

Исследования показали, что отжиг, и особенно отжиг под нагрузкой, ведет к увеличению максимальной индукции  $B_m$  и падению остаточной индукции  $B_r$ . Ранее, аналогичный эффект был обнаружен при воздействии на аморфные сплавы гидростатического давления [4].

Изучение методом малоуглового рентгеновского рассеяния и измерения плотности нанопористости аморфных сплавов выявило залечивающее влияние отжига и давления на объем нанопор, при этом максимальное уменьшение нанопористости имело место при отжиге под нагрузкой.

Проведенный анализ позволил сделать вывод, что особенности влияния отжига и давления на  $E$  и  $\sigma$  обусловлены различным механизмом залечивания нанопор при отжиге (вязкое течение) и давления (локализованный сдвиг). В силу этого, в частности, изменение формы пор под действием отжига и давления существенно отличается, что и сказывается, очевидно, на свойствах аморфных сплавов. Микроскопические исследования и их теоретический анализ с позиций нелинейной теории упругости позволили выявить указанные выше особенности влияния давления на форму пор [5].

Обсуждается механизм влияния нанопористости на физико-механические свойства аморфных сплавов. Измерения  $E$  проводились Ю.А.Буренковым

1. В.И.Бетехтин, А.М.Глезер, А.Г.Кадо́мцев ФТТ т.40, №1, 85 (1998)
2. В.И.Бетехтин, А.Г.Кадо́мцев, О.В.Амосова Изв. РАН, сер. Физ.т.67, №6, 812 (2003)
3. Ю.А.Буренков, С.П.Никаноров, А.В.Степанов Изв. АН СССР, сер.физ. т.35, №3, 525 (1971)
4. А.И.Слущер, В.И.Бетехтин, А.Г.Кадо́мцев, О.В.Голочко ФТФ, т.76, в.12, 57 (2006)
5. В.И.Бетехтин, С.Ю.Веселков, Ю.М.Даль, А.Г.Кадо́мцев, О.В.Амосова ФТТ, т.45, №4, 42 (2003).

## УПРУГО-ПЛАСТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА УЛЬТРАМИКРОКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ

**Бетехтин В.И., Кардашев Б.К., Нарыкова М.В.**

*ФГБУН Физико-технический институт им. А.Ф.Иоффе РАН, С.-Петербург, Россия*  
[Vladimir.Betekhtin@mail.ioffe.ru](mailto:Vladimir.Betekhtin@mail.ioffe.ru)

Рассмотрены результаты изучения ультрамикроструктурных Al, Ti, Al+0.2%Sc, полученных в результате интенсивной пластической деформации при равноканальном угловом прессовании с различным числом проходов или винтовой (в сочетании с продольной) прокатке.

С помощью акустических измерений резонансным методом составного вибратора определялись характеристики упругой и обратимой микропластической деформации (модуль Юнга, амплитудно-независимый декремент  $\delta$  и напряжение микропластического течения  $\sigma$ ); особенность акустических экспериментов состояла в том, что при умеренных амплитудах дислокационная структура исследуемых образцов сохраняется: после акустического воздействия плотность дислокаций в металле не меняется [1]. Помимо этого модифицированным методом малоуглового рентгеновского рассеяния в ультрамикроструктурных металлах и сплавах определялись параметры областей избыточного свободного объема (в предельном случае – нанопор), которые могли возникать в результате интенсивной пластической деформации.

По данным измерений амплитудных зависимостей модуля упругости произведена оценка микропластических характеристик. Экспериментальные данные обсуждаются в рамках представлений о дислокациях, на подвижность которых оказывают влияние не только спектр точечных дефектов, но и внутренние напряжения, уровень которых зависит

от степени предварительной пластической деформации. Обсуждается также возможный вклад несплошностей (пор и микротрещин) на измеряемые акустические параметры.

Изучение характеристик упругой и обратимой микропластической деформации акустическим методом, связанных с колебательным движением дислокаций, позволяет получать информацию о природе процессов, которые в той или иной степени контролируют деформацию и разрушение кристаллических твердых тел.

Следует отметить, что полнота и достоверность информации существенно повышается при анализе влияния на изучаемые характеристики внешних факторов таких, как давление, температура, а также дополнительных данных об изменении при указанных воздействиях характеристик дефектной структуры, полученных другими, не акустическими методами.

Процедура акустических измерений была следующей. На образце после изготовления или после того или иного воздействия, измерялись амплитудные зависимости  $E(\epsilon)$  и  $\delta(\epsilon)$ . На рис.1–3 в качестве примера приведены данные для сплава Al+0,2%Sc и для наноламината Cu-Nb. Из зависимостей  $E(\epsilon)$ , измеренных в вакууме, по схеме, представленной в [1], строились кривые «напряжение – микропластическая деформация» (рис. 2). При охлаждении и нагревании снимались температурные зависимости  $E(T)$  и  $\delta(T)$  (рис. 3б).

При изучении микрокристаллического алюминия и сплава Al+0,2%Sc [1–3] была выявлена важная роль внутренних напряжений на измеряемый модуль упругости (модуль Юнга). В частности, рост модуля Юнга при увеличении числа проходов от 1 до 4 в процессе РКУ-прессования Al может быть объяснен только увеличением уровня дальнедействующих внутренних напряжений [1, 3].

