

05

Об особенностях действия гидростатического давления на пластичность меди в зависимости от ее исходного состояния

© С.А. Егоров

Санкт-Петербургский государственный университет,
198905 Санкт-Петербург, Россия
e-mail: truhtin@mail.ru

(Поступило в Редакцию 17 апреля 2015 г. В окончательной редакции 9 июня 2015 г.)

Проведено изучение действия всестороннего давления от 0 до 250 МПа на деформационные свойства меди в зависимости от ее исходного состояния. Обнаружено, что после выдержки в жидком азоте деформация кручения до разрушения при увеличении давления до 200 МПа увеличивается, а при дальнейшем увеличении давления до 250 МПа она уменьшается. Предварительное кручение на 5% в сторону, противоположную направлению кручения под давлением, приводит к линейному характеру зависимости предельной деформации от давления. Если величина предварительной деформации равна 25%, то увеличение давления до 150 МПа приводит к увеличению пластичности материала, а при дальнейшем его увеличении до 250 МПа заметных изменений пластических свойств не происходит.

Введение

В работах [1,2] впервые было экспериментально обнаружено, что действие всестороннего давления на предельную пластичность твердых тел (металлов) нелинейно: деформация до разрушения с ростом давления увеличивается лишь до некоторого момента, а дальнейшее увеличение давления не приводит к ее существенному росту. Иными словами, выяснилось существование некоторого механизма, конкурирующего с механизмом повышения пластичности под давлением. В работе [3] была попытка объяснить такой механизм посредством рассмотрения нестабильных материалов (склонных к двойникованию или к структурным изменениям под давлением), однако из области рассмотрения выпадали такие стабильные материалы, как молибден и вольфрам. Кроме того, в работе [4] к списку стабильных веществ, имеющих затухающую зависимость предельной пластичности от давления, была добавлена медь. Это значит, что природа явления не сводится к тому, что под давлением нестабильность вещества проявляется сильнее и может иметь другое объяснение. В исследовании [4] на основе работы [5], было сделано предположение, что механизм торможения действия давления на увеличение предельной пластичности связан с вакансионным распуханием материалов во время их пластического деформирования. Если это верно, то можно ожидать, что один и тот же материал в зависимости от состояния связанного со степенью его насыщенности вакансиями, будет по-разному реагировать на наложение давления. В настоящей работе осуществлено экспериментальная проверка этого предположения для меди.

1. Экспериментальные результаты

Баромеханические опыты проводили по методике, подробно описанной в работе [4]. Образцы изготов-

ливали из электротехнической меди: проволоку диаметром 2.4 mm разрезали на мерные куски длиной 30–35 mm, в срединной части которых вытачивали (с помощью круглой шлифовки) рабочие участки длиной 4 mm и диаметром 1.2 mm. После этого их отжигали при температуре 870 K в течение 1 h, охлаждение с печью, окончательно шлифовали и измеряли на измерительном микроскопе с точностью $\pm 1 \mu\text{m}$. Таким образом, было изготовлено 100 образцов на кручение. Было выделено три их вида. Образцы *A* погружали в жидкий азот и выдерживали там в течение недели, после чего прогревали до комнатной температуры и проводили опыты. Образцы *B* непосредственно перед баромеханическими опытами при атмосферном давлении деформировали кручением на величину $\gamma_0 = -5\%$ в сторону, противоположную той, которая была во время испытаний. В образцах *C* исходная деформация была $\gamma_0 = -25\%$. Смысл разделения образцов следующий. Если, как это предполагается в работе [4], в реакции пластичности материала на давление важную роль играют вакансии и их концентрация N , то это обстоятельство выявится при разных степенях N . Именно для достижения неравенства $N_A < N_C < N_B$ образцы *A*, *B* и *C* имели разное исходное состояние. В образцах *A*, очевидно, величина N_A должна быть весьма малой, поскольку их равновесное количество при температуре жидкого азота радикально меньше, чем после отжига. Количественно ситуацию здесь оценить сложно, тем более что для качественного ее понимания необходимости в этом нет. В образцах *B* во время проведения опытов по сути инициировался эффект Баушингера, когда в самом начале деформирования в барокамере происходило уменьшение плотности дислокаций, сопровождающееся испусканием новых вакансий. Поскольку вакансии возникали и при исходном кручении на величину $\gamma_0 = -5\%$, то в результате на самых первых этапах деформирования во время проведения баромеханического опыта материал

