

ВЛИЯНИЕ ВИДА НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ И ИСТОРИИ НАГРУЖЕНИЯ, КАК ОПРЕДЕЛЯЮЩИЕ ФАКТОРЫ РЕЛАКСАЦИОННОЙ ОБРАБОТКИ СТАЛЬНЫХ ИЗДЕЛИЙ

Малинин В.Г., Димов А.А.

Ключевые слова: история нагружения в пространстве напряжений, макроупругая область деформации, структурные напряжения, релаксационная обработка, высокое гидростатическое давление.

Аннотация. Экспериментально исследованы возможности релаксационной обработки стальных изделий с учетом влияния вида напряженного состояния, высокого гидростатического давления, истории нагружения в пространстве напряжений при вариации режимов нагружения во времени. Особое внимание уделяется исследованию названных условий релаксационной обработки в макроупругом интервале деформации.

THE INFLUENCE OF THE TYPE OF STRESS STATE AND LOADING HISTORY, AS THE DETERMINING FACTORS OF RELAXATION TREATMENT OF STEEL PRODUCTS

Malinin V.G., Dimov A.A.

Keywords: stress loading history, macroelastic deformation zone, structural stresses, relaxation treatment, high hydrostatic pressure.

Abstract. The possibilities of relaxation treatment of steel products were experimentally investigated taking into account the influence of the type of stress state, high hydrostatic pressure, loading history in the space of stresses with variations in loading modes with time. Special attention is paid to the study of these conditions of relaxation treatment in the macroelastic strain range.

Постановка задачи. Экспериментальные исследования, приводимые в данной статье, ставились с целью изучения влияния на механические свойства конструкционной стали Ст3, имеющую кубическую кристаллическую решетку, влияние кратковременных выдержек материала под нагрузкой при чистом растяжении, чистом кручении и при двухзвенных траекториях нагружения. Кратковременные выдержки выполнялись как в макроупругой, так и в макропластической области деформирования. Исследовано влияние наложения высокого гидростатического давления (ВГД) на деформационные свойства при вышеназванных траекториях нагружения. Методики экспериментальных исследований разрабатывались на основе работ [1, 2].

Испытания проводились по следующим программам релаксационной обработки:

1. Одноосное растяжение с заданной скоростью деформации.
2. Одноосное растяжение с промежуточной выдержкой материала ($\Delta t=20$ мин) при фиксированной ($P_{\phi}=const$) нагрузке.
3. Чистое кручение.
4. Чистое кручение с выдержкой образца ($\Delta t=20$ мин) при фиксированном ($M_{\phi}=const$) крутящем моменте.

5. Растяжение с наложением высокого гидростатического давления (ВГД) 230 МПа

6. Растяжение с наложением ВГД 230 МПа при наличии промежуточной выдержки $P_{\phi} = const$ в течение $\Delta t = 20$ мин.

7. Кручение в условиях ВГД 230 МПа при наличии промежуточной выдержки $M_{\phi} = const$ в течение $\Delta t = 20$ мин.

8. Нагружение по двухзвенным траекториям с ортогональным изломом в режиме растяжение-кручение ($P \rightarrow M$ опыты).

9. Повторение схемы испытания, п. 8, при наложении ВГД 230 МПа.

10. Двухзвенные траектории нагружения с ортогональным изломом в режиме кручение-растяжение ($M \rightarrow P$ опыты).

11. Повторение схемы испытания, п. 10 в условиях ВГД 230 МПа.

Таким образом, в экспериментах менялись:

- 1) вид напряженного состояния;
- 2) уровень гидростатического давления;
- 3) время выдержки материала под нагрузкой в упругой (до предела текучести) и в пластических областях;
- 4) время выдержки в точке ортогонального излома при двухзвенных траекториях нагружения;
- 5) уровень напряжений, при которых осуществляется излом траектории нагружения.

Испытания проводились на универсальном экспериментальном стенде, разработанном на базе серийной испытательной машины Армавирского завода УМЭ-10ТМ. Установка имеет сменные камеры, в которых можно создать внутреннее давление в трубчатом образце, внешнее гидростатическое давление до 1000 МПа, а также температуру до 1100 °С и вести растяжение, сжатие и знакопеременное кручение при различных скоростях деформирования.

1. Режим активного нагружения с постоянной скоростью деформации

На рис. 1 представлены графики, иллюстрирующие диаграммы деформации при чистом растяжении в координатах, нормальное напряжение σ и относительная линейная деформация ε . Скорость деформации в рассматриваемых опытах поддерживалась постоянной и равной $\dot{\varepsilon}' = 3,03 \cdot 10^{-4} \text{ с}^{-1}$. Данные на рис. 1а относятся к чистому растяжению в обычных условиях, а на рис. 1б принадлежат диаграмме растяжения в условиях гидростатического давления $q = 230$ МПа.

