pressing / P. B. Berbon [et al.] // *Metall Mater Trans.* 1998. Vol. 30A. P. 1989–1997.

11. **Valiev R. Z., Tsenev N. K.** Hot deformation of aluminum alloys (ed. By T.G. Langdon, H.D. Merchant, J.G. Morris, M.A. Zaidi). TMS. Warrendale, PA, 1991. P. 319.

12. Effect of nanocrystalline and ultrafine grain sizes on the strain rate sensitivity and activation volume: fcc versus bcc metals / Q. Wei [et al.] // *Mater. Sci. Eng A.* 2004. Vol. 381. P. 71–79.

13. **Asaro R. J., Suresh S.** Mechanistic models for the activation volume and rate sensitivity in metals with nanocrystalline grains and nano-scale twins // *Acta Mater.* 2005. Vol. 53. P. 3369–3382.

ОБ АВТОРАХ

Дун Юечэн, асп. каф. физики. Иссл. в обл. динамического поведения ультрамелкозернистой меди.

Александров Игорь Васильевич, проф., зав. каф. физики, науч. рук. науч.-образовательн. центра «Наноструктурные материалы и высокие технологии» при НИЧ УГАТУ, заслуж. деятель науки Республики Башкортостан. Дипл. физик (БГУ, 1976). Д-р физ.-мат. наук по физике твердого тела (ИФМ УрНЦ РАН, 1997). Иссл. в обл. экспериментального и компьютерного моделирования процессов физики интенсивной пластической деформации.

Ванг Джингтао, зам. декана факультета материаловедения науки и техники Нанкинск. ун-та науки и технологий. Д-р материаловедения, профессор. Иссл. в обл. получения, изучения структуры и свойств объемных наноструктурных материалов.