

05

Влияние равноканального углового прессования и гидростатического давления на упругие и микропластические свойства сплава Cu–0.2 wt.% Zr

© Б.К. Кардашев,¹ В.И. Бетехтин,^{1,2} М.В. Нарыкова,^{1,¶} А.Г. Кадомцев,¹ О.В. Амосова¹

¹ Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН,
194021 Санкт-Петербург, Россия

² Тольяттинский государственный университет,
445020 Тольятти, Россия

¶ e-mail: Maria.Narykova@mail.ioffe.ru

Поступило в Редакцию 17 сентября 2018 г.

В окончательной редакции 22 марта 2019 г.

Принято к публикации 15 апреля 2019 г.

Изучено и проанализировано влияние интенсивной пластической деформации и последующего воздействия высокого гидростатического давления на упругие и микропластические свойства сплава Cu–0.2 wt.% Zr. Проведена оценка влияния на эти свойства нанопористости, которая образуется в процессе равноканального углового прессования и залечивается при наложении гидростатического давления.

Ключевые слова: РКУП, Cu–Zr, модуль Юнга, декремент, условный предел микротекучести, упруго-пластические свойства.

DOI: 10.21883/JTF.2019.10.48172.341-18

Введение

Известно, что микро- и субмикроструктурные (МСМ) металлы и сплавы, полученные при интенсивной пластической деформации (ИПД) методом равноканального углового прессования (РКУП), имеют высокие значения микротвердости, предела прочности и текучести; в настоящее время выявлены основные структурные особенности, обуславливающие эти механические свойства [1–5]. Упруго-пластические характеристики МСМ металлических материалов и природа структурных факторов их определяющих изучены существенно меньше [5–7]. Между тем уровень упругих и пластических свойств этих материалов важен для многих областей техники и биомедицины [3,8].

В настоящей работе исследовались акустические (упругие и микропластические) свойства сплава Cu–Zr. Интерес к этому материалу обусловлен тем, что медь и ее сплавы имеют высокую электропроводность и находят широкое практическое применение. Отметим, что некоторые особенности электропроводности и ее связи с упругими характеристиками МСМ металлов рассмотрены авторами в [9].

Для изучения природы структурных факторов, влияющих на упруго-пластические свойства МСМ сплава Cu–Zr, эти свойства определялись до и после воздействия высокого гидростатического давления, которое ведет к залечиванию [10] образовавшихся при ИПД нанопор. При анализе особенностей структуры, влияющих на свойства сплава Cu–Zr, в дальнейшем будут использованы результаты структурных исследований, полученные ранее в [11].

Материал и экспериментальные методы

Исследуемый сплав Cu–0.2 wt.% Zr подвергался гомогенизирующему отжигу при 1025 К в течение 24 h, затем холодной прокатке и вторичному отжигу при 1233 К в течение 1 h. После такой обработки размер зерен в сплаве достигал 350 μm. Затем сплав подвергался разному (от 1 до 12) числу проходов при РКУП (с поворотом на 90° после каждого прохода) при комнатной температуре. Из полученных после этого заготовок¹ для акустических измерений приготавливались образцы в форме стержней прямоугольного поперечного сечения ~ 2 × 2 mm² длиной ~ 18 mm.

В настоящей работе, как и в [6,7,12], для изучения упругих и микропластических свойств использовался резонансный метод составного пьезоэлектрического вибратора. Длина образца $l \approx 18$ mm обеспечивала резонансную частоту продольных колебаний образца f вблизи 100 kHz. Модуль Юнга определялся по формуле

$$E = 4\rho l^2 f^2,$$

где ρ — плотность образца.

