

Ирина Вячеславовна Хомская^{1*}

¹Институт физики металлов им. М.Н. Михеева УрО РАН, Екатеринбург, Россия

**khomskaia@imp.uran.ru*

ФАЗОВЫЕ ПРЕВРАЩЕНИЯ И СВОЙСТВА СПЛАВОВ МЕДИ ПРИ ИНТЕНСИВНЫХ УДАРНО-ВОЛНОВЫХ И ДЕФОРМАЦИОННЫХ ВОЗДЕЙСТВИЯХ

Выявлена детальная картина изменения фазовых и структурных состояний в сплавах на основе меди при экстремальных ударно-волновых и деформационных воздействиях, и установлены закономерности формирования субмикроструктурных структур и свойств сплавов при комбинированном воздействии ударно-волновой деформации сжатия, высокоскоростной деформации сдвига и температуры.

Ключевые слова: сплавы меди, ударно-волновое нагружение, высокоскоростное прессование, фазовые превращения, динамические свойства

Irina V. Khomskaia

PHASE TRANSFORMATIONS AND PROPERTIES OF COPPER ALLOYS UNDER INTENSE SHOCK-WAVE AND DEFORMATION EFFECTS

A detailed picture of the change in phase and structural states in copper-based alloys under extreme shock-wave and deformation effects has been clarified, and patterns of formation of submicrocrystalline structures and properties of alloys under the combined effect of shock-wave compression deformation, high-speed shear deformation and temperature have been established.

Key words: copper alloys, shock-wave loading, high-speed pressing, phase transformations, dynamic properties

Современные инновационные технологии предусматривают совершенствование деформационных способов получения и обработки новых конструкционных материалов, в том числе субмикроструктурных (СМК) и нанокристаллических (НК) с высокими свойствами [1-4]. Для СМК- и НК-материалов, полученных методами интенсивной пластической деформации (ИПД), большое значение имеет формирование неравновесной дефектной микроструктуры, содержащей малоугловые и большеугловые границы зерен в различном процентном соотношении, а также дефектных структур внутри зерен-субзерен разной степени совершенства [1,2]. В последние годы становятся актуальными исследования механических свойств СМК- и НК-металлов и сплавов, полученных различными методами ИПД, при экстремальных воздействиях, в том числе субмикросекундной прочности в условиях ударного сжатия [5-7]. В то же время использование взрывных

технологий открывает возможность получения объемных СМК- и НК-материалов за счет импульсных источников энергии, без применения энергоемкого прессового оборудования. Метод динамического канально-углового прессования – ДКУП [8-10] является одним из таких способов и представляет собой высокоскоростной (10^5 с^{-1}) вариант известного квазистатического метода ИПД - РКУП [1]. Установлено [9], что деформация простого сдвига, которая формирует структуру при РКУП [1], в случае ДКУП является высокоскоростной, кроме того, на образец действует ударно-волновая деформация сжатия, создающая добавочный источник деформационного наклепа, и температура. Изучение микроструктуры и свойств металлов и сплавов с НК- и СМК-структурами, полученными методом ДКУП с использованием технологии нагружения ударными волнами [9-12], а также выявление особенностей деформационного поведения таких структур в экстремальных условиях [6-9] позволяет получить новые данные о процессе высокоскоростного деформирования и характере откольного разрушения СМК-материалов с учетом структурных факторов.

Исследования механических свойств материалов в субмикросекундном диапазоне длительностей нагрузки основаны на том факте, что процессы упругопластического деформирования и разрушения сопряжены с изменением сжимаемости материала и проявляются в структуре плоских волн сжатия и разряжения [5-7]. Динамическая (откольная) прочность материалов исследуется путем регистрации так называемых “откольных явлений” при отражении импульсов одномерного ударного сжатия от свободной поверхности тела [5]. Для получения информации о количественных характеристиках процессов высокоскоростного деформирования и разрушения, анализируемых меди и сплавов, были проведены три серии экспериментов. Испытания проводились в условиях ударного сжатия с давлением 4.7–7.0 ГПа и скоростью деформации $(0.9–3.2) \times 10^5 \text{ с}^{-1}$ с непрерывной регистрацией профилей скорости свободной поверхности образцов $ifs(t)$ при помощи лазерного доплеровского измерителя скорости VISAR, имеющего временное разрешение $\sim 1 \text{ нс}$ [5]. Точность измерения скорости свободной поверхности образцов составляла $\pm 3 \text{ м/с}$. На основании анализа полученных волновых профилей были определены параметры ударно-волнового нагружения: давление ударного сжатия, максимальная скорость свободной поверхности, скорость деформации перед откольным разрушением и др.; а также рассчитаны характеристики прочности образцов: динамический предел упругости, динамический предел текучести и откольная прочность.