Сравнивая графики, изображенные на рис. 1, а, б, можно увидеть, что наложение ВГД слабо влияет на предел текучести ($\sigma_T \approx 177$ МПа) и предел прочности $\sigma_{вр} \approx 360$ МПа. На обоих графиках видна практически одинаковая величина площадки текучести. Характеристика пластичности δ также незначительно зависит от ВГД и составляет $\delta \approx 28\%$ увеличиваясь при наложении ВГД на 5..8%.

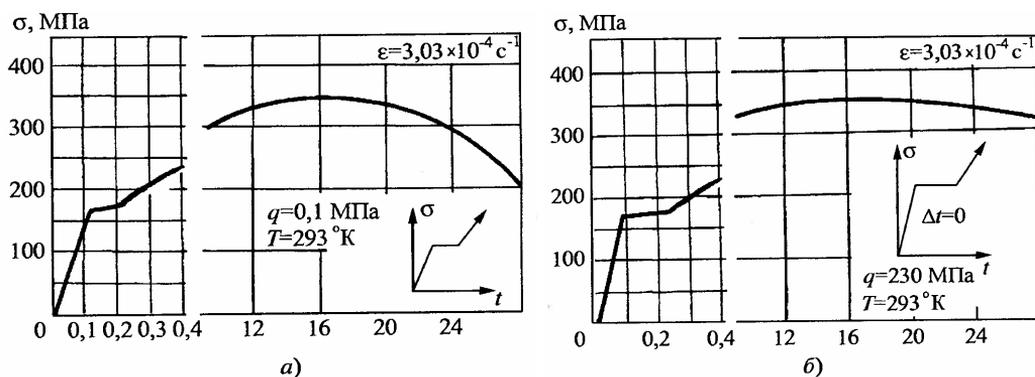


Рис. 1. Результаты испытаний тонкостенных цилиндрических образцов из стали Ст.3: а – при чистом растяжении; б – растяжение в условиях высокого гидростатического давления $q=230\text{МПа}$; скорость деформации $\dot{\epsilon}=3,03\cdot 10^{-4}\text{с}^{-1}$

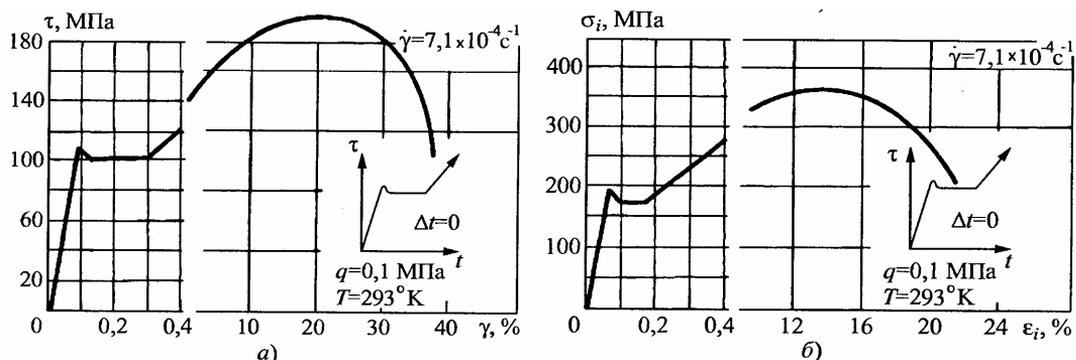


Рис. 2. Результат испытаний тонкостенных цилиндрических образцов из стали Ст3 при чистом кручении при скорости сдвиговой деформации $\dot{\gamma}=7,1\cdot 10^{-4}\text{с}^{-1}$:
 а – в координатах касательное напряжение τ сдвиговая деформация γ ,
 б – в обобщенных координатах – интенсивность напряжений σ_i и интенсивность деформации ϵ_i