Метод составного вибратора [12] позволяет изучать поведение модуля Юнга E и логарифмического декремента δ (внутреннего трения) в широком диапазоне амплитуд колебательной деформации ϵ , когда при достаточно больших ϵ в материале образца возникает нелинейное, амплитудно-зависимое поглощение ультразвуку

¹ Авторы выражают искреннюю благодарность профессору V. Sklenicka и его коллегам (ИФМ, Брно, Чешская республика) за предоставление заготовок сплава Cu–Zr после его термообработки и РКУП.

ка $\delta_h = \delta - \delta_i$ и амплитудно-зависимый дефект модуля Юнга

$$(\Delta E/E)_h = (E - E_i)/E_i.$$

Здесь E_i и δ_i — значения модуля Юнга и декремента, измеряемые при малых амплитудах, где модуль E и декремент δ еще не зависят от ε .

В настоящей работе, как и в [6,7], по результатам измерений амплитудных зависимостей $E(\varepsilon)$ строились диаграммы „напряжение–неупругая деформация“. Для этого по оси ординат откладывались значения амплитуд колебательных напряжений $\sigma = E\varepsilon$, а по оси абсцисс — нелинейная неупругая деформация

$$\varepsilon_d = \varepsilon(\Delta E/E)_h.$$

Эти данные позволяют проследить за изменением микропластических свойств материала в зависимости от предыстории образца на уровне неупругих деформаций от 10^{-9} до 10^{-6} и оценивать величину условного предела микротекучести σ_s .

Плотность образцов после разного числа проходов РКУП и после воздействия высокого (1.5 GPa) давления определялась прецизионным методом гидростатического взвешивания, относительная погрешность не превышала $2 \cdot 10^{-4}$. Измерение плотности и воздействие гидростатического давления проводились при комнатной температуре. Отметим, что, согласно электронно-микроскопическим исследованиям, проведенным в [10], размер зерен в результате РКУП уменьшался от 350 до (после 12 проходов) $0.35 \mu\text{m}$; сплав содержал precipitates Cu_9Zr_2 размером от 1 до 10 nm.

Экспериментальные данные и их обсуждение

Основные экспериментальные данные, полученные в настоящей работе, представлены на рис. 1, 2 и в таблице. В качестве примера на рис. 1, *a* приводятся амплитудные зависимости модуля Юнга E и декремента δ , полученные на образцах $\text{Cu}-0.2 \text{ wt}\% \text{ Zr}$, как в исходном состоянии, так и после воздействия на образец гидростатического давления. Рис. 1, *b* представляет аналогичные данные для образцов $\text{Cu}-0.2 \text{ wt}\% \text{ Zr}$, подвергнутых четырем проходам РКУП. При сопоставлении данных рис. 1, *a* и *b* видно, что если в исходном состоянии (без РКУП) после приложения гидростатического давления модуль E уменьшается, а декремент растет, то после РКУП давление заметно увеличивает модуль, а затухание ультразвука меняется мало. Подобные данные получены и на других образцах $\text{Cu}-0.2 \text{ wt}\% \text{ Zr}$ после 1, 8 и 12 проходов РКУП.

На рис. 2, *a* показаны диаграммы „напряжение–неупругая деформация“ для образцов сплава $\text{Cu}-0.2 \text{ wt}\% \text{ Zr}$ в исходном состоянии и после 4, 8 и 12 проходов РКУП, полученные по данным акустических измерений.

Плотность ρ , модуль Юнга E , амплитудно-независимый декремент δ_i и условный предел микротекучести σ_s при неупругой деформации $\varepsilon_d = 2.0 \cdot 10^{-8}$ при 0, 1, 4, 12 проходах РКУП до и после (в скобках) приложения гидростатического давления

Число проходов РКУП	E , GPa	δ_i , 10^{-3}	σ_s , МПа	ρ , g/cm^3
0	119.93	34	7.9	8.908
	(119.05)	(128)	(4.2)	(8.909)
1	134	33	8.1	8.886
	(136)	(45)	(11)	(8.900)
4	132.9	36	10.4	8.884
	(137.3)	(40)	(14.2)	(8.896)
12	135.6	33	18.5	8.865
	(133.05)	(17)	(21.7)	(8.909)

На рис. 2, *b* данные относятся к образцам, подвергнутым РКУП, а затем — воздействию гидростатического давления. Из рисунков видно, что увеличение числа проходов РКУП последовательно упрочняет материал: при большей предварительной пластической деформации сплава для одной и той же деформации ε_d необходимо более высокое напряжение σ .

