

**Н.Н. Вассерман, В.Э. Вильдеман,
А.А. Крюков, М.П. Третьяков**

Пермский государственный технический университет

ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ УПРУГОПЛАСТИЧЕСКОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ СТАЛИ 15Х2ГМФ ПРИ СЛОЖНОМ НАПРЯЖЕННОМ СОСТОЯНИИ¹

Рассматриваются закономерности поведения сплава 15Х2ГМФ при совместном деформировании растяжением и кручением тонкостенных трубчатых образцов, исследованные с использованием современного высокоточного оборудования Центра экспериментальной механики Пермского государственного технического университета.

Ключевые слова: растяжение, кручение, деформация, упругость, пластичность, упрочнение.

Решение фундаментальных и прикладных задач механики неупругого деформирования материалов и конструкций требует развития математических моделей пластического деформирования [1,2] и получения новых экспериментальных данных о механическом поведении материалов при сложном нагружении и сложном напряженном состоянии. Существует метод упрочнения длинномерных цилиндрических изделий [3–7], суть которого заключается в наведении в приповерхностной области изделия благоприятных сжимающих остаточных напряжений за счет последовательного пластического деформирования сначала растяжением, а затем, при фиксации полученной при растяжении полной деформации, кручением. Однако предлагаемые режимы упрочнения далеки от оптимальных, так как в недостаточной степени теоретически и экспериментально обоснованы. Целью настоящей работы является изучение закономерностей упругопластического деформирования при напряженном состоянии, характерном для этого вида упрочнения. В работе [8] авторами рассматриваются результаты испытаний на одноосное растяжение и чистый сдвиг образцов из стали

¹ Эксперименты выполнены в Центре экспериментальной механики Пермского государственного технического университета при финансовой поддержке РФФИ (Грант 08-08-00702) и ФЦП «Исследование и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технического комплекса России на 2007–2012 гг.» (Гос. контракт № 02.518.11.7135).

15Х2ГМФ, используемой для изготовления нефтенасосных штанг. Показано, что разгрузка при каждом из данных видов деформирования идёт практически по линейному упругому закону, а расхождение между модулями нагрузки и разгрузки не превышает 5 %. Проведена оценка влияния временного фактора, показывающая, что в условиях испытания им можно пренебречь с погрешностью в 5 %. В итоге подтверждается, что применительно к сплаву 15Х2ГМФ величину накопленной пластической деформации как при растяжении, так и при сдвиге можно оценивать по формулам

$$\varepsilon_p = \varepsilon - \frac{\sigma}{E}, \quad \gamma_p = \gamma - \frac{\tau}{G}, \quad (1)$$

где ε и γ – общая линейная и угловая деформации;

ε_p и γ_p – пластическая линейная и угловая деформации;

σ и τ – нормальное и касательное напряжения;

E и G – модули Юнга и сдвига.

В данной работе представлены результаты испытаний на совместное растяжение и кручение тонкостенных трубчатых образцов из этой же стали. Исследования выполнены на универсальной двухосевой сервогидравлической испытательной системе Instron 8850, позволяющей проводить осевое нагружение с усилием до 100 кН и нагружение кручением с моментом до 1000 Н·м с точностью 0,4 % в диапазоне от 1 до 100 % номинальной мощности датчика. Испытания выполнены с использованием двухосевого экстензометра (рис. 1), позволяющего регистрировать линейную деформацию в диапазоне $\pm 0,05$ и угловую деформацию в диапазоне $\pm 0,07$ (нелинейность: $\leq \pm 0,15$ % от полной измерительной шкалы, гистерезис $\leq \pm 0,15$ % при 60 % от полной шкалы).

Экстензометр устанавливается непосредственно на образец, тем самым исключая погрешности измерения, обусловленные податливостью нагружающей системы и несовершенством закрепления образца в захватах.