На примере низко- и микролегированных дисперсионно-твердеющих сплавов на основе систем и Cu-Cr, Cu-Zr и Cu-Cr-Zr показано, что материалы с СМК-структурами, полученными ДКУП, в условиях ударного сжатия с давлением до 7.0 ГПа и скоростью деформации 10^5 с^{-1} демонстрируют увеличение динамического предела упругости и динамического предела текучести в 1.8–2.8 раза, по сравнению с исходным крупнокристаллическим (КК) состоянием. Это связано с образованием в исследованных сплавах при ДКУП специфической неравновесной и дефектной СМК структуры в

результате высокоскоростных процессов фрагментации, динамической полигонизации и частичного дисперсионного упрочнения, связанного с выделением наноразмерных частиц вторых фаз [10-12]. Последующие отжиги при 400 и 450°C, сопровождающиеся дальнейшим распадом пересыщенного α -твердого раствора меди с выделением наноразмерных частиц Cu_5Zr и/или Cr, позволяют увеличить характеристики упруго-пластического перехода в 3.0 и 3.7 раза и повысить откольную прочность. Увеличение откольной прочности связано с формированием при ДКУП СМК структуры, состоящей из сильно разориентированных дисперсных зерен с преимущественно неравновесными большеугловыми границами, что способствует затруднению роста микротрещин и замедлению процесса откольного разрушения, по сравнению с КК-состоянием.

Таким образом, упрочняющий эффект, достигнутый в сплавах меди при ДКУП, сохраняется в экстремальных условиях ударно-волнового нагружения при субмикросекундных длительностях нагрузки.

Работа выполнена в рамках государственного задания Минобрнауки России по теме «Структура» №122021000033-2.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Валиев Р. З. Объемные наноструктурные металлические материалы: получение, структура, свойства /Р. З. Валиев, И. В. Александров. М.: ИКЦ Академкнига, 2007. 398 с.
2. Langdon T. G. Twenty-five years of ultrafine-grained materials: Achieving exceptional properties through grain refinement /T. G. Langdon // Acta Mater. 2013. V. 61. P. 7035–7059. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2013.08.018>.
3. Purcek G. Influence of high-pressure torsion-induced grain refinement and subsequent aging on tribological properties of Cu–Cr–Zr alloy / G. Purcek [et al.] // J. Alloys Compd. 2018. V. 742. P. 325–333. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2018.01.303>
4. Tingbiao G. A high strength and high conductivity Cu-0.4Cr-0.3Zr alloy prepared by cryo-ECAP and heat treatment / G. Tingbiao [et al.] // Phys. Met. Metallogr. 2022. V. 123. P. 1537–1547. <https://doi.org/10.1134/S0031918X22600634>.
5. Разоренов С. В. Упрочнение металлов и сплавов при ударном сжатии / С. В. Разоренов, Г. Н. Гаркушин // ЖТФ. 2015. Т. 85. № 7. С. 77–82. <https://doi.org/10.1134/S106378421507021X>
6. Brodova I. G. Dynamic properties of submicrocrystalline aluminum alloys / I. G. Brodova, A. N. Petrova // Phys. Met. Metallogr. 2018. V. 119. P. 1342–1345. <https://doi.org/10.31857/S0015323020070025>.
7. Хомская И. В. Динамическая прочность субмикроструктурной и нанокристаллической меди, полученной высокоскоростной деформацией / И.В. Хомская [и др.] // ФММ. 2020. Т. 121. № 4. С. 435–442. <https://doi.org/10.31857/S0015323020040063>.
8. Способ динамической обработки материалов: пат. 2283717 Рос. Федерация: МПК51 В 21 J 5/04, В 21 С 23/18, С 21 D 7/02 /Шорохов Е.В., Жгилев И.Н.,

