

05

Об особенности влияния всестороннего давления на пластичность меди

© С.А. Егоров

Математико-механический факультет Санкт-Петербургского государственного университета,
198905 Санкт-Петербург, Россия
e-mail: truhtin@mail.ru

(Поступило в Редакцию 21 февраля 2013 г.)

Создана новая методика, позволяющая строить кривые напряжение–деформация во время кручения при гидростатическом давлении до 250 МПа. С ее помощью изучено влияние давления на величину деформации кручения до разрушения меди. Опыты указывают на увеличение пластичности материала в интервале давлений от 0 до 150 МПа, и на ее неизменность в интервале от 150 до 250 МПа. Предположительно такая реакция материала связана с тем, что давление может увеличивать плотность дислокаций, необходимых для пластического течения.

Введение

После классических исследований Бриджмена [1] общепринятым стало мнение о том, что повышение давления приводит к увеличению деформации до разрушения твердых тел. Объяснялось это в первую очередь тем, что давление залечивает дефекты. Кроме того, позже был осознан еще один механизм увеличения пластичности давлением — через создание им эффекта торможения скорости дислокаций V [2]. Однако еще в работе [3] было показано, что давление не всегда увеличивает пластичность, и что, например, в случае растяжения ($\alpha + \beta$)-латуни (Л 60) при комнатной температуре гидростатическое давление P увеличивает деформацию до разрушения лишь до значения $P = 400$ МПа, а дальнейшее его повышение вплоть до 3 GPa не сопровождается заметными эффектами. В работе [4] подобное явление было зафиксировано и для других металлических материалов. К сожалению, авторы этих работ ограничились констатацией явления, а его механизм остался неясным. Возможные причины подобных феноменов изучал Г.Н. Ермолаев в работе [5] на примере разных материалов (TiNi, α - и $\alpha + \beta$ -латуни, тефлон, монокристаллы Fe–3% Si), где он показал, что давление неоднозначно влияет на их прочностные характеристики, а также на пластичность обоих видов латуни. Объяснялось это нестабильностью структуры изученных веществ, находившихся или в преддверии фазовых мартенситных переходов (TiNi, латуни, тефлон), или ориентированных благоприятно для двойникования (монокристаллы железа растягивались в соответствующем направлении). Конечно, нельзя полностью исключить, что некоторые из использованных в работах [3,4] материалы были в нестабильном состоянии, но это не может касаться молибдена и вольфрама, изученных в работе [4]. Поэтому исследования [5] не могут полностью объяснить механизм замедления влияния больших давлений (в соответствующем интервале) на предельную пластичность твердых тел. Следовательно, вопрос о том, почему имеется такой эффект, по-

прежнему остается актуальным и требует изучения, чему и посвящена настоящая работа на примере меди, устойчивой к полиморфным изменениям и к процессам двойникования (отметим, что двойникование меди возможно на развитых этапах деформирования, например, на наковальнях Бриджмена или в иных случаях, когда имеют место значительные градиенты напряжений [6], чего в наших опытах не было). При этом важно, что медь до сих пор не изучалась на предмет зависимости ее деформации до разрушения от давления, что повышает актуальность настоящей работы.

1. Подготовка к проведению экспериментов

До сих пор во всех известных автору работах по рассматриваемой тематике схема деформирования на кручение не использовалась. Это сильно обедняло общий массив данных. В связи с этим было решено провести барические опыты, когда деформирование осуществляется кручением. Для этого была создана соответствующая методика. За основу взяли установку высокого давления, подробно описанную в [7]. К ней была разработана и установлена специальная оснастка, в результате чего аппаратура получила вид, схематически показанный на рис. 1. Здесь давление P в рабочей камере 1 создавалось нагнетанием машинного масла насосом и мультипликатором (на схеме не указаны) до уровня 250 МПа. С помощью вала 2 вращение на угол $\Delta\varphi$ передавалось внутрь этой камеры. Движение от вала 2 передавалось валу 4 через спиралевидную пружину 3. Вал 4 центровался подшипником 5 и находился на одной оси с валом 2 и с образцом 6, который был закреплен к нему (к валу 4) своим верхним подвижным концом. Нижний конец образца крепился в неподвижном захвате. Таким образом, поворот вала 2 приводил к возникновению крутящего момента M на образце и его деформированию. Величину этой деформации γ , фактически — угол кручения подвижной головки образца $\Delta\varphi$