Испытания проведены на тонкостенных трубчатых образцах с наружным диаметром 12 мм и толщиной стенки 1 мм, что обеспечивает практически однородное напряженное состояние в его рабочей части.

Переходя от нагрузок к напряжениям, получаем следующие основные параметры испытания: σ , τ , ε и γ , которые фиксируются с частотой 100 измерений в секунду. Управление испытанием ведется по любым двум независимым параметрам.

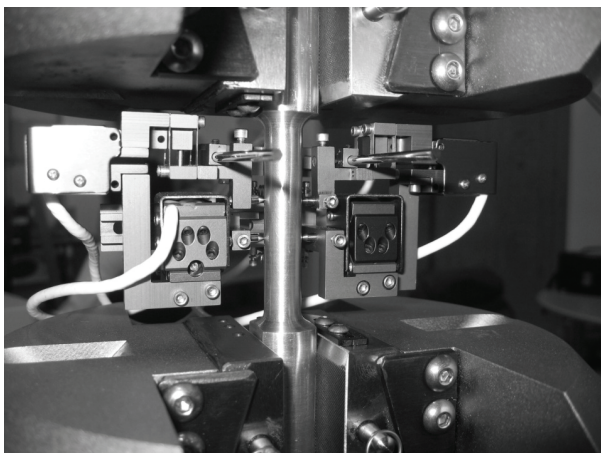


Рис. 1. Двухосевой экстензометр, установленный на образце

На первом этапе исследовалось влияние уровня предварительного растягивающего напряжения, при котором осуществлялась фиксация продольной деформации, на закономерности упругопластического деформирования при последующем кручении. Выбраны три уровня предварительных напряжений: σ_{02} , $0,75\sigma_{02}$ и $0,5\sigma_{02}$, где σ_{02} – условный предел текучести. В начале испытания каждого образца он растягивался до уровня пластической деформации $\varepsilon_p = 0,002$ с целью определения индивидуального значения условного предела текучести. Таким образом, последовательность испытания для всех образцов следующая: растяжение до предела текучести σ_{02} , затем, если необходимо, частичная разгрузка до требуемого уровня напряжения, фиксация линейной деформации ε на этом уровне, кручение до заданной величины угловой деформации.

Результаты испытаний по вышеприведенной программе представлены на рис. 2. Из рис. 2, *a* видно, что происходит интенсивное снижение нормальных напряжений σ с увеличением деформации γ , которое имеет тенденцию приближения к нулевой асимптоте. Чем ниже уровень предварительного напряжения σ , с которого началось деформирование кручением, тем ниже уровень, на который нормальное напряжение в итоге снижается при одной и той же величине γ . Если начальное нормальное напряжение ниже σ_{02} , то до начала заметной пластической деформации напряжение σ практически остаётся постоянным при увеличении γ .

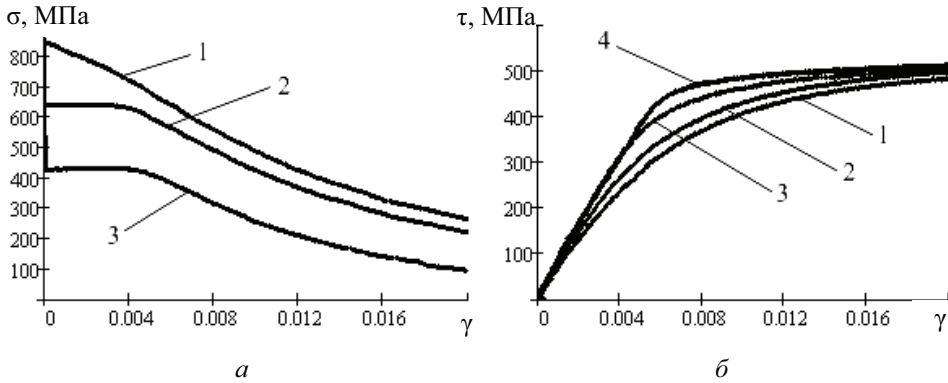


Рис. 2. Графики зависимостей: *а* – нормального напряжения, *б* – касательного напряжения от угловой деформации при кручении предварительно растянутых образцов из стали 15Х2ГМФ с фиксированной продольной деформацией ε с уровня нормальных напряжений: 1 – σ_{02} ; 2 – $0,75\sigma_{02}$; 3 – $0,5\sigma_{02}$; 4 – без предварительного деформирования растяжением (диаграмма чистого сдвига)

