

Влияние температуры на деформационное поведение и эволюцию микроструктуры меди в различных структурных состояниях при динамическом нагружении

Дун Юечэн^{1,2,†}, Александров И.В.¹, Ситдигов В.Д.¹, Ванг Дж. Т.²

¹ФГБОУ Уфимский государственный авиационный технический университет, г. Уфа

²Нанкинский университет науки и технологий, г. Нанкин, Китай

[†] dongyuecheng@mail.ru

The effect of temperature on deformation behavior and evolution of microstructure in Cu in different structure states during dynamic deformation

Yuecheng Dong^{1,2}, I. V. Alexandrov¹, V. D. Sitdikov¹, J. T. Wang²

¹Ufa State Aviation Technical University, Ufa

²Nanjing University of Science and Technology, Nanjing, China

В настоящей работе представлены результаты исследования влияния температуры на динамическое поведение и эволюцию микроструктуры в отожженном крупнокристаллическом и полученном методом равноканального углового прессования ультрамелкозернистом состояниях меди.

Ключевые слова: высокоскоростная деформация, ультрамелкозернистая медь, динамическое нагружение

This work presents the results of the investigation of temperature effect on the dynamic behavior and microstructure evolution in an annealed coarse-grained state and in the ultrafine-grain state of Cu, obtained by the method of equal-channel angular pressing.

Key words: high strain-rate deformation, ultrafine-grained copper, dynamic loading

1. Введение

Деформационное поведение и характер эволюции микроструктуры при пластической деформации металлических материалов зависят от целого ряда параметров. К ним относятся, в первую очередь, размер зерен, температура и скорость пластической деформации [1-3].

Деформационное поведение и эволюция микроструктуры в ультрамелкозернистых (УМЗ) и наноструктурных (НС) металлических материалах, полученных методом интенсивной пластической деформации (ИПД), в частности, методом равноканального углового прессования (РКУП), хорошо исследованы при квазистатических механических испытаниях [3,4]. Однако, соответствующие исследования при динамическом нагружении весьма немногочисленны [5,6]. Еще менее исследовано влияние температуры высокоскоростной деформации на указанные процессы, представляющие как научный, так и практический интерес.

В настоящей статье представлены результаты экспериментальных исследований влияния температуры на динамическое деформационное поведение и эволюцию

микроструктуры меди в различных структурных состояниях.

2. Материал и методика эксперимента

В качестве материала для исследований использовалась холоднокатаная электротехническая медь. Для снятия остаточных внутренних упругих напряжений перед проведением РКУП и формирования крупнокристаллического (КК) состояния заготовки меди в состоянии поставки отжигали при температуре 873 К в течение 1 часа в вакууме.

Для формирования УМЗ состояния применяли РКУП. РКУП осуществляли при комнатной температуре в оснастке с внутренним углом пересечения каналов $\Phi=90^\circ$ и внешним углом пересечения каналов в оснастке $\Psi=20^\circ$. При этом использовали маршрут B_c , в соответствии с которым заготовки поворачивали между проходами на угол 90° относительно продольной оси [7]. Деформируемые заготовки в форме прямоугольного параллелепипеда имели размеры $12 \times 12 \times 100$ мм³. Скорость РКУП равнялась 0,1 мм/с.

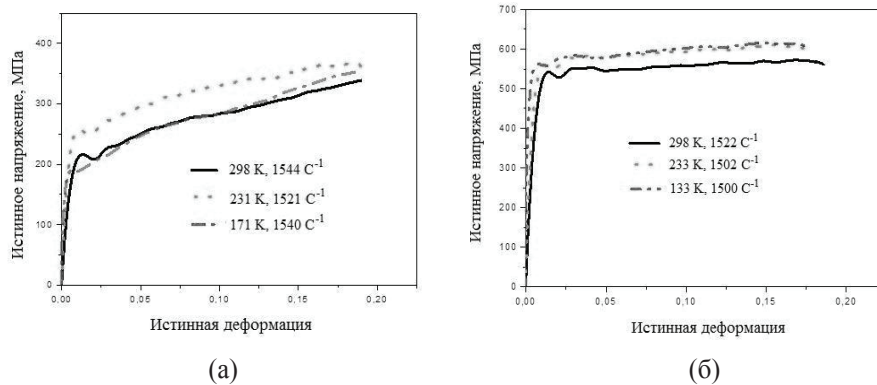


Рис. 1. Истинные деформационные кривые меди в КК состоянии (а) и в УМЗ состоянии (б).