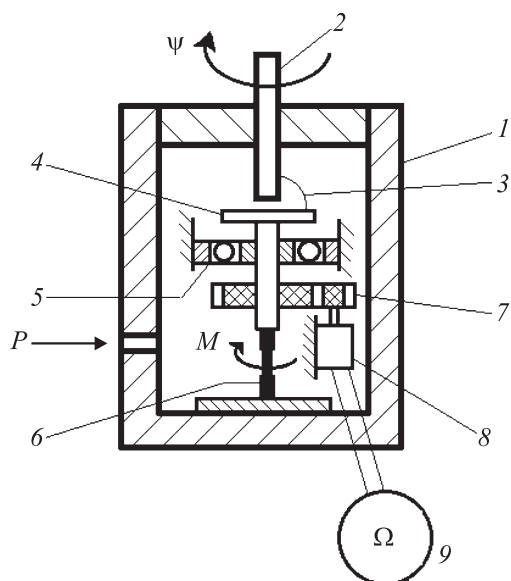


Рис. 1. Схема установки для испытаний образцов на кручение при гидростатическом давлении P : 1 — корпус рабочей камеры, 2 — вал, передающий вращение внутрь рабочей камеры, 3 — спиралевидная стальная пружина, 4 — вал, передающий движение кручения потенциометру 8 и создающий на образце 6 крутящий момент M , 5 — шарикоподшипник, 6 — образец, 7 — шестеренчатая пара, 8 — многооборотный потенциометр, 9 — омметр.

(равный углу кручения вала 4), определяли с помощью многооборотного (общий ресурс — 49 оборотов) проволочного потенциометра 8, вращение к которому от вала 4 передавалось посредством шестеренчатой пары 7. Измерения изменений электросопротивления R потенциометра осуществляли омметром 9, находящимся вне камеры давления. При переводе этих показаний в величину $\Delta\varphi$ учитывали зависимость электросопротивления от действующего давления, которую определили в специальных тестовых опытах. Ясно, что разница ($\Delta\psi - \Delta\varphi$) однозначно характеризовала фактическую степень закрутки пружины 3, а значит, величину момента M , деформирующего образец. Здесь мы пренебрегали зависимостью упругих констант материала пружины от давления, т.е. не вводили в данную зависимость M от ($\Delta\psi - \Delta\varphi$) поправку, связанную с давлением, поскольку она была пренебрежимо мала. Отметим, что зависимость M от ($\Delta\psi - \Delta\varphi$) была линейной при значениях ($\Delta\psi - \Delta\varphi$) от 0 до 1.89π , что налагало требование к величине диаметра рабочей части изучаемых образцов (с учетом их прочностных свойств), чтобы величина деформирующего момента M не выходила за рамки этой линейности.

Из описания работы установки видно, что знание двух параметров $\Delta\psi$ и $\Delta\varphi$ во время деформирования позволяло определить текущую деформацию кручения γ и крутящий момент M , т.е. напряжение сдвига τ . Иными словами, созданная методика позволяет стро-

ить кривые напряжение—деформация для кручения при разных давлениях. Кроме того, она позволяет изучать очень пластичные материалы, вплоть до случаев, когда деформация до разрушения составляет несколько тысяч процентов.

В качестве объекта исследований была выбрана электротехническая поликристаллическая медь М1 (чистота 99,9%). Из проволоки диаметром 2,4 мм было изготовлено 40 образцов длиной 40 мм с рабочей частью диаметром 1,3 мм и длиной 4 мм, которую вытачивали методом круглой шлифовки, когда вращающийся образец обрабатывается вращающимся абразивным инструментом. После отжига при температуре 870 К (выдержка 40 мин, охлаждение в печи) и окончательной шлифовки рабочие размеры определяли с помощью микроскопа с точностью $\pm 1 \mu\text{m}$.

