

УДК 539.376.092

## ВЛИЯНИЕ ИЗМЕНЕНИЯ ВСЕСТОРОННЕГО ДАВЛЕНИЯ НА ДЕФОРМИРОВАНИЕ МЕДИ

© С.А. Егоров, С.П. Беляев, И.Н. Лобачев

*Россия, Санкт-Петербург, Институт математики и механики СПбГУ*

Egorov S.A., Belyaev S.P., Lobachev I.N. The influence of comprehensive pressure changing on the copper deformation. The distinction in copper creeping depending on order of the shift loading and the pressure applying is investigated. It is discovered that the copper creeping after elastic-plastical deforming under 200 MPa pressure has non-trivial peculiarities; the decreasing of pressure to atmospheric one is accompanied by deforming. The conclusion about the existence of additional mechanism of pressure changing influence on hard crystals is made.

В настоящее время хорошо известно, что реакция кристаллических тел на изменение давления может не сводиться лишь к заживлению дефектной структуры или тривиальному изменению объема. Оказывается, в сплавах TiNi и CuAlMn [1 - 4], цинке [5] бароциклированием при определенных условиях можно инициировать неупругую деформацию. В TiNi и CuAlMn увеличение или уменьшение давления стимулируют развитие различных явлений мартенситной неупругости. В Zn роль давления сводится к формированию значительных по величине сдвиговых микронапряжений (вследствие анизотропии ГПУ-решетки), которые сами по себе или в сумме с внешней сдвиговой нагрузкой приводят в движение дислокации.

В связи со сказанным возникает вопрос о том, единственны ли указанные возможности влияния давления на кристаллические материалы? Представляется актуальным изучить влияние изменения барических условий на механическое поведение такого материала, у которого кристаллическая решетка изотропна (кубическая) и в котором не протекают мартенситные превращения. Поэтому настоящая работа посвящена исследованию этого вопроса на примере меди, удовлетворяющей указанным требованиям.

В качестве исходного материала использовали медь 99,9 % чистоты в форме проволоки диаметром 0,7 мм. Из проволоки изготовляли образцы в виде витых пружин внешним диаметром 5,5 мм и высотой 18 мм, состоящих из 3,5 рабочих витков. После изготовления образцы отжигали при 570 К в течение 30 мин.

Эксперименты проводили при температуре 290 К в установке высокого давления, описанной в [3]. Использовали схему силового воздействия, когда всестороннее давление дополнялось постоянной и независимой от давления сдвиговой нагрузкой. Точность измерения деформации составляла 0,002 %. Перед проведением каждого эксперимента пружинный образец устанавливали в рабочую камеру и сжимали до напряжения  $\tau_1 = 15$  МПа. При этом материал упруго-пластически деформировался на величину  $\gamma = 0,25$  %. В рамках настоящей работы были выполнены две серии экспериментов.

В первой серии экспериментов сразу же после предварительного нагружения сдвиговыми напряже-

ниями 15 МПа в рабочей камере поднимали давление  $P$  до 200 МПа со скоростью 6 МПа/мин и при  $P = \text{const}$  производили догружение до  $\tau_2 = 25$  МПа со скоростью  $\sim 10$  МПа/мин. Таким образом, схема нагружения сдвиговыми напряжениями и давлением в этой серии экспериментов соответствует цепочке  $\tau_1 \rightarrow P \rightarrow \tau_2$ . После достижения  $\tau_2 = 25$  МПа наблюдали за изменением деформации во времени. На установившемся участке ползучести давление в течение 2,5 минут сбрасывали с 200 МПа до атмосферного и после этого продолжали следить за изменением деформации образца. В результате было обнаружено нетривиальное механическое поведение материала при данных условиях испытания. Более подробный анализ этого поведения будет дан ниже в сравнении с результатами следующей серии опытов.

Во второй серии экспериментов через 2 минуты после предварительного нагружения образца при атмосферном давлении производили догрузку до  $\tau_2 = 25$  МПа и далее поддерживали  $\tau_2 = \text{const}$ , наблюдая за развитием процесса ползучести. Через некоторое время, на участке установившейся ползучести, давление изотермически увеличивали с атмосферного до 200 МПа. Это увеличение производили шагами по 25 МПа со скоростью  $\sim 6$  МПа/мин. После достижения очередного уровня давления в течение 5-6 мин измеряли формоизменение образца. Таким образом, последовательность нагружения сдвиговой силой и давлением во второй серии экспериментов можно отразить цепочкой  $\tau_1 \rightarrow \tau_2 \rightarrow P$ . Достигнув уровня 200 МПа, давление изотермически уменьшали шагами по 50 МПа в течение 1 мин, делая паузы в течение 6-7 мин после каждого шага. Установлено, что увеличение или уменьшение давления никаким образом не сказывается на процессе ползучести (в пределах погрешности измерений).