Динамическому нагружению подвергали цилиндрические образцы длиной 10 мм с диаметром основания 10 мм, вырезанные вдоль оси исходных КК заготовок и направления РКУП. Высокоскоростные механические испытания проводили с помощью разрезного стержня Гопкинсона со скоростью деформации, равной примерно 1500 с^{-1} , при температурах 171 К, 231 К и 298 К.

Микроструктура КК и УМЗ заготовок, как до, так и после высокоскоростной деформации (ВСД), изучалась методами оптической микроскопии (ОМ) и просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ).

3. Результаты и их обсуждение

На рис. 1а представлены динамические деформационные кривые «истинное напряжение – истинная деформация» меди в КК состоянии для разных температур. Оказалось, что при комнатной температуре предел текучести КК меди при ВСД равен 225 МПа. Для данного состояния характерно высокое деформационное упрочнение. При понижении температуры до 231 К предел текучести вырос до 250 МПа. Однако, дальнейшее понижение температуры до 171 К привело к уменьшению предела текучести до 191 МПа, что значительно меньше, чем при комнатной температуре. Скорость деформационного упрочнения при 171 К выше чем при других температурах (рис. 1а).

В [8] представлены результаты исследования деформационного поведения алюминия в КК и УМЗ состояниях при разных скоростях (в диапазоне от 10^{-3} с^{-1} до $5 \cdot 10^3 \text{ с}^{-1}$) при комнатной температуре и скорости $1,8 \cdot 10^3 \text{ с}^{-1}$ при температуре 171 К. Авторами было показано, что КК состоянию соответствует зуб текучести при низкотемпературной ВСД. Такового не наблюдалось при разных скоростях деформации при комнатной температуре. Оказалось, что предел текучести КК алюминия слабо меняется при изменении как скорости, так и температуры деформации. Однако, авторы не дали объяснения данным наблюдениям.

Известно, что критическое напряжение сдвига в меди значительно увеличивается при понижении температуры в связи с затруднением скольжения дислокаций [9]. С другой стороны, пороговое критическое напряжение двойникования в меди понижается с понижением температуры в ГЦК-металлах [10]. В связи с этим, мож-

но предположить, что при понижении температуры ВСД возможен переход от скольжения дислокаций к двойникованию в КК меди в интервале температур 171 К – 231 К, что и объясняет немонотонное изменение предела текучести, характерное для данного состояния меди.

ПЭМ изображения микроструктуры КК меди, подвергнутой ВСД при разных температурах, представлены на рис. 3. Видно, что ВСД при комнатной температуре привела к образованию вытянутых субзерен со средним размером 600 нм (рис. 3а). По сравнению с исходным состоянием (рис. 2а), характеризующимся однородной структурой с четкими и прямыми границами зерен, после ВСД плотность дислокаций сильно увеличивается (рис. 3б). В то же время, в микроструктуре появились многочисленные деформационные двойники (Рис. 3 в, г), указывающие на реализацию пластической деформации двойникованием при ВСД КК меди.

С другой стороны, видно, что при низкотемпературной ВСД КК меди зерна вытянулись сильнее, чем при ВСД при комнатной температуре. При этом, при низкотемпературной ВСД сформировалась полоса сдвига (рис. 3д), что указывает на преобладание процессов двойникования над скольжением при ВСД, реализованной при 171 К.

Степени деформации сжатия в случае ВСД КК меди при температурах 298 К и 171 К примерно одинаковы и равны 23%. Однако, сформировавшиеся микроструктуры разные. Это свидетельствует в пользу того, что механизмы пластической деформации в данных состояниях отличались.

При низкотемпературной ВСД границы субзерен более тонкие, и им присущ более резкий контраст (рис. 3 д,

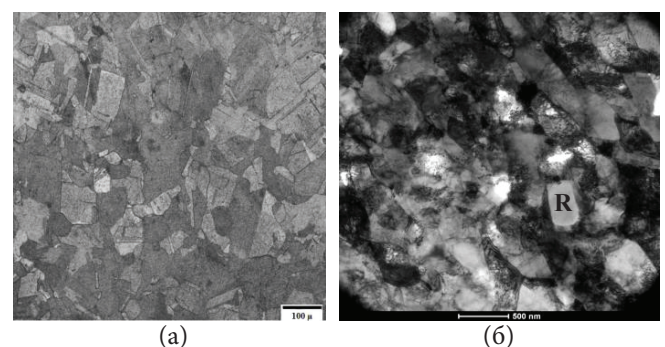


Рис. 2. Изображение микроструктуры меди в КК состоянии (ОМ) после отжига (а) и в УМЗ состоянии (ПЭМ) после 8 процентов РКУП.