Значения модуля Юнга E , декремента δ_i и величин условного предела микротекучести σ_s образцов сплава $\text{Cu}-0.2 \text{ wt}\% \text{ Zr}$ для наглядности обсуждения сведены в таблицу.

При рассмотрении данных таблицы следует обратить внимание на следующее. Модуль Юнга после одного прохода РКУП увеличивается от ~ 119 до ~ 130 GPa и в дальнейшем (при увеличении числа проходов) остается практически на постоянном уровне с небольшими колебаниями в ту или иную сторону. Такое поведение действующего (измеряемого) модуля упругости можно объяснить совместным влиянием дислокационной деформации, которая может менять модуль как в сторону увеличения, так и в сторону уменьшения за счет увеличения плотности дислокаций и уменьшения характерной длины дислокационных сегментов [12,13], а также образованием при РКУП высоких внутренних напряжений [14,15]. На модуль E может влиять также изменение при РКУП плотности (см. таблицу), которая, как показано в [10,16], во многом обусловлена образованием нанопор размером $\sim 10-30$ nm. Однако с учетом всех структурных факторов резкий рост E после первых проходов РКУП обусловлен в основном появлением высоких внутренних напряжений. Аналогичный вывод был сделан ранее для Al и Ti [6,7,17].

Таким же образом объясняется поведение декремента δ_i , с той лишь разницей, что внутренние напряжения не должны оказывать влияния на этот параметр. Здесь интересно отметить практическое постоянство декремента независимо от числа проходов РКУП для образцов, которые в дальнейшем не подвергались воздействию гидростатического давления. Что касается данных по δ_i для образцов после приложения гидростатического