На характер диаграммы $\tau - \gamma$ (рис. 2, *б*) оказывает существенное влияние уровень начальных нормальных напряжений. В случае когда кручение началось с уровня σ_{02} , на диаграмме с самого начала отсутствует линейный участок. По мере снижения уровня начального напряжения σ , с которого началось кручение, увеличивается протяженность начального линейного участка, и диаграммы приближаются к диаграмме чистого сдвига 4, представленной для сравнения на рисунке. При увеличении значения угловой деформации все диаграммы имеют тенденцию сближения с диаграммой чистого сдвига.

В механике деформируемого твёрдого тела вводится понятие эквивалентного напряжения (σ_3). Наиболее широкое распространение получило эквивалентное напряжение на основе критерия пластичности Мизеса, которое для случая совместного растяжения и кручения определяется соотношением

$$\sigma_3 = \sqrt{\sigma^2 + 3\tau^2}. \quad (2)$$

В системе координат $\sigma - \tau$ данное уравнение определяет геометрическое место точек, характеризующих напряженные состояния, имеющие одинаковые эквивалентные напряжения. Это геометрическое место точек представляет собой эллипс (эллипс Мизеса). Совокупность эллипсов после начала течения представляет собой совокупность мгновенных поверхностей текучести в процессе деформирования.

Связь между касательными и нормальными напряжениями для вышеприведённых испытаний представлена на рис. 3.

Область совокупности мгновенных поверхностей текучести на рис. 3 лежит между эллипсами 4 и 6. Поверхность 4 соответствует величине эквивалентного напряжения, равного пределу упругости σ_{005} , наименьшему среди рассматриваемых образцов ($\sigma_{005} = 800$ МПа), она ограничивает область упругих деформаций. Поверхность 5 соответствует величине σ_s , равного пределу текучести σ_{02} для образца 1 ($\sigma_{02} = 848$ МПа), а поверхность 6 соответствует величине наибольшего эквивалентного напряжения, достигнутого в процессе деформирования среди рассматриваемых образцов (900 МПа). В данном случае – это σ_s в конце деформирования образца 1. Кривая 1 соответствует активному режиму нагружения, когда после растяжения до σ_{02} при фиксации деформации ε сразу начинается кручение. Она достаточно хорошо согласуется с эллипсом Мизеса 5 и выходит за его пределы, приближаясь к эллипсу 6, в конце деформирования. Кривые 2 и 3 соответствуют режимам испытания с частичной разгрузкой после предварительного растяжения, поэтому стадия кручения вначале протекает в области упругих деформаций, в которой напряжение τ увеличивается, а напряжении σ остаётся постоянным. В дальнейшем, по мере возникновения заметных пластических деформаций, напряжение σ начинает уменьшаться при увеличении τ . Несмотря на то, что было предварительное упрочнение до величины σ_{02} , пластическая деформация образцов, описываемых кривыми 2 и 3, начинается несколько раньше достижения мгновенной поверхности текучести 5, т.е. материал как бы «забывает» предысторию нагружения. Затем кривые выходят в область, ограниченную поверхностями 5 и 6. Таким образом, кривые 1, 2 и 3 после начала пластического течения выходят в область, ограниченную двумя поверхностями текучести, которые соответствуют эквивалентным напряжениям, отличающимся друг от друга всего на 52 МПа, т.е. процесс деформирования в области развитой пластической деформации с точностью около 6 % не противоречит критерию Мизеса.