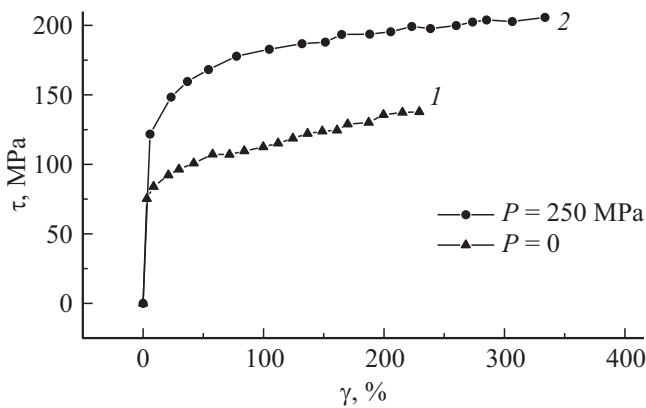


Рис. 1. Зависимости напряжения τ от деформации γ при кручении меди под давлением 0 и 250 МПа (линии 1 и 2 соответственно).

должен оказаться с более высокой концентрацией вакансий относительно общей длины дислокационных петель по сравнению с недеформированным материалом и тем более — по сравнению с материалом после обработки холодом. Поэтому можно считать, что этот случай соответствует очень большой величине N_B если и не для исходного состояния образцов B , то для самого первого этапа их деформирования под давлением P . Судя по всему, это обстоятельство должно играть определённую роль и на более глубоких этапах пластического формоизменения под давлением, вплоть до разрушения. В образцах C создавалась промежуточная ситуация с величиной N_C . В самом деле, ввиду значительности исходной деформации $\gamma_0 = -25\%$ исключалось действие эффекта Баушингера — с одной стороны. С другой стороны, здесь не было обработки холодом. Очевидно, эта промежуточная ситуация была бы и при $\gamma_0 = 0$, однако предварительное кручение на указанную величину должно было снять все подозрения на то, что будто бы не эффект Баушингера и связанные с ним процессы, а само кручение в обратном направлении влияет на зависимость пластических свойств материала от давления.

После установки образца в испытательную камеру в ней нагнетали гидростатическое давление P в диапазоне от 0 до 250 МПа, и при этом значении P с темпом приблизительно 60% в min деформировали кручением при комнатной температуре до разрушения. Текущие напряжение τ и деформация γ сдвига определялись с точностью ± 1 МПа и $\pm 1\%$ соответственно. Для каждого из рассмотренных случаев $P = 0, 50, 100, 150, 200$ и 250 МПа изучали по 3–6 образцов. Характер разрушения всегда был вязким, независимо от давления и вида образцов. По результатам экспериментов были построены деформационные кривые $\tau(\gamma)$, примеры которых для образцов A даны на рис. 1 (линии 1 и 2 для давлений 0 и 250 МПа соответственно), для других случаев они аналогичны. Видно, что давление увели-

чивает как пластичность меди, так и ее прочностные свойства. В целом такая же ситуация была описана и в работе [4]. Зависимости максимальной деформации до разрушения γ^{MAX} от давления P для образцов A, B и C даны на рис. 2, 3, 4 соответственно.

Сравнение их между собой показывает их существенное различие. Так, после выдержки в жидком азоте (образцы A , рис. 2) зависимость γ^{MAX} от P оказывается сильно немонотонной: в интервале от 0 до 50 МПа давление несколько уменьшает пластичность материала (похожее явление было описано для некоторых материалов в работе [2]), увеличение давления до 200 МПа сопровождается резким ростом величины γ^{MAX} с приблизительно 200 до 440%, т.е. в 2.2 раза, а при дальнейшем увеличении давления до 250 МПа эта величина падает до 350%, т.е. в 1.26 раза по сравнению с максимальным значением. Кручение под давлением в режиме реализации эффекта Баушингера (образцы B , рис. 3) характеризуется линейностью зависимости $\gamma^{\text{MAX}}(P)$, так что при