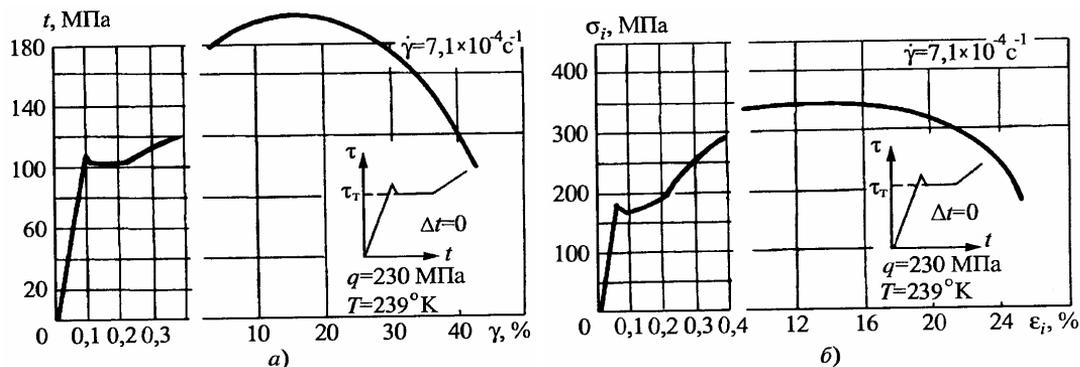


Рис. 3. Результат испытаний тонкостенных цилиндрических образцов из стали Ст3 в условиях кручения и высокого гидростатического давления $q=230\text{МПа}$ при скорости сдвиговой деформации $\dot{\gamma}=7,1\cdot 10^{-4}\text{с}^{-1}$: а – в координатах $\tau - \gamma$, б – в координатах $\sigma_i - \epsilon_i$

На рис.2, рис.3 приведены результаты испытаний тонкостенных трубчатых образцов из стали Ст3 в условиях чистого кручения (рис.2) и кручения с наложением высокого гидростатического давления $q=230$ МПа (рис.3). С целью сравнения полученных результатов при кручении и растяжении данные представлены в двух координатных плоскостях: касательное напряжение τ сдвиговая деформация γ (рис 2 а, рис. 3 а) и в обобщенных координатах $\sigma_i - \epsilon_i$ (рис.2 б, рис.3 б).

Сравнивая диаграммы деформирования при кручении без ВГД и при наложении ВГД величиной 230 МПа, можно отметить, что качественно характер кривой не изменяется. В обоих случаях, как без давления так и при $q=230$ МПа, наблюдается зуб и площадка текучести, однако участок однородной деформации и величина предельной пластичности в условиях деформирования с кручением при наложении ВГД увеличивается существенно больше, чем при растяжении, достигая увеличения на 20..30%.

2.Режим нагружения, содержащий кратковременную выдержку образца, нагруженного постоянной силой

Значительное внимание в экспериментальных исследованиях было уделено анализу влияния времени выдержки нагруженного материала на последующие диаграммы деформации. Опыты проводились при комнатной температуре (20°C). Скорость деформации на этапе активного нагружения при растяжении соответствовали $\dot{\epsilon}'=3,03 \cdot 10^{-4} \text{ c}^{-1}$, а при кручении $\dot{\gamma}'=7,1 \cdot 10^{-4} \text{ c}^{-1}$.

Результаты опытов на образцах из стали Ст3 показали, что влияние фактора времени выдержки, как в макроупругой, так и в макропластической области, нарастает в интервале $\Delta t=15..20$ мин, и при дальнейшем увеличении интервала Δt механическое поведение стабилизируется. Варьировалось время выдержки от одной минуты до одного часа. Аналогичные результаты по влиянию фактора времени выдержки нагруженного материала были получены при испытаниях образцов в условиях наложения гидростатического давления $q=230$ МПа.

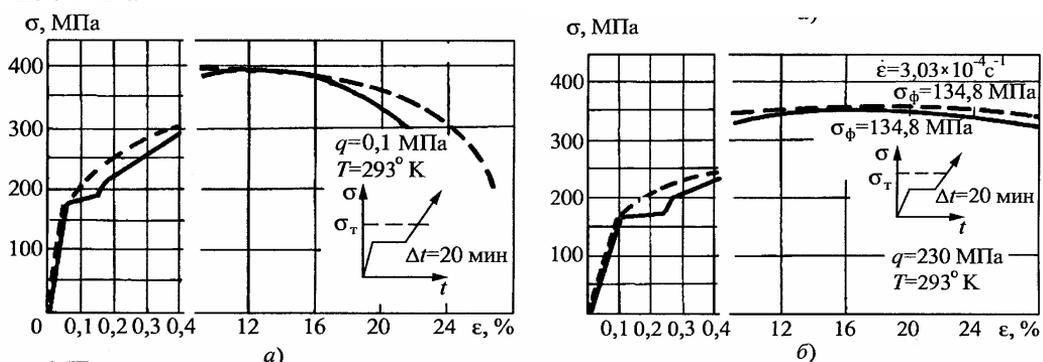


Рис. 4. Результаты испытания тонкостенных цилиндрических образцов из стали Ст3 с выдержкой по времени $\Delta t=20$ мин при постоянном значении растягивающего напряжения σ_{ϕ} в макроупругой (штриховая линия) и в макропластической (сплошная линия) областях деформирования: а – при чистом растяжении, б – растяжение в условиях ВГД ($q=230$ МПа)

Остановимся на типичных экспериментальных данных, полученных в рассмотренной серии экспериментов. На рис.4 представлены результаты испытаний тонкостенных цилиндрических образцов из стали Ст3 с выдержкой во времени $\Delta t=20$ мин при двух значениях постоянного растягивающего напряжения σ_ϕ в макроупругой при $\sigma_\phi=0,77\sigma_T$ (штриховая линия) и в макропластической (сплошная линия) областях деформирования. Результаты на рис.4 представлены в виде графиков: нормальное напряжение σ и относительная линейная деформация ε . Данные, приведенные на графиках рис.4, а, соответствуют случаю чистого растяжения, а результаты, представленные на рис. 4, б, отражают кривые деформации σ - ε в условиях наложения гидростатического давления $q=230$ МПа.