Для оценки величины остаточных напряжений в изделиях сплошного поперечного сечения необходимо определять величину пластических деформаций. В первую очередь интерес представляет пластическая линейная деформация, так как она связана с остаточными сжимающими напряжениями.

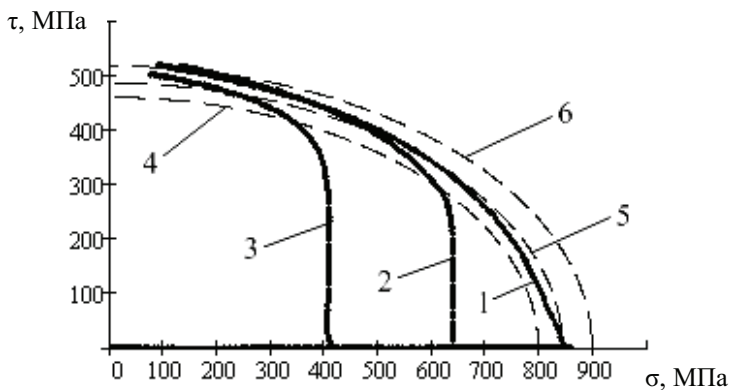


Рис. 3. Связь между касательными и нормальными напряжениями при кручении предварительно растянутых образцов из стали 15X2ГМФ с фиксированной продольной деформацией ε с уровня нормальных напряжений: 1 – σ_{02} ; 2 – $0,75\sigma_{02}$; 3 – $0,5\sigma_{02}$. Эллипсы Мизеса $\sigma^2 + 3\tau^2 = \sigma_s^2$; 4 – $\sigma_s = 800$ МПа; 5 – $\sigma_s = 848$ МПа; 6 – $\sigma_s = 900$ МПа

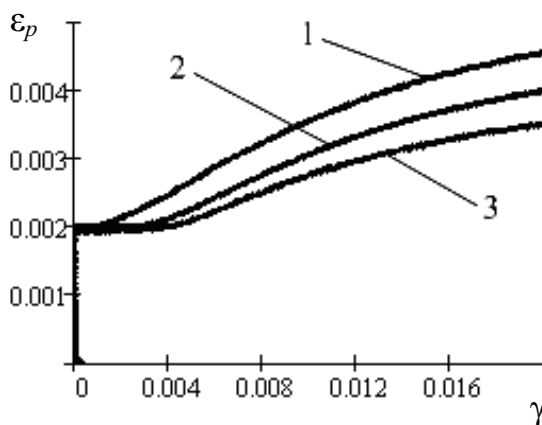


Рис. 4. Графики зависимости линейной пластической деформации от угловой деформации при кручении предварительно растянутых образцов из стали 15X2ГМФ с фиксированной продольной деформацией ε с уровня нормальных напряжений: 1 – σ_{02} ; 2 – $0,75\sigma_{02}$; 3 – $0,5\sigma_{02}$

В случае тонкостенных трубчатых образцов имеется возможность оценить величину накопленных пластических деформаций. Анализ рис. 2 и 3 показывает, что в области упругих деформаций растяжение и сдвиг – это ортогональные процессы, взаимно не влияющие друг

на друга, т.е. в данной области изменение напряжения σ связано только с изменением деформации ε , а напряжения τ – только с деформацией γ . Поэтому оценку величины накопленных линейной и угловой пластических деформаций в первом приближении можно провести по формулам (1). Для каждого из рассмотренных режимов деформирования графики изменения величины линейной пластической деформации в процессе испытания представлены на рис. 4. На рисунке видно, что пластическая деформация увеличивается по мере возрастания γ сразу после выхода из зоны упругих деформаций. Поскольку после растяжения до предварительного нормального напряжения полная деформация ε фиксировалась на постоянном уровне, то увеличение ε_p на стадии кручения возможно только за счет уменьшения упругой составляющей деформации ε_e и не может превысить данную величину. Уменьшение ε_e связано со снижением напряжения σ , рассмотренным ранее. Чем выше уровень предварительного нормального напряжения, тем больше величина упругой деформации, соответственно, больше диапазон для увеличения ε_p на стадии кручения. Для режима при кручении с уровня σ_{02} итоговая величина ε_p получается наибольшей. Чем ниже уровень предварительного напряжения растяжения, тем меньше итоговая величина ε_p при одной и той же γ .

