

05:08

Исследование упруго-пластических свойств наноламината системы Cu–Nb

© В.И. Бетехтин, Ю.Р. Колобов, Б.К. Кардашев, Е.В. Голосов,
М.В. Нарыкова, А.Г. Кадомцев, Д.Н. Клименко, М.И. Карпов

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург
Научно-образовательный центр „Наноструктурные материалы
и технологии“ Белгородского государственного университета
Институт физики твердого тела РАН, Черноголовка
E-mail: Vladimir.Betekhtin@mail.ioffe.ru

Поступило в Редакцию 1 августа 2011 г.

Акустическим методом изучено поведение модуля Юнга, внутреннего трения и напряжения микропластического течения наноламината Cu–Nb. Получены данные о влиянии на указанные характеристики упруго-пластических свойств высокого (1 GPa) гидростатического давления.

На сегодняшний день многослойные композиты с наноразмерной толщиной слоев — наноламинаты [1–3] имеют широкие перспективы для практических применений в качестве конструкционных и функциональных материалов со специальными механическими, магнитными и электрическими свойствами благодаря сочетанию свойств составляющих их металлов. Это обстоятельство стимулирует исследование таких характеристик наноламинатов, как параметры структуры и термостабильность, предел прочности, текучести, микротвердость [4]. При этом значительно менее изучены упруго-пластические свойства таких многослойных композитов с наноразмерной толщиной слоев. В данной работе для наноламинатов системы Cu–Nb с помощью акустических измерений определялись характеристики упругой (модуль Юнга E) и обратимой микропластической деформации (амплитудно-независимый декремент δ и напряжение микропластического течения σ), связанной с колебательным движением дислокаций. Особенность акустических экспериментов состояла в том, что при умеренных амплитудах дислокационная структура исследуемых образцов сохраняется: после акустического воздействия плотность дислокаций в металле не меняется [5].

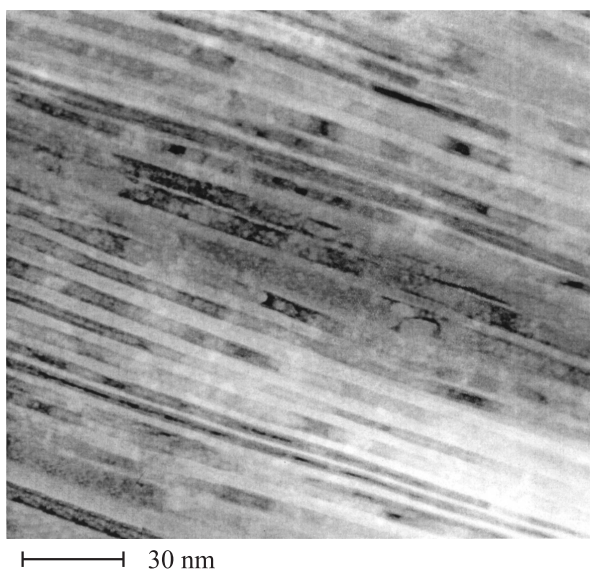


Рис. 1. Микроструктура наноламината Cu–Nb (поперечное сечение). Просвечивающая растровая электронная микроскопия наноламината системы.

Использовался резонансный метод составного вибратора (подробные сведения о методике можно найти в [5]), который помимо данных о модуле Юнга позволяет исследовать поглощение ультразвука (внутреннее трение) и неупругие (микропластические) свойства материала образцов. Данные по неупругим свойствам получаются из измерений модуля E и декремента упругих колебаний δ в широком диапазоне амплитуд колебательной деформации ε , когда при достаточно больших ε в материале образца возникают нелинейное амплитудно-зависимое поглощение $\delta_h = \delta - \delta_i$ 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 .

