

МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ



УДК 539.4.

В.Г.Малинин

ОСОБЕННОСТИ ПРОЦЕССОВ СЛОЖНОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ
КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

The diagrams of deformation of the steel with a low level of carbon with a double-linked trajectory of loading have been investigated. The influence of the deformed strength in macro-elastic field has been discovered. The influence of putting on high hydrostatic pressure and the time of exposure of the material under the loading on deformation qualities have been studied.

Конструкционные материалы, как правило, имеют сложную организацию, содержащую многоуровневую систему структурных концентраторов уже в исходном (до нагружения) состоянии. Естественно, что в этом случае структурно-механическая реакция материала может в значительной мере зависеть от влияния вида напряженного состояния и траектории нагружения в пространстве напряжений при нагружении как в макроупругой, так и в макропластической области. Имеются масштабные и систематические исследования деформационных свойств конструкционных материалов при разнообразных траекториях нагружения в упруго-пластической стадии деформирования. Наиболее впечатляющие результаты получены с помощью использования комплекса СНТ-ЭВМ в Тверской школе пластичности под руководством В.Г.Зубчанинова [1]. В то же время указанные исследования направлены, как правило, на изучение влияния истории нагружения в макропластической области. Практически отсутствуют экспериментальные данные по влиянию истории нагружения в макроупругой стадии, поэтому экспериментальные исследования в указанном направлении имеют большой научный и практический интерес.

Исследования выполнялись на тонкостенных цилиндрических образцах при двух схемах двухзвенной траектории нагружения с ортогональным изломом: растяжение \rightarrow кручение, так называемые $P \rightarrow M$ опыты, и кручение \rightarrow растяжение, или $M \rightarrow P$ опыты. Варьировалась величина первого звена траектории нагружения с целью выяснения влияния резкого излома траектории при различных значениях напряжений в макроупругой и макропластической областях. Особое внимание уделялось экспериментальной оценке влияния времени выдержки после первого звена траектории нагружения на последующую кривую деформации при нагружении на втором звене. Значительный интерес представляют результаты опытов по вышеуказанным режимам нагружения в условиях наложения высокого гидростатического давления (ВГД). Каждый режим нагружения выполнялся на трех образцах с определением средних значений и соответствующих отклонений. Разброс экспериментальных данных не превышал 5% от величины интенсивности полной деформации ϵ_i и интенсивности напряжений σ_i .

На рис.1-2 приведены результаты испытаний тонкостенных цилиндрических образцов из стали Ст3 при двухзвенных траекториях нагружения с ортогональным изломом траектории в макроупругой области. Режим нагружения осуществлялся в условиях активного нагружения, т. е. без выдержек образцов под действием фиксированной нагрузки.

Результаты опытов представлены в совмещенных координатах. На первом звене траектории нагружения используется система координат $(\sigma_{\phi i} / \sigma_{iT}) \epsilon_i$, где $\sigma_{\phi i}$ — величина интенсивности напряжения, соответствующая первому звену, σ_{iT} — величина предела те-

кучести, выраженная через значения интенсивности напряжения. Параметр $\sigma_{\phi i} / \sigma_{iT}$ характеризует относительную величину первого звена траектории по отношению к пределу текучести. Результаты опыта на втором звене траектории нагружения представлены в координатах $\tau - \gamma$ при $P \rightarrow M$ опытах (рис.1) и в координатах $\sigma - \epsilon$ при $M \rightarrow P$ опытах (рис.2). Скорости деформации на активных участках нагружения осуществлялись одни и те же: $\dot{\epsilon} = 3,03 \cdot 10^{-4} \text{ c}^{-1}$ и $\dot{\gamma} = 7,1 \cdot 10^{-4} \text{ c}^{-1}$.

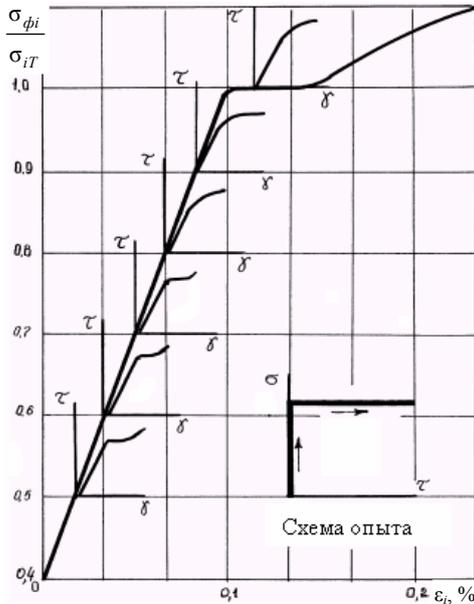


Рис.1. Кривые деформации в совмещенных координатах $\sigma_{\phi i} / \sigma_{iT} \sim \epsilon_i$ и $\tau \sim \gamma$, полученные в результате $P \rightarrow M$ опытов