- Валиев Р.З.; заявитель и патентообладатель РФЯЦ-ВНИИТФ им. акад. Е.И. Забабахина. № 2004131484/02; заявл. 28.10.04; опубл. 27.04.06, Бюл. № 26. 64 с. (патент)
9. Бродова И.Г. Фазово-структурные превращения и свойства цветных сплавов при экстремальных воздействиях / И.Г. Бродова, В.И. Зельдович, И.В. Хомская // ФММ. 2020. Т. 121. № 7. С. 696–730. <https://doi.org/10.1134/S0031918X20070029>.
 10. Khomskaya I. V. Effect of high-speed dynamic channel angular pressing and aging on the microstructure and properties of Cu–Cr–Zr alloys / I. V. Khomskaya [et al.] // IOP Conf. Ser: Mater. Sci. Eng. 2018. V. 447. P. 12007-12012. <https://doi.org/10.1088/1757-899x/447/1/012007>.
 11. Khomskaya I. V. Investigation of Cu₅Zr particles precipitation in Cu–Zr and Cu–Cr–Zr alloys subjected to quenching and high strain rate deformation / I. V. Khomskaya [et al.] // Lett. Mater. 2019. V.9. № 4. P. 400–404. <https://doi.org/10.22226/2410-3535-2019-4-400-404>
 12. Khomskaya I. V. The effect of chromium and zirconium alloying on the structure and properties of submicrocrystalline copper alloys obtained by dynamic channel-angular pressing / I. V. Khomskaya, V. I. Zel'dovich, D.N. Abdullina // Phys. Met. Metallogr. 2024. V. 125. № 10. P. 1310–1318. <https://doi.org/10.1134/S0031918X24601434>.

REFERENCES

1. Valiev R.Z. 3D Nanostructure Metallic Materials: Manufacturing, Structure, Properties / R.Z. Valiev, I. V. Aleksandrov // Akademkniga. Moscow. 2007. [in Russian].
1. Langdon T. G. Twenty-five years of ultrafine-grained materials: Achieving exceptional properties through grain refinement / T. G. Langdon // Acta Mater. 2013. V. 61. P. 7035–7059. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2013.08.018>.
2. Purcek G. Influence of high-pressure torsion-induced grain refinement and subsequent aging on tribological properties of Cu–Cr–Zr alloy / G. Purcek [et al.] // J. Alloys Compd. 2018. V. 742. P. 325–333. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2018.01.303>.
3. Tingbiao G., Danchen Q., Dawei H., Junjie W., Kaizhe L. Dekui L. A high strength and high conductivity Cu-0.4Cr-0.3Zr alloy prepared by cryo-ECAP and heat treatment / G. Tingbiao [et al.] // Phys. Met. Metallogr. 2022. V. 123. P. 1537–1547. <https://doi.org/10.1134/S0031918X22600634>.
4. Razorenov S.V. Hardening of metals and alloys during shock compression / S.V. Razorenov, G.V. Garkushin // Tech. Phys. 2015. V.60, P.1021–1026. <https://doi.org/10.1134/S106378421507021X>.
5. Brodova I.G. Dynamic properties of submicrocrystalline aluminum alloys / I.G. Brodova, A.N. Petrova // Phys. Met. Metallogr. 2018. № 13. V.119. P. 1342–1345. <https://doi.org/10.1134/s0031918x18130033>.
6. Khomskaya I. V. Dynamic strength of submicrocrystalline and nanocrystalline copper obtained by high-strain-rate deformation I.V. Khomskaya [et al.] // Phys.

- Met. Metallogr. 2020 V.121. № 4. P. 391–397. <https://doi.org/10.1134/S0031918x20040067>.
7. Method for dynamic processing of materials: patent 2283717 RF: /Shorokhov E.V., Zhgilev I.N., Valiev R.Z. //Byull. Izobret. 2006. № 26. P. 64.
 8. Brodova I.G. Structure–phase transformations and properties of non-ferrous metals and alloys under extreme conditions /I.G. Brodova, V.I. Zel'dovich, I.V. Khomskaya //Phys. Met. Metallogr. 2020. V. 121. № 7. P. 631–663. <https://doi.org/10.1134/S0031918X20070029>.
 9. Khomskaya I.V. Effect of high-speed dynamic channel angular pressing and aging on the microstructure and properties of Cu–Cr–Zr alloys /I.V. Khomskaya [et al.] // IOP Conf. Ser: Mater. Sci. Eng. 2018.V. 447. P.12007–12012. <https://doi.org/10.1088/1757-899x/447/1/012007>.
 10. Khomskaya I.V. Investigation of Cu₅Zr particles precipitation in Cu–Zr and Cu–Cr–Zr alloys subjected to quenching and high strain rate deformation / I.V. Khomskaya [et al.] // Lett. Mater. 2019. V.9. № 4. P. 400–404. <https://doi.org/10.22226/2410-3535-2019-4-400-404>.
 11. Khomskaya I.V. The effect of chromium and zirconium alloying on the structure and properties of submicrocrystalline copper alloys obtained by dynamic channel-angular pressing / I.V. Khomskaya, V.I. Zel'dovich, D.N. Abdullina //Phys. Met. Metallogr. 2024. V. 125. № 10. P. 1310–1318. <https://doi.org/10.1134/S0031918X24601434>.