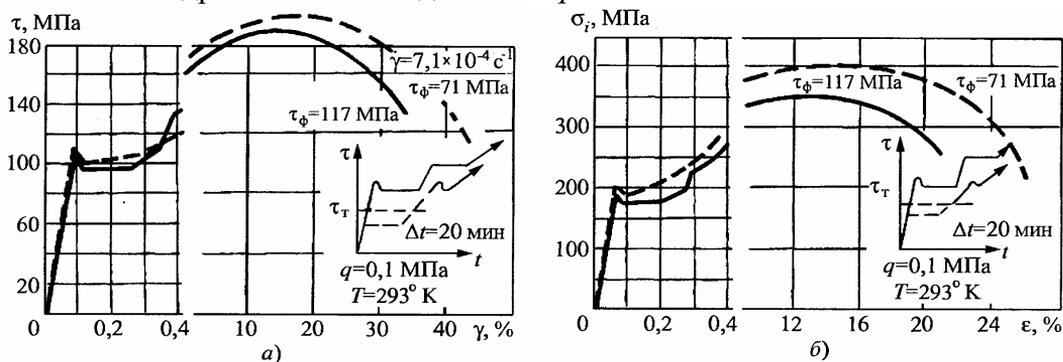


Рис. 5. Результаты испытаний тонкостенных цилиндрических образцов из стали Ст3 при чистом кручении с выдержкой во времени $\Delta t=20$ мин при постоянном значении касательного напряжения τ_ϕ в макроупругой (штриховая линия) и в макропластической (сплошная линия) областях деформирования: а – диаграммы деформирования в координатах $\tau - \gamma$; б – диаграммы деформирования в обобщенных координатах $\sigma_i - \varepsilon_i$

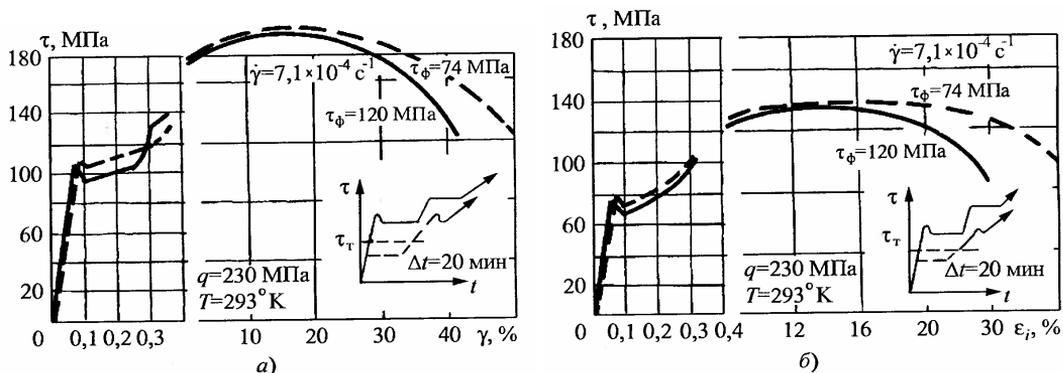


Рис. 6. Результаты испытаний тонкостенных цилиндрических образцов из стали Ст3 при кручении в условиях ВГД $q=230$ МПа с выдержкой во времени $\Delta t=20$ мин при постоянном значении касательного напряжения τ_ϕ в макроупругой (штриховая линия) и в макропластической (сплошная линия) областях деформирования: а – диаграммы деформирования в координатах $\tau - \gamma$; б – диаграммы деформирования в обобщенных координатах $\sigma_i - \varepsilon_i$

На рис.5 и 6 представлены аналогичные результаты испытаний тонкостенных цилиндрических образцов при кручении. Графики представлены в координатах касательное напряжение (τ) – сдвиговая деформация (γ) (рис.5,а и 6,а) и в обобщенных координатах интенсивность напряжений (σ_i) – интенсивность деформаций (ϵ_i) (рис.5,б и 6,б). Как и при испытаниях растяжением, опыты содержали этап выдержки материала при фиксированном значении касательного напряжения τ_ϕ в течении интервала времени $\Delta t=20$. В условиях чистого кручения τ_ϕ выбиралось в пределах деформации в макроупругой области и соответствовали $\tau_\phi=0,71\tau_T$ (пунктирная линия на рис.5) При выдержке образца под нагрузкой в макропластической области, τ_ϕ было равно значению $\tau_\phi=1,17\tau_T$ (сплошная линия на рис.5). Деформирование кручением в условиях наложения гидростатического давления $q=230$ Мпа выполнялось согласно предыдущему режиму при $\tau_\phi=0,74\tau_T$ (пунктирная линия на рис.6) и $\tau_\phi=1,2\tau_T$ (сплошная линия на рис.6).