2. Экспериментальные результаты

Опыты выполняли следующим образом. После установки образца в камеру высокого давления и достижения в ней необходимого давления при комнатной температуре производили кручение (с темпом приблизительно 1 оборот за 3 мин) до разрушения, факт которого определяли по необычно резкому и значительному росту электросопротивления R : образец 6 после разрушения переставал сдерживать закрученную пружину 3 (рис. 1), и та, моментально раскручиваясь, передавала потенциометру 8 дополнительное движение, формируя скачок ΔR . По мере деформирования фиксировали значения ψ и R с последующим их пересчетом в τ и γ . Для каждого из изученных случаев $P = 0, 50, 100, 150, 200$ и 250 МПа изучали по 5–6 образцов. Характерные результаты представлены на рис. 2: линии 1 и 2 — для давлений 0 и 200 МПа соответственно. Эти линии не гладкие, что связано с наличием трения в системе передачи крутящего момента от вала 2 к потенциометру 8. Тем не менее видно, что увеличение давления приводит к увеличению как деформации до разрушения γ^{max} , так и

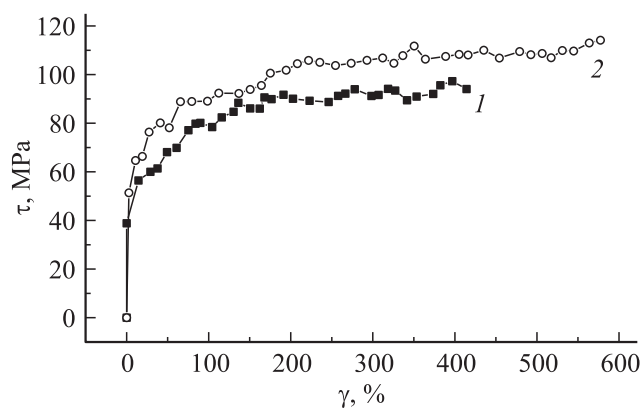


Рис. 2. Кривые упрочнения при давлении 0 (линия 1) и 200 МПа (линия 2).

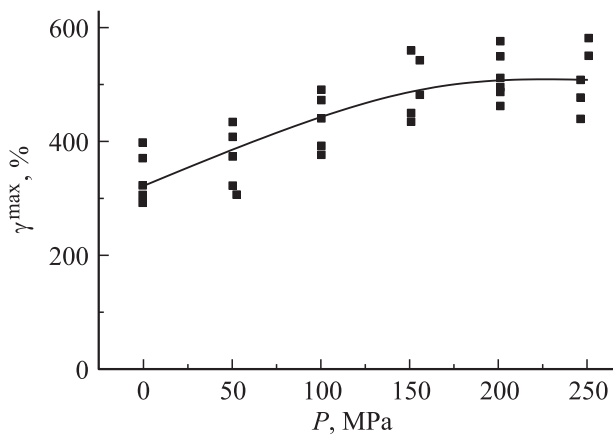


Рис. 3. Зависимость деформации до разрушения γ^{\max} от величины гидростатического давления P .

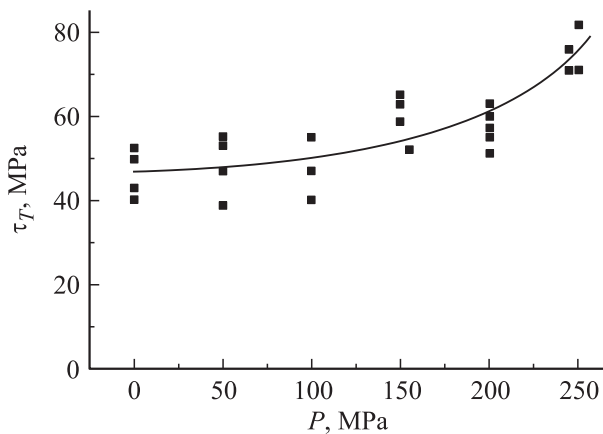


Рис. 4. Зависимость предела текучести τ_T от величины гидростатического давления P .

прочностных характеристик материала. Подробнее обо всем этом можно судить по рис. 3 и 4.

Так, на рис. 3 показана зависимость величины γ^{\max} от P . Здесь несмотря на разброс данных, связанный в основном с неодинаковым качеством рабочих поверхностей образцов, видна общая тенденция, выраженная сплошной линией: повышение давления сопровождается увеличением пластичности материала лишь до $P = 150$ МПа, а дальнейшее его увеличение до 250 МПа пластичность не увеличивает. Эта ситуация качественно совпадает с тем, что было описано в [3,4]. Однако если там можно было подозревать наличие в ряде материалов той или иной фазовой нестабильности, то в нашем случае таких подозрений нет.