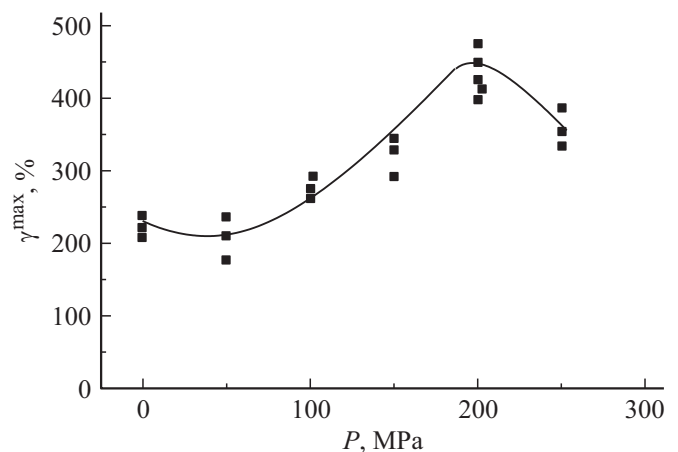


Рис. 2. Зависимость деформации до разрушения γ^{MAX} от величины гидростатического давления P после выдержки в жидком азоте (образцы A).

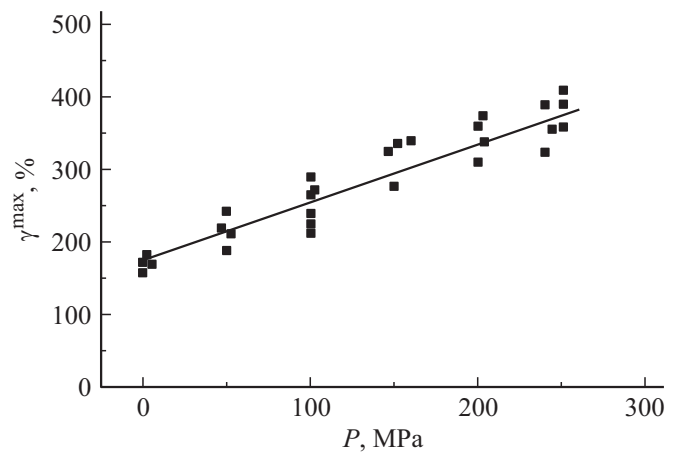


Рис. 3. Зависимость деформации до разрушения γ^{MAX} от величины гидростатического давления P после предварительного деформирования на $\gamma_0 = -5\%$ (образцы B).

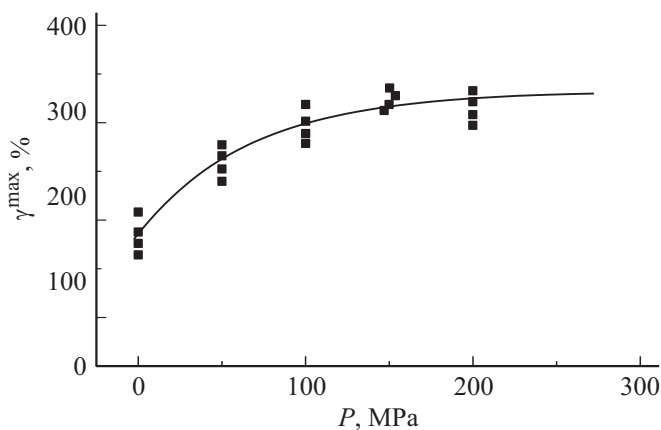


Рис. 4. Зависимость деформации до разрушения γ^{MAX} от величины гидростатического давления P после предварительного деформирования на $\gamma_0 = -25\%$ (образцы С).

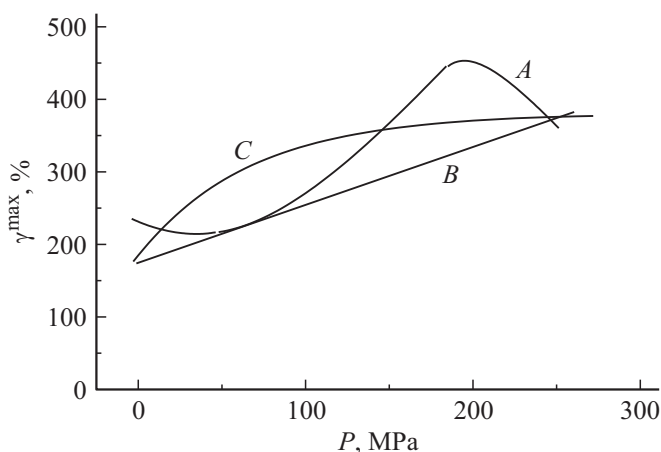


Рис. 5. Кривые зависимостей $\gamma^{\text{MAX}}(P)$ для образцов А, В, С.