Акустические измерения в широком диапазоне амплитуд позволяют оценить также механические (микропластические) свойства материалов в привычных для механических испытаний координатах „напряжение — неупругая деформация“, когда по оси ординат откладывается значение

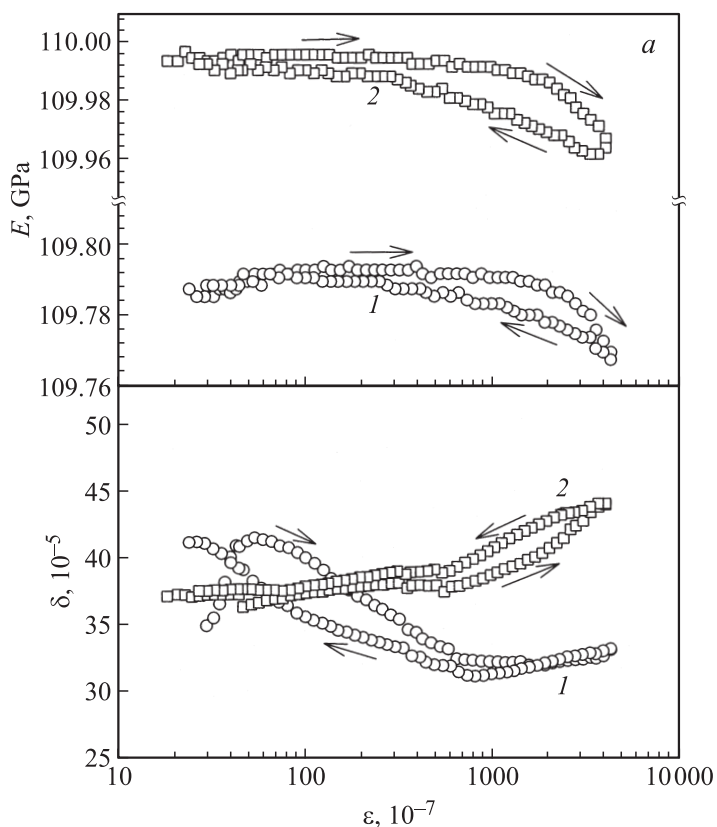


Рис. 2. Амплитудные (*a*) и температурные (*b*) зависимости модуля Юнга E и логарифмического декремента δ образца наноламината Cu–Nb. Амплитудные зависимости измерялись до (1) и после (2) воздействия давления. Температурные зависимости получены при охлаждении и последующем отогреве; кривые для декремента сдвинуты по вертикальной оси; тонкие стрелки указывают направление изменения температуры.

амплитуд колебательных напряжений $\sigma = E\varepsilon$, а по оси абсцисс — нелинейная неупругая деформация $\varepsilon_d = \varepsilon(\Delta E/E)_h$.

Образцы для акустических измерений имели форму стержней прямоугольного поперечного сечения 2×0.5 mm и длину $l = 20$ mm;

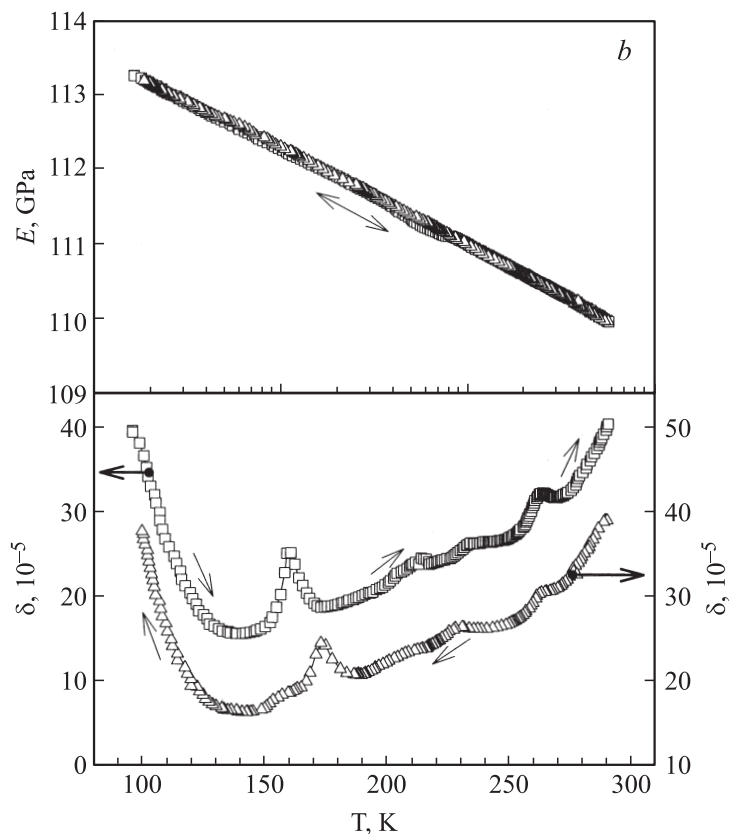


Рис. 2 (продолжение).