Сравнение результатов первой и второй серий экспериментов показывает следующее. Во-первых, установившийся режим деформирования в первом случае наступает через  $\sim 50$  мин, а не через 5 мин, как это имеет место для второго случая. Во-вторых, скорость накопления деформации в первой серии больше, чем во второй. Наконец, отметим следующее. Оказывается, в

первой серии экспериментов изотермическое уменьшение давления с 200 МПа до атмосферного всегда сопровождается последующей скачкообразной деформацией образца на  $\sim 0,01\%$  в сторону приложенной нагрузки. В то же время во второй серии экспериментов, как отмечалось выше, любые изменения барических условий в пределах от атмосферного до 200 МПа никакими механическими эффектами не сопровождалось.

Таким образом, обнаружена сильная зависимость деформационного поведения меди от последовательности приложения сдвиговой нагрузки и давления. Если нагружение производить в соответствии со схемой  $\tau_1 \rightarrow \tau_2 \rightarrow P$ , то материал ведет себя в рамках известных закономерностей в том смысле, что изменение давления не отражается на характере ползучести. В то же время, нагружение по схеме  $\tau_1 \rightarrow P \rightarrow \tau_2$  приводит к возникновению необычных деформационных эффектов.

Необходимо отметить, что, хотя природа такого нетривиального поведения меди в первой серии опытов не ясна, тем не менее можно высказать некоторые предположения. Прежде всего обратим внимание на то, что в описанных экспериментах деформацию удавалось инициировать только уменьшением давления, поэтому сразу следует отвести возможную гипотезу о порождении давлением микронапряжений как вследствие наличия текстуры материала, так и из-за анизотропии сжимаемости его кристаллической решетки. Действительно, в случае правильности этой гипотезы увеличение давления приводило бы к деформированию (что не наблюдается) аналогично со случаем его уменьшения, как это имеет место для цинка [5]. В то же время здесь можно использовать известную положительную зависимость предела текучести твердых кристаллов от давления [6]. И хотя подобную зависимость для изучаемого материала, строго говоря, следует установить непосредственно, однако нижеследующие рассуждения вполне вероятны. Именно, если такая зависимость име-

ет место в нашем случае, то упруго-пластическое деформирование на величину  $\gamma$ , производимое под давлением, должно происходить при большем уровне напряжений  $\tau$  ( $p > 0$ ), чем при его отсутствии. Если теперь зафиксировать максимально достигнутое напряжение  $\tau_{\max}$  ( $p > 0$ ) и уменьшать давление, то, вследствие уменьшения силового предела, требуемого для пластического формоизменения материала, возможно его деформирование. Действительно, изотермическое уменьшение давления должно увеличивать равновесную концентрацию вакансий. Если источниками вакансий являются дислокации, то последние получают возможность обхода препятствий и скольжения в параллельных плоскостях решетки.

Обнаруженные в настоящей работе явления указывают на то, что способы воздействия давления на деформационное поведение кристаллических материалов не исчерпывается теми, о которых было сказано в начале статьи. Детальный анализ этого вывода возможен только после проведения дальнейших соответствующих исследований.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Лихачев В.А., Малинин В.Г., Овчаренко С.Я. // Механика прочности материалов с новыми функциональными свойствами: XXIV Всесоюзный семинар «Актуальные проблемы прочности», 17-21 дек. 1990 г. Рубежное, 1990. С. 183-188.
2. Беляев С.П., Егоров С.А., Лихачев В.А., Ольховик О.Е. // Ж. техн. физики. 1996. Т. 66. № 11. С. 36-46.
3. Лихачев В.А., Беляев С.П., Егоров С.А. // Современные вопросы физики и механики материалов: Матер. XXXII семинара «Актуальные проблемы прочности», С.-Пб., 12-14 ноября 1996 г. С.-Пб., 1997. С. 171-177.
4. Лихачев В.А., Беляев С.П., Егоров С.А. // Тез. докл. XXXII семинара «Актуальные проблемы прочности», С.-Пб., 12-14 ноября 1996 г. С.-Пб., 1997. С. 44.
5. Лихачев В.А., Малинин В.Г., Овчаренко С.Я. // Материалы с новыми функциональными свойствами: Матер. семинара. Новгород - Боровичи, 1990. С. 93 - 95.
6. Котречко С.А., Мешков Ю.А., Меттис Г.С. // Металлофизика. 1988. Т. 10. № 6. С. 46 - 56.