изменении давления с 0 до 250 МПа величина γ^{MAX} постепенно увеличивается от 175 до 375%, т.е. в 2.14 раза. В случае же предварительной деформации $\gamma_0 = -25\%$ (образцы С, рис. 4) зависимость $\gamma^{\text{MAX}}(P)$ оказывается затухающей: давление увеличивает пластичность меди лишь в диапазоне 0–150 МПа с $\gamma^{\text{MAX}} = 175\%$ до $\gamma^{\text{MAX}} = 320\%$ (в 1.83 раза), а дальнейшее его увеличение до 250 МПа (и даже однократно — до 270 МПа) эффектами не сопровождается. В этом последнем случае ситуация качественно повторяет ту, что была в работе [4], когда на медь после отжига перед опытами предварительно никак не воздействовали. Это значит, что как и предполагалось, случай с предварительной деформацией $\gamma_0 = -25\%$ подобен случаю $\gamma_0 = 0$, т.е. наличие предварительной деформации γ_0 на вид зависимости $\gamma^{\text{MAX}}(P)$ не влияет. Судя по всему, здесь более важным условием является концентрация вакансий.

Для лучшей демонстрации различий в поведении материала под давлением аппроксимирующие линии с рис. 2–4 сведены воедино на рис. 5. Отсюда видно, что изменением исходного состояния можно существен-

но влиять на зависимость пластичности материала от давления, так что, например, относительно большая пластичность образцов А при $P = 0$ уже при $P = 70$ МПа практически сравнивается с пластичностью образцов В и становится заметно меньше пластичности образцов С. При $P = 200$ МПа ситуация меняется и образцы А опять становятся более пластичными, чем В и С. Наконец, при $P = 250$ МПа пластичность всех образцов сравнивается, причем выявляется тенденция к тому, что при $P > 250$ МПа величина γ^{MAX} для образцов А может быть меньше, чем для В и С. Иными словами, соотношение величин γ^{MAX} для разных образцов оказывается в сложной зависимости от уровня действующего давления.

2. Обсуждение полученных результатов

Полученные данные позволяют заключить, что при малом значении относительной концентрации вакансий N_A понижающий фактор действия давления на пластичность меди имеет заметную роль при малых (от 0 до 70 МПа) и особенно при высоких (более 200 МПа) значениях давления. При средних значениях этой концентрации N_C понижающий фактор действует преимущественно при средних и высоких давлениях ($P > 150$ МПа). При высоких значениях N_B понижающий фактор если и действует, то равномерно для всего изученного диапазона давлений, причем его действие всегда явно меньше фактора, повышающего пластичность материала. Можно сказать, что увеличение концентрации вакансий от N_A до N_B через промежуточное значение N_C (см. на рис. 5 линии с соответствующими обозначениями) приводит к выравниванию реакции материала на разные уровни давления (в рамках изученного диапазона) и постепенному уменьшению роли фактора, понижающего пластичность материала под давлением. Настоящее исследование не позволяет выявить механизм действия этого фактора, так что необходимо дальнейшее изучение этого вопроса с привлечением, например, металлографических и структурных методов.

Заключение

1. Действие всестороннего давления от 0 до 250 МПа на деформационные свойства меди зависит от ее исходного состояния.

2. После выдержки в жидком азоте зависимость деформации кручения до разрушения от давления имеет немонотонный характер с пиком при 200 МПа. Деформирование под давлением в режиме реализации эффекта Баушингера дает линейный характер такой зависимости. Значительное по величине предварительное деформирование (25%) в направлении, противоположном направлению деформирования в барокамере, приводит к тому, что с ростом давления его действие уменьшается.

Список литературы

- [1] Рябинин Ю.Н., Лившиц Л.Д., Верещагин Л.Ф. // ЖТФ. 1957. Т. 27. Вып. 10. С. 2321–2325.
- [2] Мартынов Е.Д., Береснев Б.И., Родионов К.П., Рябинин Ю.Н., Гаврилюк М.И. // ФММ. 1967. Т. 23. Вып. 6. С. 1049–1054.
- [3] Ермолаев Г.Н. // ФММ. 2000. Т. 89. № 4. С. 86–90.
- [4] Егоров С.А. // ЖТФ. 2013. Вып. 11. С. 52–55.
- [5] Ниненко С.И., Ермолаев Г.Н., Урусовская А.А., Даринская Е.В. // ФТТ. 1987. Т. 29. Вып. 10. С. 3154–3156.