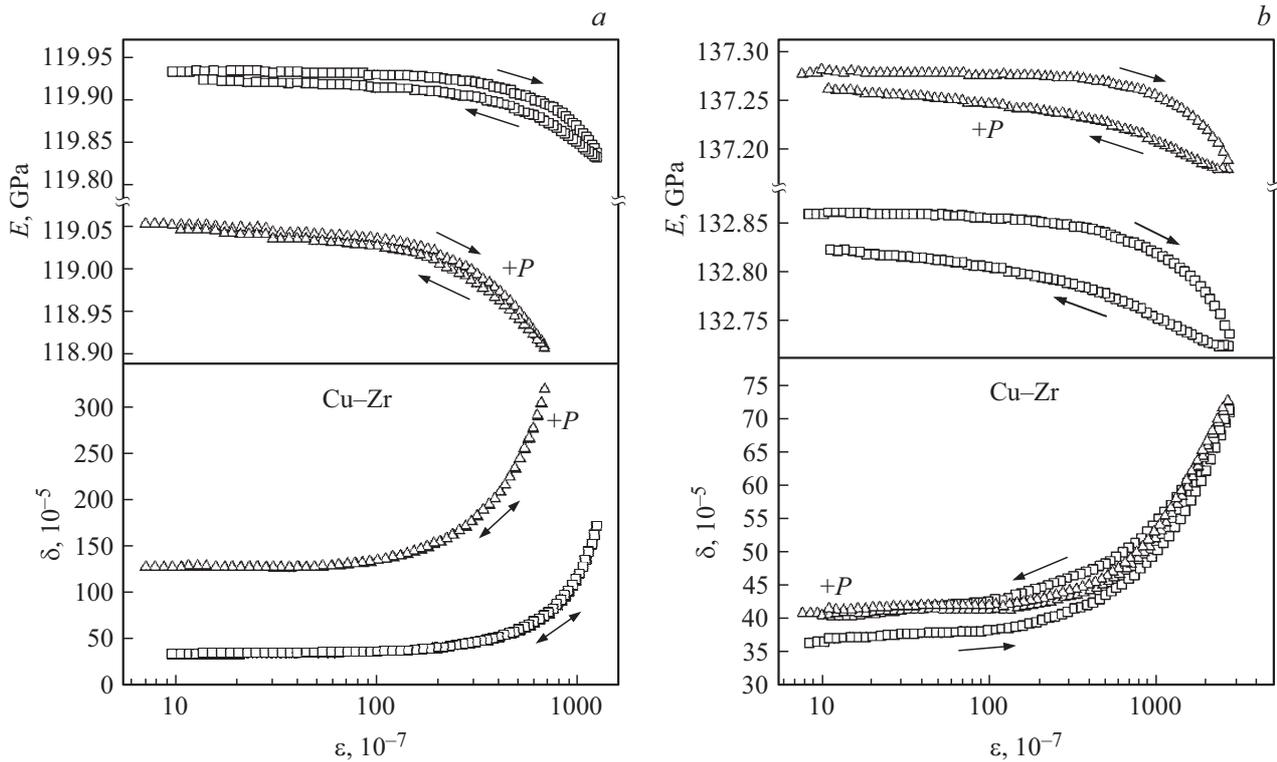


Рис. 1. Амплитудные зависимости модуля Юнга E и декремента δ , измеренные на образцах сплава Cu–Zr в исходном состоянии (a) и после 4-х проходов РКУП (b) до и после приложения гидростатического давления (+P); стрелки указывают направление изменения амплитуды; измерения проводились при комнатной температуре после длительной выдержки при $\sim 20^\circ\text{C}$.