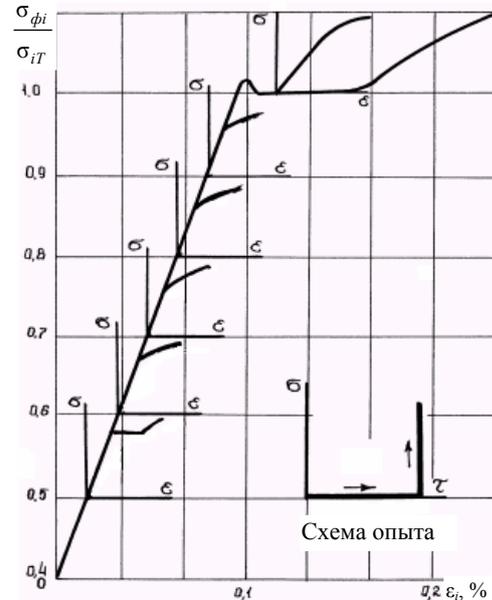


Рис.2. Кривые деформации в совмещенных координатах $\sigma_{\phi i} / \sigma_{iT} \sim \epsilon_i$ и $\sigma \sim \epsilon$, полученные в результате $M \rightarrow P$ опытов

Анализируя полученные результаты, можно отметить следующее. Двухзвенная траектория нагружения с ортогональным изломом в макроупругой области деформирования качественно меняет характер локализации макропластической деформации. Данный эффект проявляется в уменьшении, а затем и полном исчезновении площадки текучести в зависимости от величины $\sigma_{\phi i}$ на первом звене траектории. Примечательно, что в $M \rightarrow P$ опытах (рис.2) площадка текучести на диаграмме деформации на втором звене исчезает уже при $\sigma_{\phi i} / \sigma_{iT} = 0,6$, а в опытах $P \rightarrow M$ (рис.1) — при $\sigma_{\phi i} / \sigma_{iT} = 0,8$. Приведенные данные обращают внимание на влияние истории нагружения в пространстве напряжений в макроупругом состоянии на характер последующей макропластической деформации.

Результаты испытаний экспериментальных образцов при тех же режимах нагружения в условиях положения гидростатического давления представлены на рис.3.

Сравнивая рис.3а и рис.3в видим, что диаграмма деформации $\tau - \gamma$ на втором звене в условиях действия ВГД имеет несколько меньшее значение предела пропорциональности, чем на том же участке без наложения ВГД, разница составляет $\approx 14\%$.

Анализируя графики деформации на втором звене траектории нагружения в условиях ортогонального излома в макропластической области (рис.3б и рис.3г), можно отметить наличие на начальном этапе нагружения прямолинейного участка, наклон которого зависит от степени предварительной пластической деформации, увеличиваясь с ростом величины пластической деформации на первом звене (упругий участок деформирования представлен

пунктирной линией). Характерно, что в этих опытах влияние ВГД увеличивает сопротивление пластической деформации.

Представляют интерес результаты опытов, выполненных по той же схеме нагружения, но в которых после первого звена траектории нагружения производилась выдержка образца при постоянном значении растягивающего напряжения в течение $\Delta t = 20$ мин, а затем образец нагружали касательным напряжением согласно траектории второго звена. Можно отметить существенное влияние фактора времени выдержки образцов после первого звена траектории нагружения на последующую диаграмму деформации. Причем наличие ВГД оказывает нетривиальное влияние на сопротивление деформации. Сравнивая полученные данные, видим, что выдержка образца под нагрузкой в течение 20 мин в условиях ВГД значительно (на 17%) увеличила предел пропорциональности при последующем нагружении на втором звене траектории.