такая длина обеспечивала резонансную частоту продольных колебаний образца f вблизи 100 kHz. Модуль Юнга определялся как $E = 4\rho l^2 f^2$, где ρ — плотность образца. Отметим, что наноламинат был получен при сложной прокатке листов меди и ниобия и представлял „слоеный пирог“ из указанных металлов; при этом толщина каждого слоя (рис. 1) была около 10 nm. Границы слоев наноламината ориентированы вдоль распространения продольной акустической волны. Плотность образцов наноламината определялась прецизионным методом гидростатического взвешивания на воздухе и в дистиллированной воде.

Рассмотрим экспериментальные данные. На рис. 2, *a* приводятся амплитудные зависимости модуля Юнга и декремента δ для образца наноламината как в исходном состоянии, так и после воздействия гидростатического давления 1 ГПа. Зависимости $E(\varepsilon)$ и $\delta(\varepsilon)$ измеряются последовательно при увеличении и уменьшении амплитуды. Из рисунка видно, что во всех случаях наблюдается амплитудный гистерезис, кривые, снятые при увеличении и уменьшении амплитуды, не совпадают друг с другом. Однако форма кривой гистерезиса и численные значения существенно меняются в образце, подвергнутом воздействию высокого давления (1 ГПа, 16 min, 18°C). Отметим, что гидростатическое давление прилагалось к образцу, который находился в защитной оболочке.

На рис. 3 из зависимостей, приведенных на рис. 2, *a* и снятых при первом увеличении амплитуды, построены диаграммы $\sigma(\varepsilon_d)$ акустического деформирования, где ε_d — относительная неупругая деформация. На этом же рисунке показана рассчитанная абсолютная δl деформация (с учетом реальной длины образца в 20 mm). Диаграммы акустической деформации приведены для одного и того же образца до (кривая 1) и после (кривая 2) воздействия на него гидростатического давления.

Из полученных данных видно, что величина модуля после воздействия давления несколько увеличилась. Более существенно изменилась зависимость логарифмического декремента после обработки образца гидростатическим давлением. Дело, очевидно, в том, что величина δ (по сравнению с E) более чувствительна к областям поглощения ультразвука, которые связаны не только с дислокациями.

Действительно, максимум на амплитудной зависимости декремента (для исходного, не подвергнутого гидростатическому давлению образца), скорее всего, связан с наличием в образце несплошностей. Такие несплошности могут образовываться на границах раздела слоев Cu и Nb. После воздействия давления несплошности (микроскопические трещины, поры, области пониженной плотности и др.), как было показано в [6], могут частично или полностью залечиваться. В пользу высказанной гипотезы свидетельствуют и данные измерения плотности образца. Действительно, измеренная плотность наноламината (8.547 g/cm^3) оказалась меньше рассчитанной с учетом плотности Cu и Nb в предположении их равной доли (8.78 g/cm^3). После воздействия давления плотность выросла (8.625 g/cm^3), что можно объяснить уменьшением пористости наноламината. Отметим, что необходимость учета влияния пористости как фактора, влияющего на упругие характеристики