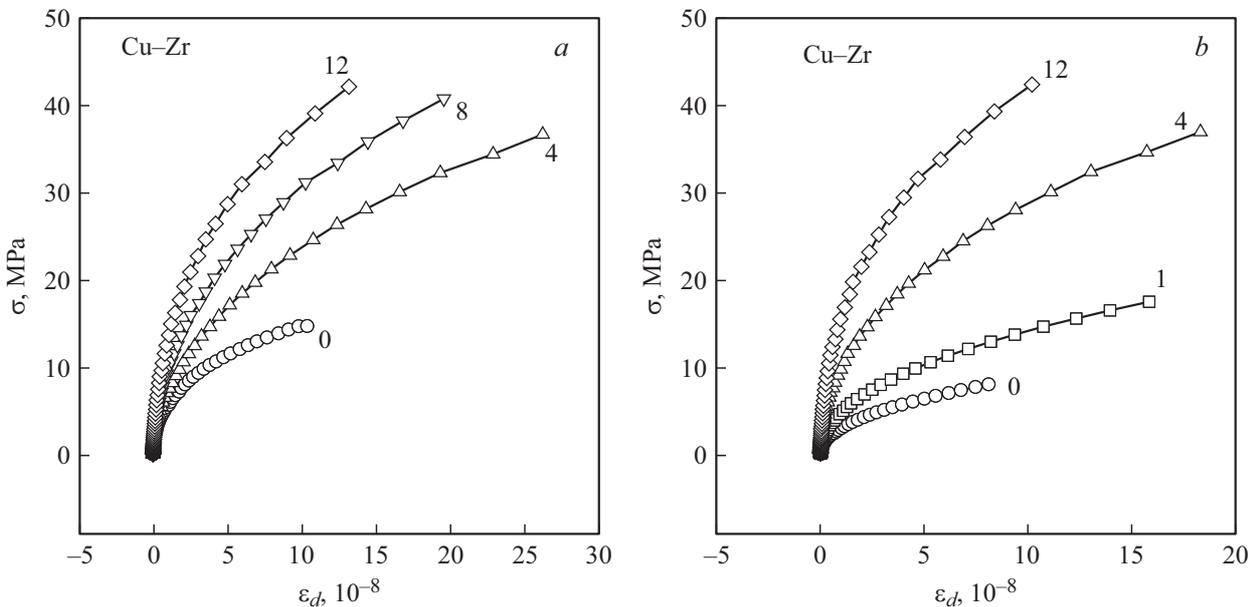


Рис. 2. Диаграммы „напряжение–неупругая деформация“ для образцов сплава Cu–Zr в исходном состоянии (0) и после различного числа проходов РКУП до (a) и после (b) приложения гидростатического давления; измерения выполнены при комнатной температуре.

давления, то здесь имеет место монотонное уменьшение декремента с увеличением числа проходов РКУП. Для образца, который не подвергался РКУП, обращает на себя внимание значительный рост декремента после

воздействия гидростатического давления (с $34 \cdot 10^{-5}$ до $128 \cdot 10^{-5}$). Очевидно, что здесь под давлением возникают свежие дислокации (скорее всего из-за наличия преципитатов), что, как обычно для пластичных кри-

сталлических материалов [12,13], уменьшает модуль и увеличивает декремент.

Для условного предела микротекучести характерным является рост значений σ_s с увеличением числа проходов РКУП. Однако здесь так же, как и для модуля и декремента, имеет место обычное для пластичных кристаллических материалов уменьшение σ_s после небольшой пластической деформации, что видно при сравнении данных для образцов, не подвергавшихся воздействию РКУП (σ_s уменьшается с 7.9 до 4.2 МПа). Для образцов с 4, 8 и 12 проходами РКУП наблюдается увеличение σ_s , как до, так и после приложения гидростатического давления. Это может быть связано с изменениями дислокационной структуры и с уменьшением нанопористости; после ее залечивания под давлением эффект роста σ_s повышается.

Заключение

В работе изучено поведение модуля Юнга, логарифмического декремента, а также микропластических характеристик сплава Cu–0.2 wt% Zr после интенсивной пластической деформации методом РКУП и последующего воздействия на образцы высокого гидростатического давления. Показано, что РКУП увеличивает модуль Юнга и уровень напряжений микропластического течения, а величина декремента остается практически постоянной. Существенное увеличение модуля упругости после РКУП обусловлено появлением высоких внутренних напряжений. Рост предела микротекучести с увеличением числа проходов РКУП является характерным, что связано с изменением дислокационной структуры. Проведена оценка влияния пористости, которая образуется в процессе РКУП и залечивается при наложении гидростатического давления. Немонотонное изменение модуля упругости после обработки давлением можно объяснить совместным влиянием дислокационной деформации, изменением уровня внутренних напряжений, а также эволюцией нанопористости.

Финансирование работы

Работа выполнена при финансовой поддержке российского фонда фундаментальных исследований (проект № 18-08-00360).

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

[1] Сегал М., Резников А.Е., Копылов В.И. // Изв. АН СССР. Металлы. 1981. Т 1. С. 113–122.
 [2] Gleiter H. // Progr. Mater. Sci. 1989. Vol. 33. P. 233–251.
 [3] Zeheibauer M.J., Zhu Y.T. Bulk nanostructure materials. Wiley–VCH, Weheim, 2009. 736 p.