На втором этапе исследовалось влияние уровня предварительного растягивающего напряжения, при котором осуществлялась фиксация продольной деформации, на закономерности упругопластического деформирования при последующем кручении со сменами направления закручивания. Выбраны два уровня предварительных напряжений: σ_{02} , $0,75\sigma_{02}$. Испытания проводились по следующей программе: растяжение до предела текучести σ_{02} , затем, если необходимо, частичная разгрузка до требуемого уровня напряжения, фиксация линейной деформации ε на этом уровне, кручение до величины угловой деформации $\gamma = \gamma_a$, кручение в противоположную сторону до $\gamma = -\gamma_a$, кручение в первоначальном направлении до $\gamma = \gamma_a$. Кручение на первом уровне предварительного напряжения проводилось при амплитуде угловой деформации $\gamma_a = 0,01$, а на втором уровне предварительного напряжения при двух уровнях амплитуды угловой деформации γ_a : $0,01$ и $0,007$.

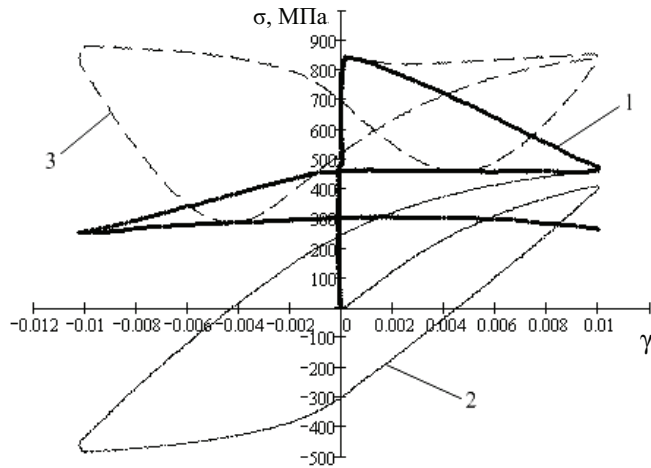


Рис. 5. Графики зависимостей: (1) $\sigma - \gamma$, (2) $\tau - \gamma$, (3) $\sigma_3 - \gamma$ при испытании образца из стали 15X2ГМФ в последовательности: растяжение до σ_{02} , фиксация достигнутой деформации ϵ на постоянном уровне, кручение до $\gamma = \gamma_a$ ($\gamma_a = 0,01$), кручение в противоположную сторону до $\gamma = -\gamma_a$, кручение в первоначальном направлении до $\gamma = \gamma_a$