Анализируя полученные результаты, можно отметить следующее: выдержка образцов под нагрузкой в области макроупругой деформации при растяжении, начиная от напряжения $\sigma_\phi \geq 0,4\sigma_T$, влияет на величину и наклон площадки текучести. С увеличением σ_ϕ влияние напряжения возрастает, а при $\sigma_\phi=0,77\sigma_T$ площадка текучести полностью исчезает. Необходимо отметить еще один важный момент, касающийся величины однородной деформации и предельного значения остаточной деформации. В результате выдержки образца под нагрузкой, в макроупругой области во всех образцах (стабильно) наблюдалось увеличение диапазона однородной деформации и величины предельной пластичности на 8..15%.

Выдержка образца в макропластической области сопровождалась при дальнейшем нагружении эффектом Хаазена-Келли. Характерно, что в этом случае увеличение протяженности однородной деформации не наблюдается и предельная величина остаточной деформации (с точностью до разброса экспериментальных данных) также не изменяется по сравнению с опытами в условиях непрерывного активного деформирования.

Наложение уровня гидростатического давления, примерно равного значению предела текучести данного материала, не внесло существенных изменений в процесс деформирования. Результаты растяжения образцов приведены на рис.4, кручения – на рис.6. В то же время выдержка образцов в макроупругой области в условиях гидростатического давления увеличила диапазон однородной деформации и величину предельной остаточной деформации на 20..25%. Наложение гидростатического давления усиливало деформационные эффекты, наблюдаемые в результате выдержки образцов при фиксированных напряжениях в макроупругой области.

При организации опытов с выдержкой $\Delta t=20$ мин в макропластической области в условиях гидростатического давления наблюдается эффект Хаазена-Келли и незначительное (на 5..8%) увеличение значения предельной остаточной деформации.

Результаты опытов в условиях кручения тонкостенных образцов при аналогичных схемах нагружения, что и при растяжении, представлены на рис. 5 и 6. Качественно выявлены те же характерные признаки деформационного проявления, что и при опытах на растяжение. Следует отметить, что в количественном отношении при кручении обнаружено более сильное влияние рассмотренных режимов воздействия. В результате выдержки образца в макроупругой области при $\Delta t=20$ мин и $\tau_{\phi}=0,74\tau_T$ наблюдается увеличение предельной деформации на 8..10%, а в условиях действия гидростатического давления на 30...38%.

Подводя итоги анализу приведенных результатов, можно отметить устойчивое и весьма существенное влияние кратковременных выдержек материала под напряжением в макроупругой области на последующий вид диаграмм упругопластической деформации, а также величину однородной деформации. Характерно, что при различных напряженных состояниях наблюдаемые явления сохраняют качественный характер, но несколько отличаются в количественном отношении. Полученные результаты свидетельствуют о возможном нетривиальном влиянии истории нагружения в макроупругой области, что позволяет обнаруженный феномен использовать как метод релаксационной обработки изделий для стабилизации механических характеристик.

3. Двухзвенные траектории нагружения с ортогональным изломом

Экспериментальные 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, т.е. $M \rightarrow P$ опыты. Были выполнены систематические исследования с вариацией величины 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 гидростатического давления.

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 . Основные результаты опытов представлены в виде графиков на рис.7-12.

На рис. 7 и 8 приведены результаты испытаний тонкостенных цилиндрических образцов из стали Ст3 при двухзвенных траекториях нагружения ($P \rightarrow M$ опыты рис.7, $M \rightarrow P$ опыты рис.8) содержащие ортогональный излом траектории в макроупругой области. Режим нагружение

осуществляется в условиях активного нагружения, т.е. без выдержек образцов под действием фиксированной нагрузки.

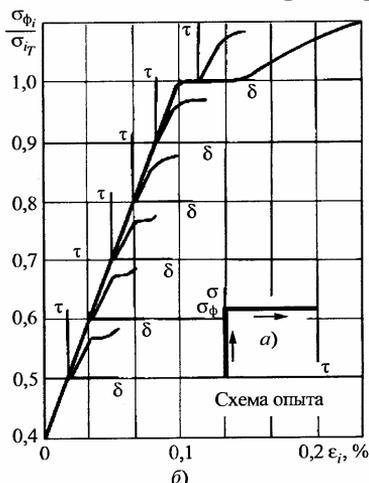


Рис. 7. Результаты испытаний тонкостенных цилиндрических образцов из стали Ст3 при двухзвенных траекториях нагружения (растяжение→кручение) с ортогональным изломом в макроупругой области деформирования: а – схема опыта; б – кривые деформации в совмещенных координатах $\sigma_{\phi i}/\sigma_{T i} - \epsilon_i$ и $\tau - \gamma$