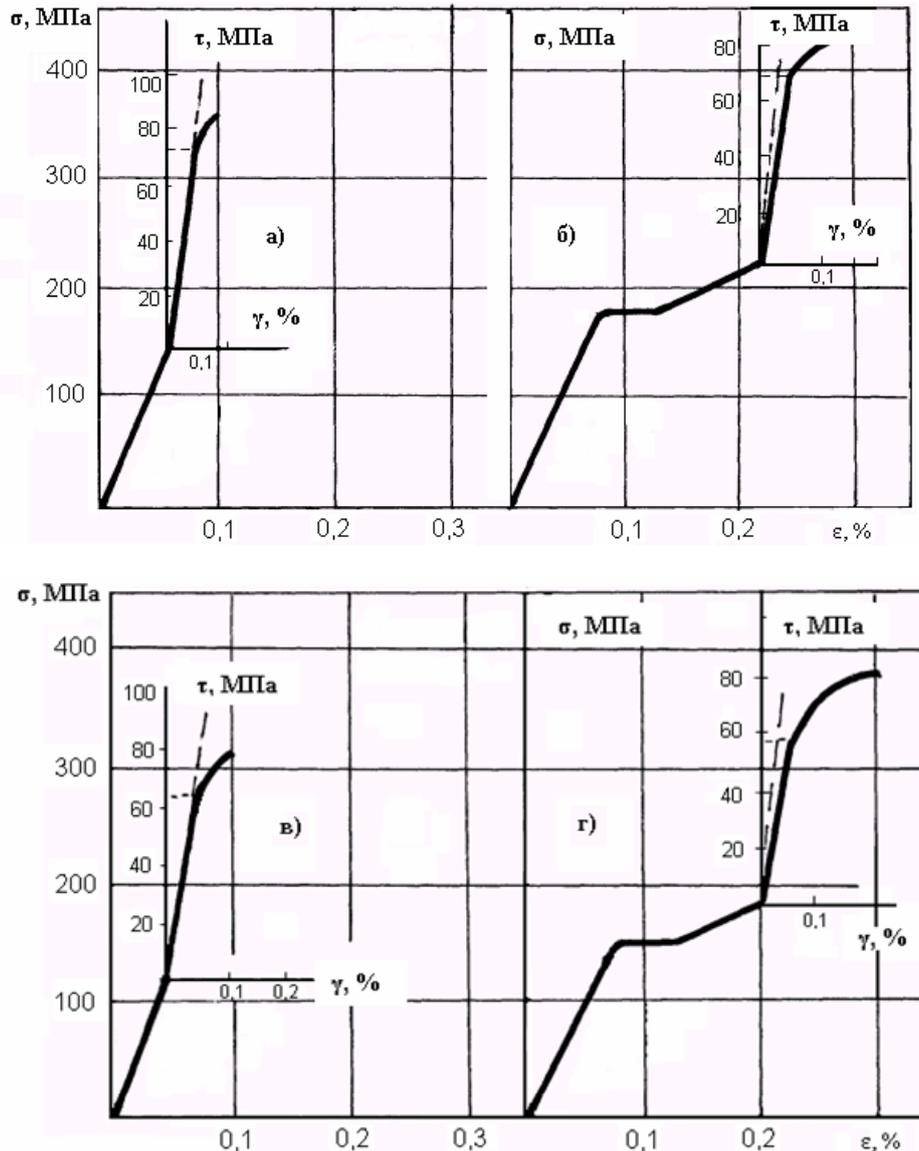


Рис.3. Результаты испытаний при двухзвенных траекториях нагружения (растяжение → кручение) с ортогональным изломом в макроупругой (а, в) и в макропластической (б, г) областях деформирования: а, б — без ВГД; в, г — в условиях ВГД ($q = 230$ МПа)

Нагружение по двухзвенной траектории в условиях ортогонального излома в макропластической области при наличии фактора выдержки под нагрузкой привело к появлению на начальном этапе практически упругого участка. В рассматриваемых опытах наличие ВГД приводило к уменьшению сопротивления пластическому деформированию на этапе нагружения по второму звену траектории.

В заключение необходимо отметить следующее. Деформационные эффекты, наблюдаемые в опытах, содержащих фактор выдержки образцов под постоянной нагрузкой, убедительно свидетельствуют о важной роли исходной многоуровневой системы структурных концентраторов напряжений, а также о тех внутренних напряжениях, которые содержатся в реальном изделии еще до нагружения тела. По оценкам, полученным на основе физических методов исследования [2,3], для большинства малоуглеродистых сталей средний уровень внутренних напряжений, обусловленных неоднородностью структуры, равен 60÷80 МПа, т.е. составляет $\approx 0,3$ от предела текучести этих материалов [3]. Следует подчеркнуть роль исходной многоуровневой системы структурных концентраторов, которые при различных схемах напряженного состояния образца создают различные внутренние поля напряжений в окрестности указанных структурных концентраторов, что и проявляется в деформационных эффектах влияния вида напряженного состояния и истории нагружения в макроупругой области. Наличие этапа выдержки материала под нагрузкой в макроупругой области приводит к релаксации наиболее острых структурных концентраторов в виде микропластических деформаций в направлениях, соответствующих виду напряженного состояния образца, обуславливая тем самым «выравнивание» исходных локальных структурных напряжений. Характерным результатом, подтверждающим данное предположение, является наличие эффекта существенного увеличения участка однородной и предельной пластической деформации в образцах, когда выдержка материала производилась в условиях наложения ВГД ($q = 230$ МПа) именно в макроупругой области. Баромеханическая обработка образцов при выдержке материала в макропластической области весьма слабо влияла на увеличение предельной пластичности испытываемых образцов.

Приведенные выше экспериментальные результаты свидетельствуют о необходимости при формулировании определяющих соотношений учитывать процессы формирования микропластических деформаций, обусловленных наличием структурных концентраторов.

Работа выполнена при содействии РФФИ (грант №04-01-00573).

1. Зубчанинов В.Г., Охлопков Н.Л., Гараников В.В. Экспериментальная пластичность. Кн. 1. Процессы сложного деформирования. Тверь: ТГТУ, 2003. 172 с.
2. Физическое металловедение: В 3-х т. 3-е изд. перераб. и доп. / Пер. с англ. Под ред. Р.У.Канна, П.Г.Хаазена. Т.3. Физико-механические свойства металлов и сплавов. М.: Металлургия, 1987. 663 с.
3. Дубов А.А. Метод магнитной памяти (ММП) металла и приборы контроля: Учеб. пособие. М., 2001. С.179.