е), чем в состоянии после ВСД при комнатной температуре (рис. 3 а, б). Низкотемпературная ВСД способствует формированию более мелких субзерен с более высокими разориентировками. Четкие прямые границы зерен и их стыки наблюдаются в соответствующей структуре, представленной на рис. 3 з. Движение дислокаций блокируется в высокоугловых границах. В то же время, микроструктура также характеризуется появлением деформационных двойников (Рис. 3 ж).

На рис. 1 б представлены динамические кривые «истинное напряжение – истинная деформация» меди в УМЗ состоянии при разных температурах. Как видно, предел текучести меди в УМЗ состоянии достигает 550 МПа при комнатной температуре. При понижении температуры предел текучести увеличивается и достигает 566 МПа. В то же время, деформационное упрочнение для всех состояний в указанном интервале температур очень мало. Это связано с динамическим возвратом и рекристаллизацией, влияющими на плотность дислокаций в УМЗ состоянии.

На рис. 2 б представлено изображение ПЭМ состояния меди после 8 проходов РКУП. Видно, что в результате РКУП в микроструктуре сформировались равноосные зерна с четкими границами. Однако в некоторых областях можно наблюдать неоднородную структуру. В то же время, в микроструктуре обнаруживаются рекристаллизованные зерна с размером 360 нм (метка R на рис. 2 б), которые свободны от дислокаций и обладают четкими прямолинейными границами.

На рис. 4 (а-в) представлены ПЭМ изображения УМЗ меди, подвергнутой ВСД при комнатной температуре. Если при ВСД КК состояния размер зерен меняется сильно, то в результате ВСД УМЗ меди он меняется слабо. В то же время, при ВСД в УМЗ структуре появилась рекристаллизованные зерна со средним размером 435

нм (рис. 4 б). Это свидетельствует о том, что при ВСД УМЗ меди происходит повышение температуры, что способствует протеканию динамической рекристаллизации. Это заключение соответствует наблюдениям других авторов [11, 12].

В образцах УМЗ меди после ВСД при комнатной температуре наблюдаются многочисленные деформационные двойники (рис. 4, в), имеющие толщину 8 – 50 нм и длину в несколько сотен нанометров. Недавно Liao [13] и Huang [14] наблюдали двойникование в УМЗ/НС меди при кручении под высоким давлением и РКУП. Авторы связали этот процесс с испусканием частичных дислокаций границами зерен. По-видимому, ВСД УМЗ меди активизирует этот процесс.

На рис. 4 (г-ж) представлены ПЭМ изображения УМЗ меди, подвергнутой ВСД при низкой температуре, равной 171 К. Видно, что в результате ВСД размер зерен немного уменьшился. Известно, что низкая температура затрудняет процессы динамического возврата. Таким образом, больше дислокаций сохраняется в структуре. В то же время, в микроструктуре наблюдаются деформационные двойники (рис. 4 д). Кроме того, для указанной микроструктуры также характерно наличие дислокационных ячеек, разделенных дислокационными стенками (рис. 4 ж).

4. Выводы

1. При понижении температуры ВСД предел текучести КК меди сначала увеличивается, а затем уменьшается. Это наблюдение можно объяснить изменением преобладающего механизма деформации от скольжения к двойникованию. ВСД КК состояния характеризуется значительным измельчением микроструктуры.

2. При понижении температуры ВСД предел текучести УМЗ меди монотонно увеличивается с понижением