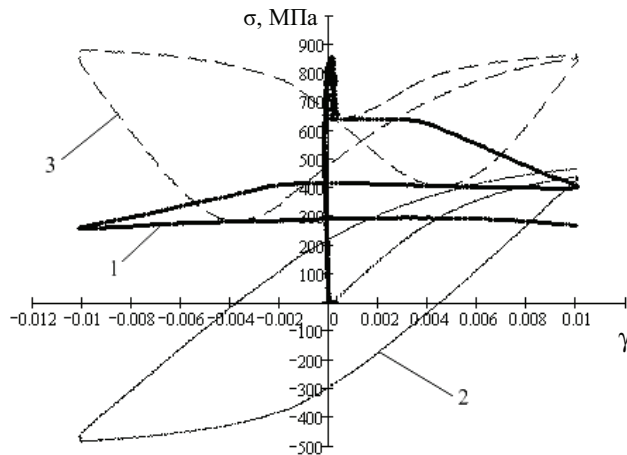


Рис. 6. Графики зависимостей: (1) $\sigma - \gamma$, (2) $\tau - \gamma$, (3) $\sigma_3 - \gamma$ при испытании образца из стали 15X2ГМФ в последовательности: растяжение до σ_{02} , разгрузка до $\sigma = 0,75\sigma_{02}$, фиксация достигнутой деформации ϵ на постоянном уровне, кручение до $\gamma = \gamma_a$ ($\gamma_a = 0,01$), кручение в противоположную сторону до $\gamma = -\gamma_a$, кручение в первоначальном направлении до $\gamma = \gamma_a$

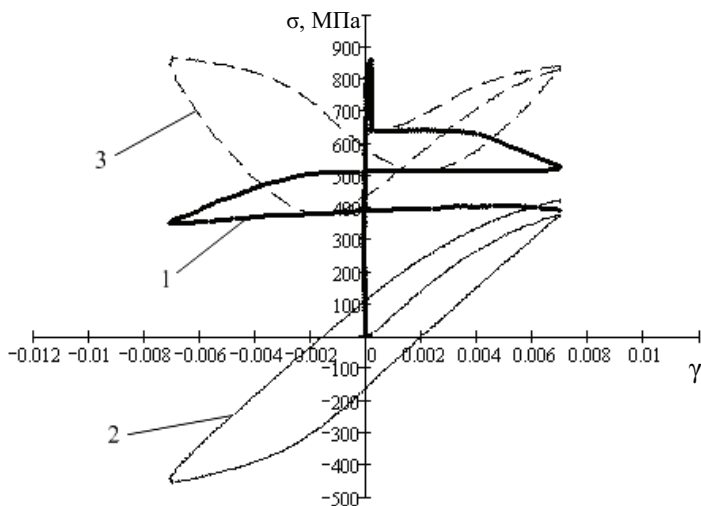


Рис. 7. Графики зависимостей: (1) $\sigma - \gamma$, (2) $\tau - \gamma$, (3) $\sigma_s - \gamma$ при испытании образца из стали 15X2ГМФ в последовательности: растяжение до σ_{02} , разгрузка до $\sigma = 0,75\sigma_{02}$, фиксация достигнутой деформации ϵ на постоянном уровне, кручение до $\gamma = \gamma_a$ ($\gamma_a = 0,007$), кручение в противоположную сторону до $\gamma = -\gamma_a$, кручение в первоначальном направлении до $\gamma = \gamma_a$

Результаты испытаний по вышеприведенной программе представлены на рис. 5, 6 и 7. Дополнительно на каждом рисунке показано, как изменяется в процессе деформирования величина эквивалентного напряжения, определяемого по формуле (2).

Зависимости качественно сохраняют свою форму для всех трёх представленных образцов, отличающихся параметрами режима деформирования. Первая стадия кручения практически повторяет результаты предыдущих испытаний с однократным кручением. Вторая стадия начинается при смене направления закручивания. Вначале идёт разгрузка, которую можно считать линейно упругой, так как напряжение τ уменьшается по линейному закону при изменении деформации γ , а напряжение σ в это время остаётся постоянным. Затем, по мере увеличения абсолютного значения γ напряжение σ продолжает снижаться, но величина падения напряжения несколько меньше, чем на первой стадии кручения, зависимость между τ и γ в это время становится нелинейной. Величина σ , вначале уменьшается, а при переходе напряжения τ через нулевое значение начинает возрастать, так как по абсолют-

ному значению τ увеличивается. На третьей стадии кручения не наблюдается значительного падения напряжения σ при изменении γ , даже наоборот, вначале, когда идёт разгрузка, наблюдается незначительное увеличение σ и лишь в конце стадии такое же незначительное его уменьшение. Напряжение τ сначала изменяется практически по линейному закону, так как идёт разгрузка, затем зависимость $\tau - \gamma$ становится нелинейной. После прохождения полного цикла петля $\tau - \gamma$ обнаруживает тенденцию к замыканию. Величина σ , вначале уменьшается, а при переходе напряжения τ через нулевое значение – возрастает. При уменьшении амплитуды стадий кручения (см. рис. 7) уменьшается итоговая величина снижения напряжения σ и сужается петля $\tau - \gamma$.