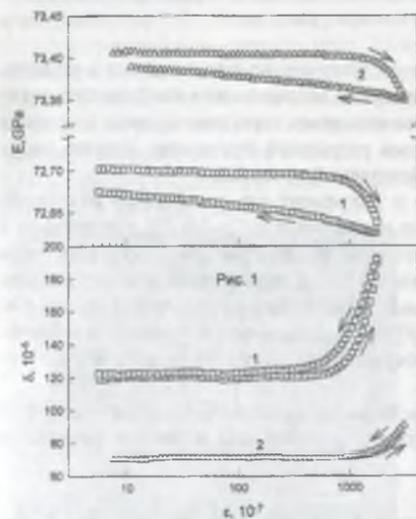


Рис. 1. Амплитудные зависимости модуля Юнга  $E$  и декремента  $\delta$  для образца сплава Al+0,2%Sc после восьми проходов РКУ прессования, измеренные до (1) и после (2) воздействия гидростатического давления 1,5 ГПа; измерения проводились в вакууме при комнатной температуре; стрелки указывают направление изменения  $\epsilon$ .

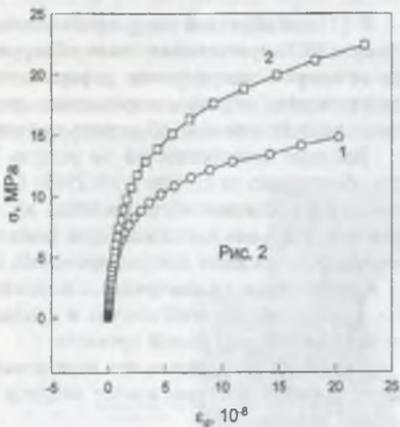


Рис. 2. Диаграммы «напряжение-неупругая деформация», полученные по данным акустических измерений для образца сплава Al+0,2%Sc после восьми проходов РКУ прессования до (1) и после (2) воздействия гидростатического давления 1,5 ГПа; измерения выполнены при комнатной температуре.

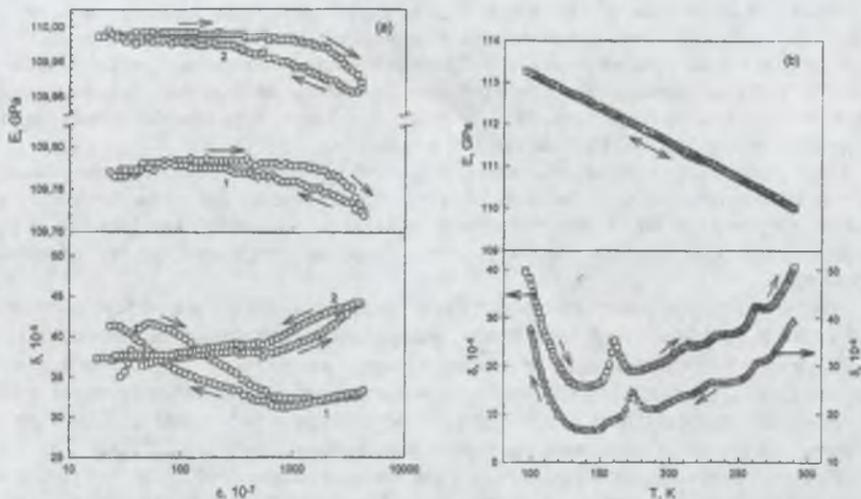


Рис. 3. Амплитудные (а) и температурные (б) зависимости модуля Юнга  $E$  и логарифмического декремента  $\delta$  образца наноламината Cu-Nb. Зависимости измерялись до (1) и после (2) воздействия давления 1.5 GPa. Температурные зависимости получены при охлаждении и последующем отогреве; кривые для декремента сдвинуты по вертикальной оси; тонкие стрелки указывают направление изменения температуры.

В [1] для образцов микрокристаллического Al, полученных после одного и четырех проходов РКУ-прессования, была обнаружена реверсия механических свойств при переходе от микро к макроуровню деформации: более высокому значению предела текучести соответствовали образцы с меньшими значениями разрывной прочности. Анализ полученных данных позволил объяснить причину наблюдаемой реверсии.

Влияние несплошностей на модуль Юнга и декремент ультразвуковых колебаний было обнаружено на сплаве Al+0.2%Sc [2, 3] и на наноламинате Cu-Nb [5], где изучалось влияние гидростатического давления на акустические параметры (рис. 1-3). При этом уменьшение объема несплошностей (нанопористости) после воздействия высокого гидростатического давления контролировалось методами малоуглового рентгеновского рассеяния и прецизионного измерения плотности. В [4] было показано, что уровень нанопористости влияет на упругий модуль и ультразвуковой параметр  $T_1$ , полученного методом винтовой и продольной прокатки.

Таким образом, видно, что акустические свойства позволяют обнаруживать широкий спектр явлений, которые имеют место в металлах и сплавах под влиянием различных внешних воздействий.

1. В.И. Бетехтин, А.Г.Кадомцев, Б.К. Кардашев. ФТТ 48, 8, 1421 (2006).
2. В.И. Бетехтин, V Sklenicka, I. Saxi, Б.К. Кардашев, А.Г.Кадомцев, М.В. Нарыкова. ФТТ 52, 8, 1517 (2010).
3. В.И. Бетехтин, Б.К. Кардашев, М.В. Нарыкова. Научно-технические ведомости СПбГПУ 4(109), 104 (2010).
4. В.И. Бетехтин, Ю.Р. Колобов, М.В. Нарыкова, Б.К. Кардашев, Е.В.Голосов, А.Г.Кадомцев. ЖТФ 81, 11, 58 (2012).
5. В.И. Бетехтин, Ю.Р. Колобов, Б.К. Кардашев, Е.В.Голосов, М.В. Нарыкова, А.Г.Кадомцев, Д.Н.Клименко, М.И.Карпов. Письма в ЖТФ 38, 3, 88 (2012).