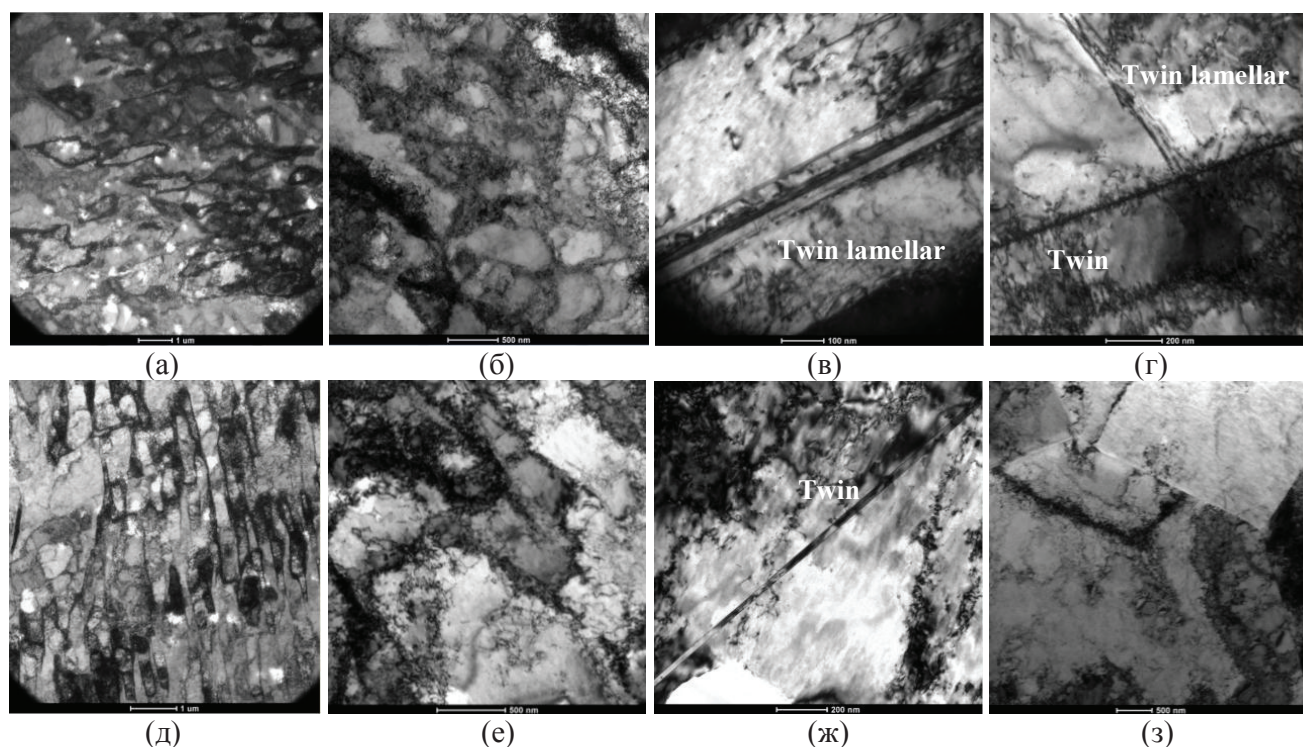


Рис. 3. ПЭМ изображения КК меди, подвергнутой ВСД при комнатной температуре (а-г) и при температуре $T=171$ К (д-ж).