Судя по всему, следует говорить о существовании нескольких факторов действия давления, и конечный результат зависит от их конкуренции. Как показывают наши опыты, в диапазоне давлений 150–250 МПа фактор, понижающий пластичность меди, по силе воздействия оказывается соразмерным с факторами, повышающим ее

пластичность. Возможная его природа будет рассмотрена ниже.

На рис. 4 даны результаты определения предела текучести τ_T при разных значениях давления P . Сплошная средняя линия выявляет тенденцию на увеличение τ_T с ростом P , причем при максимальном в наших опытах давлении 250 МПа эта тенденция только усиливается.

Изучение поверхности разрушения не выявило каких-либо особенностей, возникающих в связи с изменением давления. Во всех случаях характер скола был обычный (вязкий) для данного материала, а сама поверхность располагалась почти перпендикулярно к оси симметрии, в соответствии с полосами скольжения.

3. Обсуждение полученных результатов

Природу затухания влияния давления на пластичность меди, начинающуюся проявляться с $P = 150$ МПа (рис. 3), нельзя объяснить нестабильностью структуры материала. Во-первых, в меди нет фазовых полиморфных переходов. Во-вторых, положительная зависимость $\tau_T(P)$, выявляемая на рис. 4, не позволяет говорить о вызываемом давлением разупрочнении, что могло бы служить индикатором структурных переходов или подготовки к ним. Об этом же свидетельствует и рис. 5, на котором даны отношения напряжения разрушения τ_r к величине τ_T при разных значениях P : видно, что давление в изученном диапазоне уменьшает интенсивность упрочнения (наклепа), так что тангенс угла наклона к оси P в этой линейной зависимости приблизительно равен $\beta = -1 \text{ GPa}^{-1}$, однако это уменьшение плавное, без скачков. Возможно, некоторый вклад в обсуждаемое явление может вносить межзеренная анизотропия, при которой наложение давления приводит к возникновению внутренних напряжений сдвига и которые, начиная с некоторой величины P , в сумме с приложенным напряжением служат дополнительным фактором разрушения.

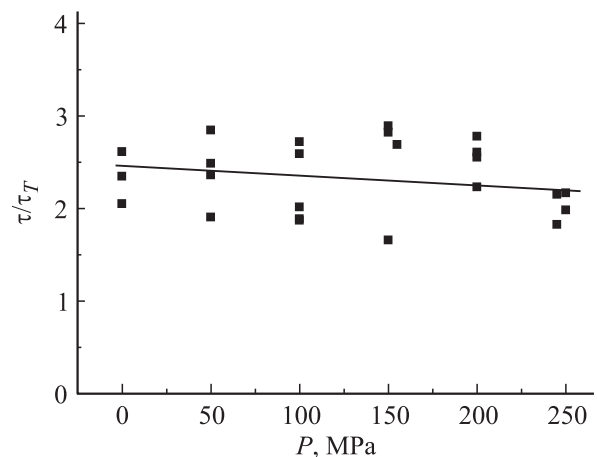


Рис. 5. Зависимость отношения напряжения разрушения τ_r к пределу текучести τ_T при разных давлениях P .

Однако для изучаемого материала это объяснение, очевидно, не может быть основным вследствие его фазовой однородности и кубической симметрии кристаллической решетки.

В то же время не исключено следующее. Активное деформирование меди при комнатной температуре в основном осуществляется за счет движения дислокаций и их конгломератов, сопровождающееся испусканием вакансий. Это приводит к распуханию материала, и возникает эффект, когда под давлением растет плотность дислокаций, необходимая для начала пластического течения [8], а значит, возникает фактор, направленный на уменьшение предельной пластичности. В качестве подтверждения этого предположения можно использовать тот факт, что в нашем случае под давлением деформирующее напряжение увеличивается существенно сильнее, чем это следует из простого барического увеличения упругих констант материала согласно формуле [9]:

$$\tau_T = \tau_{T0}(1 + dG/dP)(1 + P/K)^2, \quad (1)$$

где G — модуль сдвига, K — модуль всестороннего сжатия. Действительно, с учетом имеющихся данных [10] для меди при $P = 250$ МПа увеличение предела текучести, согласно этому выражению, должно находиться на уровне 1%, тогда как из рис. 4 видно, что реальное увеличение принципиально больше, и составляет приблизительно 65%. Ясно, что это различие естественно связать с неучтенным в (1) деформационным увеличением объема, которое при наличии давления является дополнительным энергетическим барьером для формоизменения.