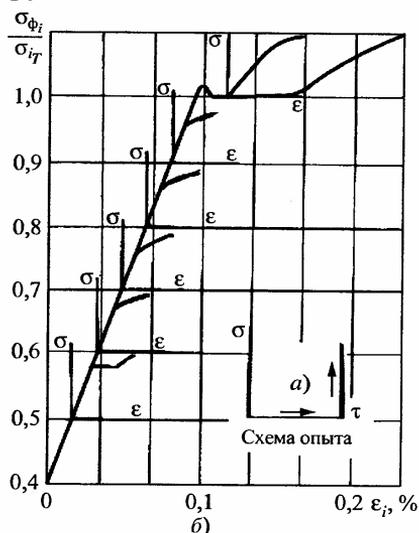


Рис. 8. Результаты испытаний тонкостенных цилиндрических образцов из стали Ст3 при двухзвенных траекториях нагружения (кручение→растяжение) с ортогональным изломом в макроупругой области деформирования: а – схема опыта; б – кривые деформации в совмещенных координатах $\sigma_{\phi i}/\sigma_{T i} - \epsilon_i$ и $\sigma - \epsilon$

Результаты опытов представлены в совмещенных координатах. На первом звене траектории нагружения используется система координат $(\sigma_{\phi i}/\sigma_{T i})\epsilon_i$ где $\sigma_{\phi i}$ – величина интенсивности напряжения, соответствующая первому звену, $\sigma_{T i}$ – величина предела текучести, выраженная через значение интенсивности напряжения. Параметр $(\sigma_{\phi i}/\sigma_{T i})$ характеризует относительную величину первого звена траектории по отношению к пределу текучести.

Результаты опыта на втором звене траектории нагружения представлены в координатах $\tau - \gamma$ (рис.7) при $P \rightarrow M$ опытах и в координатах $\sigma - \epsilon$ (рис.8) при $M \rightarrow P$ опытах. Скорости нагружения на активных участках нагружения осуществлялись одни и те же, равные $\epsilon' = 3,03 \cdot 10^{-4} \text{ с}^{-1}$ и $\gamma' = 7,1 \cdot 10^{-4} \text{ с}^{-1}$.

Анализируя полученные результаты, представленные на рис. 7 и 8 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 в полном исчезновении площадки текучести в зависимости от величины $\sigma_{\phi i}$ на первом звене

траектории. Примечательно, что в $M \rightarrow P$ опытах (рис.8) площадка текучести на диаграмме деформации на втором звене исчезает уже при $(\sigma_{\phi i} / \sigma_{T i}) = 0,6$, а в опытах $P \rightarrow M$ (рис.7) при $(\sigma_{\phi i} / \sigma_{T i}) = 0,8$. Приведенные данные обращают внимание на влияние истории нагружения в пространстве напряжений в макроупругом состоянии на характер последующей макропластической деформации.

На рис.9 и 10 изображены экспериментальные данные при $P \rightarrow M$ опытах. Режимы нагружения, представленные на рис.9, содержат ортогональный излом траектории в макроупругой (рис.9 а и в) и в макропластической (рис.9 б и г) областях. Результаты, изображенные на рис.9 а и рис.9 б получены без наложения ВГД, а результаты на рис.9 в, г, в условиях ВГД ($q=230$ МПа).

Сравнивая рис.9 а и рис.9 в, видим, что диаграмма деформации $\tau - \gamma$ на втором звене в условиях действия ВГД имеет несколько меньшее значение предела пропорциональности, чем на участке второго звена траектории нагружения без наложения ВГД, разница составляет $\approx 14\%$.

Анализируя графики деформации на втором звене траектории нагружения в условиях ортогонального излома в макропластической области (рис. 9 б,г), 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 условиях ВГД ($q=230$ МПа) увеличивает сопротивление пластической деформации.

На рис.10 приведены результаты опытов, выполненных по той же схеме нагружения, что и опыты, результаты которых изображены на рис.9. Разница между ними заключается в том, что в рассматриваемых экспериментах после первого звена траектории нагружения проводилась выдержка образца при постоянном значении растягивающего напряжения в течение $\Delta t = 20$ мин, а затем образец нагружали касательным напряжением согласно траектории второго звена.