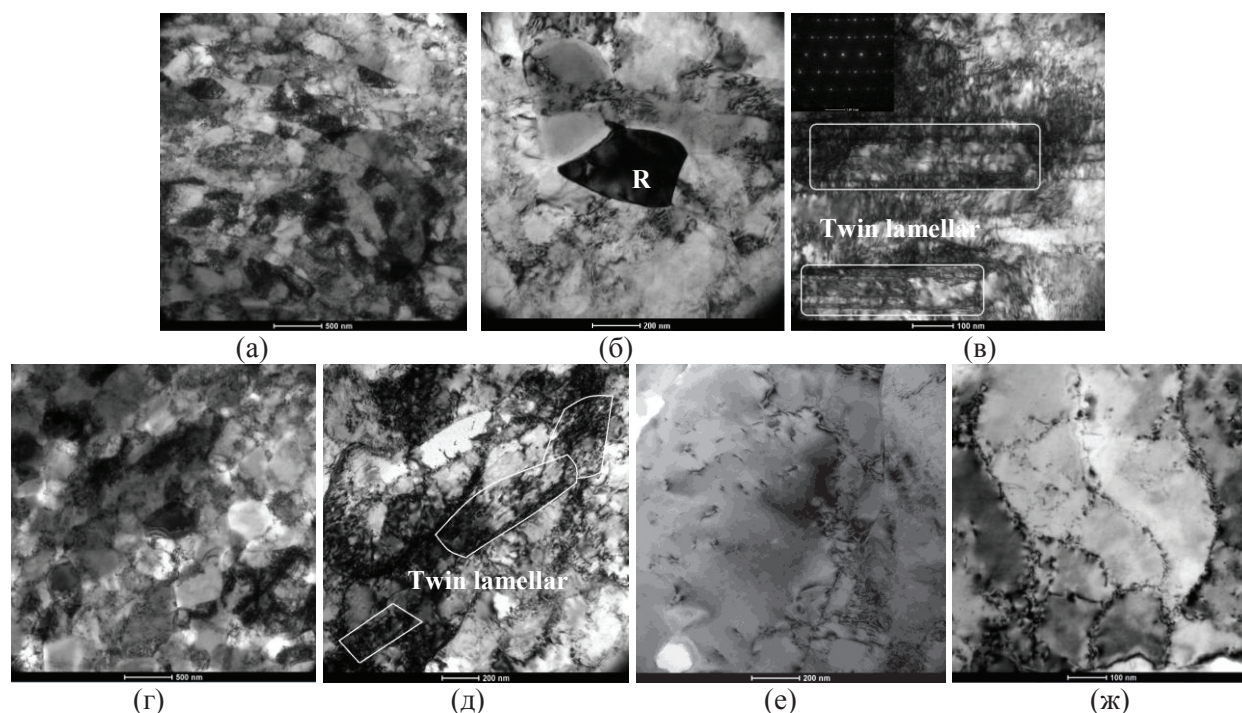


Рис. 4. ПЭМ изображения УМЗ меди, подвергнутой ВСД при комнатной температуре (а-в) и при температуре $T=171$ К (г-ж).

температуры. В микроструктуре появляются многочисленные деформационные двойники. В то же время, в микроструктуре наблюдаются признаки протекания динамических возврата и рекристаллизации. ВСД УМЗ состояния не приводит к значительным изменениям размера зерен, что, по-видимому, связано с наличием большого количества высокоугловых границ зерен, затрудняющих как скольжение дислокаций, так и деформационное двойникование.

Авторы выражают благодарность за финансовую поддержку проекту РФФИ № 12-02-31025 мол_а.

Литература

1. Meyers M.A., Mishra A., Benson D.J. Mechanical Properties of Nanostructured Materials. Prog. Mater. Sci., 2006, V. 51, P. 427-556.
2. Christian J.W., Mahajan S. Deformation twinning, Prog. Mater. Sci., 1995, V. 39, P. 1-157.
3. Valiev R.Z., Langdon T.G. Principles of equal-channel angular pressing as a processing tool for grain refinement. Prog. Mater. Sci., 2006, V. 51, P. 881-981.
4. Valiev R.Z., Islamgaliev R.K., Alexandrov I.V. Bulk nanostructured materials from severe plastic deformation. Prog. Mater. Sci., 2000, V. 45, P. 103-189.
5. Gray III G.T., Lowe T.C., Cady C.M., Valiev R.Z., Aleksandrov I.V. Influence of strain rate & temperature on the mechanical response of ultra-fine-grained Cu, Ni, and Al-4Cu-0.5Zr, Nanostructured Mater. 1997, V. 9, P. 477-480.
6. Suo T., Li Y., Xie K., Zhao F., Zhang K., Deng Q. Experimental investigation on strain rate sensitivity of ultra-fine grained copper at elevated temperatures. Mech. Mater., 2011, V. 43, P. 111-118.
7. Furukawa M., Iwahashi Y., Horita Z., Nemoto M., Langdon T.G. The shearing characteristics associated with equal-channel angular pressing. Mater. Sci. Eng., 1998, V. A.257, P. 328-332.
8. Jari Kokkonen, Veli-Tapani Kuokkala, Lech Olejnik, Andrzej Rosochowski // Proceedings of the XIth International Congress and Exposition. June 2-5, 2008 Orlando, Florida USA.
9. Meyers M.A., Vohringer O., Lubarda V.A. The Onset of Twinning: A Constitutive Description. Acta Mater., 2001, V. 49, P. 4025-4039.
10. Thornton P.R., Mitchell T. E. Deformation twinning in alloys at low temperatures. Phil. Mag., 1962, V. 7, P. 361-375.
11. Mishra A., Martin M., Thadhani N.N., Kad B.K., Kenik E.A., Meyers M.A., High-strain-rate response of ultra-fine-grained copper. Acta Mater., 2008, V. 56, P. 2770-2783.
12. Dong Y.C., Zhang Y., Alexandrov I.V., Wang J.T. Effect of high strain rate processing on strength and ductility of ultrafine-grained Cu processed by equal channel angular pressing. Rev. Adv. Mater. Sci., 2012, V. 31, 116-122.
13. Liao X.Z., Zhao Y.H., Srinivasan S.G., Zhu Y.T., Valiev R.Z., Gunderov D.V. Deformation twinning in nanocrystalline copper at room temperature and low strain rate. Phys. Rev. Lett., 2004, V. 84, P. 592-594.
14. Huang C.X., Wang K., Wu S.D., Zhang Z.F., Li G.Y., Li S.X. Deformation twinning in polycrystalline copper at room temperature and low strain rate. Acta Mater., 2006, V. 54, P. 655-665.