Надо сказать, что авторы работы [8], предложив вполне правдоподобную гипотезу о причинах барического увеличения напряжения течения, дополнили ее не вполне адекватной формулой:

$$\tau_T = \tau_{T0}[1 + (1 + dG/dP)P/G](1 + \beta P^2), \quad (2)$$

из которой следует, что для нашего случая должно быть $\tau_T/\tau_{T0} < 1$ (ввиду отрицательности коэффициента β). Это явно неверно. Тем не менее, думается, что сам подход в виде рассмотрения затруднения деформирования под давлением вследствие деформационного распухания материала вполне реалистичен, поскольку в нем увязывается вместе как аномально сильное (относительно формулы (1)) увеличение предела текучести под давлением, так и существование барического фактора, направленного на уменьшение пластичности.

Таким образом, можно думать, что давление создает два противоположных действия и их конкуренция вместе с эффектом торможения дислокаций под давлением [2] формирует зависимость $\gamma^{\max}(P)$. Это может объяснить как ситуацию с изученной нами медью, так и с материалами из работ [3,4].

Заключение

1. Создана новая методика изучения диаграмм деформирования на кручение при давлениях до 250 МПа.
2. При кручении меди всестороннее давление увеличивает деформацию до разрушения лишь в интервале до 150 МПа, а дальнейшее его увеличение до 250 МПа пластичность не увеличивает. Это связывается с возникновением фактора, направленного на уменьшение пластичности. Видимо, его природа заключается в том известном факте, что под давлением плотность дислокаций для пластического течения должна быть больше.

Список литературы

- [1] Бриджмен П. Исследования больших пластических деформаций и разрыва. Влияние высокого гидростатического давления на механические свойства материалов / Под ред. Л.Ф. Верещагина. М.: Изд-во ИЛ: 1955. 444 с.
- [2] Малашенко В.В., Перетолчина Г.Б., Улицкая Н.Ю. // XX Петербургские чтения по проблемам прочности, посвященные памяти профессора В.А. Лихачева. 10–12 апреля 2012 г., СПб. Сб. матер. Ч. 2. СПб. 2012. С. 223–225.
- [3] Рябинин Ю.Н., Лившиц Л.Д., Верещагин Л.Ф. // ЖТФ. 1956. Т. 27. Вып. 10. С. 2321–2325.
- [4] Мартынов Е.Д., Береснев Б.И., Родионов К.П., Рябинин Ю.Н., Гаврилюк М.И. // ФММ. 1967. Т. 23. Вып. 6. С. 1049–1054.
- [5] Ермолаев Г.Н. // ФММ. 2000. Т. 89. Вып. 4. С. 86–90.
- [6] Тюменцев А.Н., Панин В.Е., Дитенберг И.А., Пинжис Ю.П., Коротаев А.Д., Деревягина Л.С., Шуба Я.В., Валиев Р.З. // Физическая мезомеханика. 2001. Т. 4. № 6. С. 77–85.
- [7] Беляев С.П., Егоров С.А., Лихачев В.А., Ольховик О.Е. // ЖТФ. 1996. Т. 66. Вып. 11. С. 36–46.
- [8] Ниненко С.И., Ермолаев Г.Н., Урусовская А.А., Даринская Е.В. // ФТТ. 1987. Т. 29. Вып. 10. С. 3154–3156.
- [9] Yung J. // Phil. Mag. A. 1981. Vol. 43. N 4. P. 1057–1061.
- [10] Францевич И.Н., Воронов Ф.Ф., Бакута С.А. Упругие постоянные и модули упругости металлов и неметаллов. Справочник. Под ред. Акад. АН УССР И.Н. Францевича. Киев: Наукова думка. 1982. 286 с.