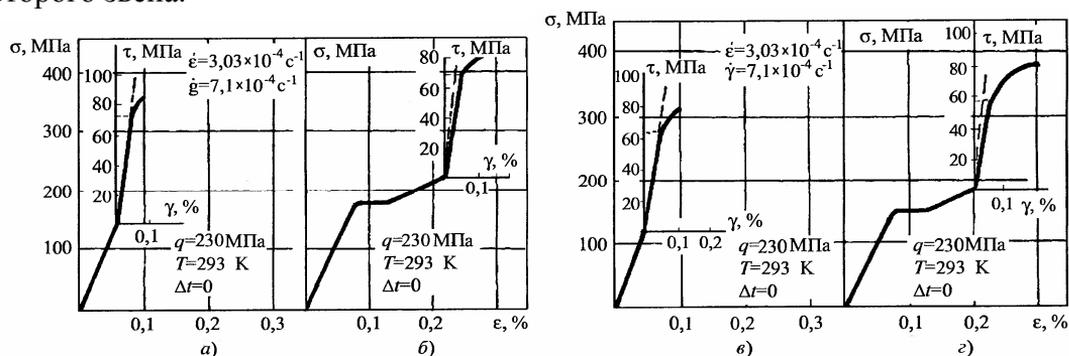


Рис. 9. Результаты испытаний тонкостенных цилиндрических образцов из стали Ст3 при двухзвенных траекториях нагружения (растяжение \rightarrow кручение) с ортогональным изломом в макроупругой (а,в) и в макропластической (б,г) областях деформирования: а,б – без ВГД; б,г – в условиях ВГД ($q=230$ МПа)

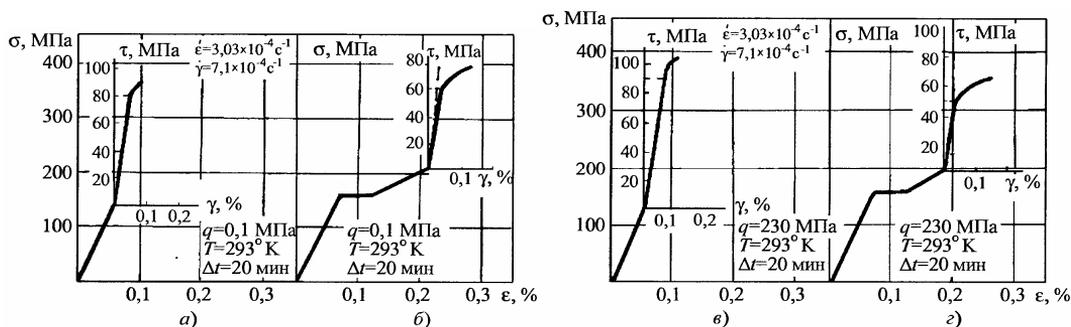


Рис. 10. Результаты испытаний тонкостенных цилиндрических образцов из стали Ст3 при двухзвенных траекториях нагружения (растяжение→кручение) с ортогональным изломом в макроупругой (а,в) и макропластической (б,г) областях деформирования при наличии выдержки под нагрузкой $\Delta t=20$ мин после первого звена траектории: а,б – без ВГД; б,г – в условиях ВГД ($q=230$ МПа)

Анализируя полученные результаты, представленные на рис.10, 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 данные на рис.10 а и рис.10, видим, что выдержка образца под нагрузкой в течение $\Delta t=20$ мин в условиях ВГД значительно увеличила предел пропорциональности (на 17%) при последующем нагружении на втором звене траектории.

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

Результаты, представленные на на рис.11 и 12, принадлежат исследованиям по программе двухзвенных траекторий нагружения ($M \rightarrow P$ опыты). Данные, представленные на рис.11 получены в условиях непрерывного режима нагружения «кручение-растяжение».

Данные, представленные на рис.12, получены в условиях реализации $M \rightarrow P$ опытов при наличии выдержки материала под нагрузкой $\Delta t=20$ мин после первого звена траектории нагружения, т.е.аналогичны опытам, представленном на рис.10. Сравнивая результаты экспериментов при $P \rightarrow M$ опытах (рис.9, 10) с результатами при $M \rightarrow P$ опытах (рис.11, 12), можно отметить наличие качественного соответствия в деформационных эффектах. В то же время наблюдается некоторая количественная разница, отражающая характер влияния истории нагружения при изломе траектории нагружения как в макроупругой, так и в макропластической областях.