[4] Валиев Р.З., Александров Г.В. Наноструктурные металлы, полученные интенсивной пластической деформацией. М.: Логос, 2000. 292 с.
 [5] Андреевский Р.А., Глезер А.М. // УФН. 2009. Т. 179. Вып. 4. С. 337–358. [Andrievski R.A., Glezer A.M. // Physics-Uspekhi. 2009. Vol. 52. N 4. P. 315–334.]
 [6] Кардашев Б.К., Бетехтин В.И., Нарыкова М.В. // ЖТФ. 2015. Т. 85. Вып. 12. С. 94–106. [Kardashev B.K., Betekhtin V.I., Narykova M.V. // Tech. Phys. 2015. Vol. 60. N 12. P. 1829–1841.] DOI: 10.1134/S1063784215120063
 [7] Кардашев Б.К., Бетехтин В.И., Кадомцев А.Г., Нарыкова М.В., Колобов Ю.Р. // ЖТФ. 2017. Т. 87. Вып. 9. С. 1362–1366. [Kardashev B.K., Betekhtin V.I., Kadomtsev A.G., Narykova M.V. Kolobov Y.R. // Tech. Phys. 2017. Vol. 62. N 9. P. 1372–1376.] DOI: 10.1134/S1063784217090110
 [8] Kolobov Y.R. // Nanotech. Russia. 2009. Vol. 11–12. P. 758–775.
 [9] Кардашев Б.К., Сапожников К.В., Бетехтин В.И., Кадомцев А.Г., Нарыкова М.В. // ФТТ. 2017. Т. 59. Вып. 12. С. 2358–2362. [Kardashev B.K., Sapozhnikov K.V., Betekhtin V.I., Kadomtsev A.G., Narykova M.V. // Phys. Solid State. 2017. Vol. 59. N 12. P. 2381–2386.] DOI: 10.1134/S1063783417120204
 [10] Бетехтин В.И., Кадомцев А.Г., Sklenicka V., Saxl I. // ФТТ. 2007. Т. 49. Вып. 10. С. 1787–1790. [Betekhtin V.I., Kadomtsev A.G., Sklenicka V., Saxl I. // Phys. Solid State. 2007. Vol. 49. N 10. P. 1874–1877.] DOI: 10.1134/S1063783407100101
 [11] Dvorak J., Sklenicka V., Betekhtin V.I., Kadomtsev A.G., Kral P., Svoboda M. // Mater. Sci. Eng. A. 2013. Vol. 584. P. 103–113. DOI: 10.1016/j.msea.2013.07.018
 [12] Нуканоров С.П., Кардашев Б.К. Упругость и дислокационная неупругость кристаллов. М.: Наука, 1985. 254 с.
 [13] Gremaud G. // Mat. Sci. Forum. 2001. Vol. 178. P. 366–368.
 [14] Chernov V.M., Kardashev B.K., Krjukova L.M., Mamaev L.I., Plaksin O.A., Rusanov A.E., Solonin M.I., Stepanov V.A., Votinov S.N., Zivalski L.P. // J. Nucl. Mater. 1998. Vol. 257. N 3. P. 263–269.
 [15] Кардашев Б.К., Плаксин О.А., Степанов В.А., Чернов В.М. // ФТТ. 2004. Т. 46. Вып. 8. С. 1409–1415. [Kardashev B.K., Plaksin O.A., Stepanov V.A., Chernov V.M. // Phys. Solid State. 2004. Vol. 46. N 8. P. 1449–1455.] DOI: 10.1134/1.1788777
 [16] Бетехтин В.И., Sklenicka V., Saxl I., Кардашев Б.К., Кадомцев А.Г., Нарыкова М.В. // ФТТ. 2010. Т. 52. Вып. 8. С. 1517–1523. [Betekhtin V.I., Sklenicka V., Saxl I., Kardashev B.K., Kadomtsev A.G., Narykova M.V. // Phys. Solid State. 2010. Vol. 52. N 8. P. 1629–1636.] DOI: 10.1134/S1063783410080111
 [17] Бетехтин В.И., Кадомцев А.Г., Кардашев Б.К. // ФТТ. 2006. Т. 48. Вып. 8. С. 1421–1427. [Betekhtin V.I., Kadomtsev A.G., Kardashev B.K. // Phys. Solid State. 2006. Vol. 48. N 8. P. 1506–1512.] DOI: 10.1134/S1063783406080142