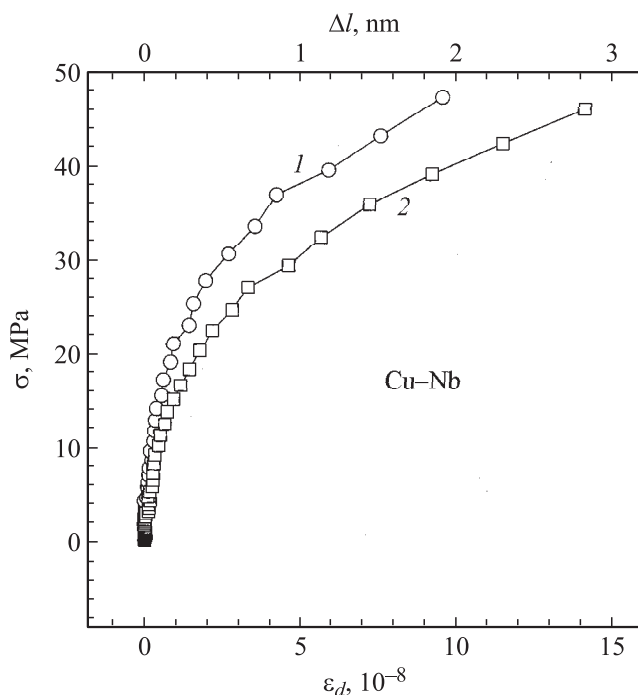


Рис. 3. Диаграммы микропластического деформирования образца наноламината Cu–Nb, полученные акустическим методом (ϵ_d — относительная деформация, Δl — абсолютная деформация образца длиной 2 см). Кривая (1) получена до, кривая (2) после воздействия давления 1 ГПа, измерения выполнены при комнатной температуре.

наноматериалов, отмечалась в [7,8]. Этим обстоятельством, очевидно, можно объяснить рост E после воздействия давления. Несколько изменилась и диаграмма микропластического деформирования (рис. 3). После прессования наноламинат стал „мягче“, его микропластичность выросла.

На рис. 2, b приведены температурные зависимости модуля E и декремента δ при охлаждении и последующем отогреве (данные для образца после прессования). Из рисунка видно, что модуль Юнга с понижением температуры растет по линейному закону. На тем-

пературной зависимости декремента имеет место ряд особенностей в виде максимумов и перегибов. Их возникновение, скорее всего, связано с небольшими деформациями на границах раздела Cu–Nb под действием термоупругих напряжений. Эти деформации обратимы при охлаждении–отопреве со сдвигом по температуре на 10–20 К.

Таким образом, проведено комплексное исследование упруго-пластических свойств (модуля Юнга, амплитудно-независимого декремента, диаграммы микропластической деформации) наноламината Cu–Nb. Исследования проведены в диапазоне температур от 100 до 293 К.

Анализ данных по поведению E , δ , σ_s до и после воздействия высокого (1 ГПа) гидростатического давления позволил предположить, что в образцах наноламината имеются несплошности, которые могут образоваться в процессе приготовления наноламината на границах слоев Cu и Nb. В пользу этого предположения свидетельствуют данные по измерению плотности образца наноламината после воздействия высокого гидростатического давления.

Важно отметить, что уменьшение объема этих сплошностей ведет к улучшению упруго-пластических свойств наноламината.

Список литературы

- [1] Карпов М.И., Внуков В.И., Волков К.Г., Медведь Н.В., Ходос И.И. // *Материаловедение*. 2004. № 1. С. 48–53.
- [2] Misra A., Demkowicz M.J., Zhang X., Hoagland R.G. // *JOM*. 2007. P. 62–65.
- [3] Бокштейн Б.С., Внуков В.И., Голосов Е.В., Карпов М.И., Колобов Ю.Р., Колесников Д.А., Коржов В.П., Родин А.О. // *Изв. вузов. Физика*. 2009. № 8. С. 40–44.
- [4] Колобов Ю.Р., Липницкий А.Г., Иванов М.Б., Голосов Е.В. // *Композиты и наноструктуры*. 2009. № 2. С. 5–24.
- [5] Никаноров С.П., Кардашев Б.К. *Дислокационная упругость и неупругость кристаллов*. М.: Наука, 1985. 254 с.
- [6] Бетехтин В.И., Веселков С.Ю., Даль Ю.М., Кадомцев А.Г., Амосова О.В. // *ФТП*. 2003. Т. 45. В. 4. С. 618–624.
- [7] Chaim R., Hefetz M. // *J. Mater. Sci*. 2004. V. 39. P. 3057.
- [8] Бетехтин В.И., Scienicka V., Saxl I., Кардашев Б.К., Кадомцев А.Г., Нарыкова М.В. // *ФТТ*. 2010. Т. 52. В. 8. С. 1517–1523.