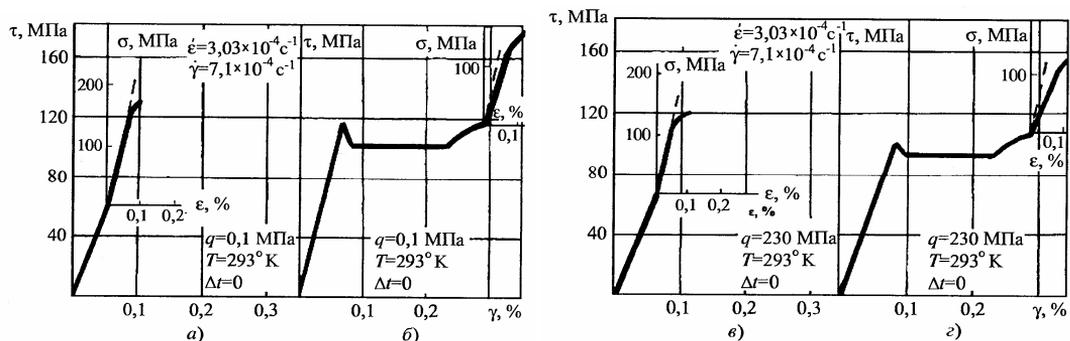


Рис. 11. Результаты испытаний тонкостенных цилиндрических образцов из стали Ст3 при двухзвенных траекториях нагружения (кручение→растяжение) с ортогональным изломом в макроупругой (а,в) и макропластической (б,г) областях деформирования: а,б – без ВГД; в,г – в условиях ВГД ($q=230$ МПа)

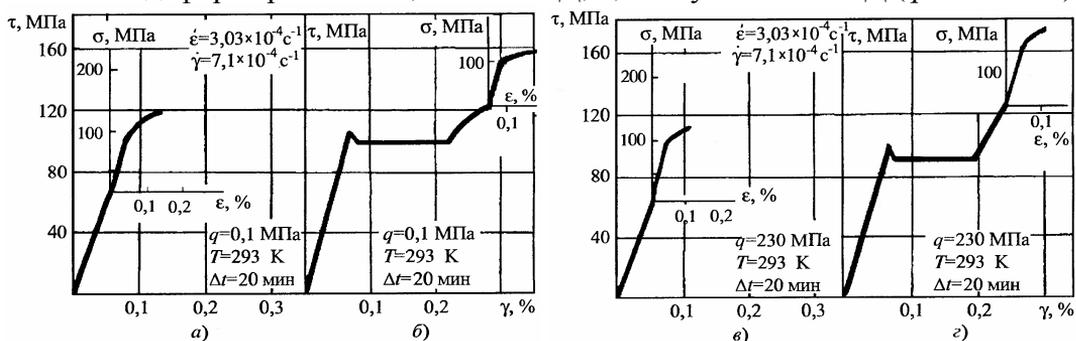


Рис. 12. Результаты испытаний тонкостенных цилиндрических образцов из стали Ст3 при двухзвенных траекториях нагружения (кручение→растяжение) с ортогональным изломом в макроупругой (а,в) и макропластической (б,г) областях деформирования при наличии выдержки под нагрузкой $\Delta t=20$ мин после первого звена траектории: а,б – без ВГД; в,г – в условиях ВГД ($q=230$ МПа)

Заключение. Подводя итоги анализа результатов, необходимо привести следующие комментарии. Деформационные эффекты, наблюдаемые в опытах, содержащих фактор выдержки образцов под постоянной нагрузкой, убедительно свидетельствует 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, для большинства малоуглеродистых сталей средний уровень внутренних напряжений, обусловленных неоднородностью структуры, равен 60...80 МПа, т.е. составляет $\approx 0,3-0,5$ от предела текучести этих материалов. Необходимо отметить роль исходной многоуровневой системы структурных концентраторов, которые при различных схемах напряженного состояния образца создают различные внутренние поля напряжений в окрестностях 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, соответственно 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 при $q=200\text{МПа}$ 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 обращают внимание на необходимость, при формулировке определяющих соотношений, учитывать влияние истории нагружения в пространстве напряжений и во времени на процессы формирования микропластических деформаций, обусловленных наличием структурных концентраторов. Развитие обозначенного направления позволит создать прецизионные методы релаксационной обработки изделий с учётом специфики режимов их эксплуатации.

Список литературы

1. Лихачёв В.А., Малинин В.Г. Структурно-аналитическая теория прочности. – СПб.: Наука, 1993. – 471 с.
2. Голенков В.А., Малинин В.Г., Малинина Н.А. Структурно-аналитическая мезомеханика и её приложения. – М.: Машиностроение, 2009. – 635 с.

References

1. Likhachyov V.A., Malinin V.G. Structural and analytical theory of durability. – SPb.: Science, 1993. – 471 p.
2. Golenkov V.A., Malinin V.G., Malinina N.A. Structural and analytical mesomechanics and its applications. – M.: Mechanical engineering, 2009. – 635 p.

Малинин Владислав Георгиевич – доктор физико-математический наук, профессор, malinin.mvg@yandex.ru	Malinin Vladislav – Doctor of Physical and Mathematical sciences, professor, malinin.mvg@yandex.ru
Димов Алексей Александрович – инженер-конструктор, alexdimov91@gmail.com	Dimov Aleksey – constructor-engineer, alexdimov91@gmail.com
Орловский государственный университет имени Н.В. Парахина, г.Орёл, Россия	Orel State Agrarian University named after N.V.Parakhin, Orel, Russia

Received 13.03.2019