На рис. 8 и 9 представлено сравнение графиков зависимостей $\sigma - \gamma$ при одинаковых режимах деформирования на стадии растяжения, но отличающихся количеством стадий кручения.

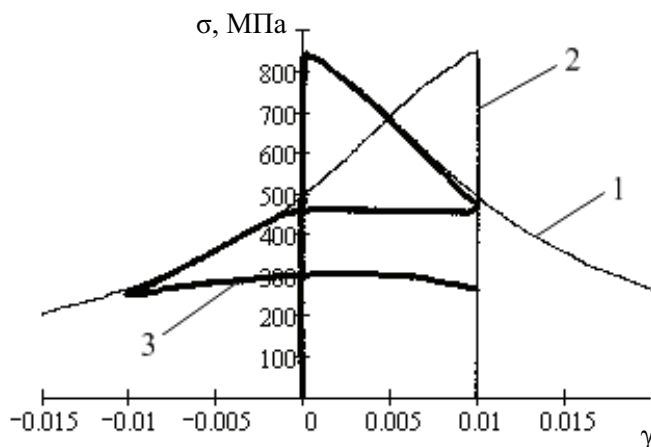


Рис. 8. Графики зависимостей нормального напряжения от угловой деформации при испытании образцов из стали 15X2ГМФ:
 1 – однократное кручение после пластического деформирования при одноосном растяжении до σ_{02} и фиксации деформации ϵ ;
 2 – зеркальное отображение зависимости 1 со сдвигом на величину $\gamma = 0,01$; 3 – знакопеременное кручение с амплитудой $\gamma = 0,01$ после пластического деформирования при одноосном растяжении до σ_{02} и фиксации деформации ϵ

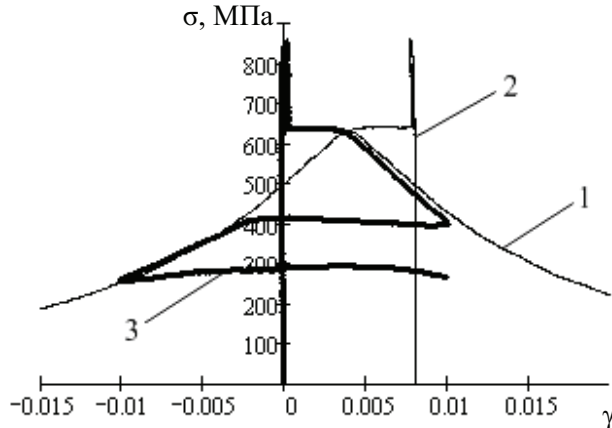


Рис. 9. Графики зависимостей нормального напряжения от угловой деформации при испытании образцов из стали 15Х2ГМФ:
 1 – однократное кручение после пластического деформирования при одноосном растяжении до σ_{02} , разгрузки до $0,75\sigma_{02}$ и фиксации деформации ϵ ; 2 – зеркальное отображение зависимости 1 со сдвигом на величину $\gamma = 0,008$; 3 – знакопеременное кручение с амплитудой $\gamma = 0,01$ после пластического деформирования при одноосном растяжении до σ_{02} , разгрузки до $0,75\sigma_{02}$ и фиксации деформации ϵ

На каждом рисунке первые стадии кручения достаточно хорошо согласуются. Зеркально отображая график при однократном кручении и сдвигая её вдоль оси абсцисс до совмещения со второй стадией знакопеременного кручения, также наблюдаем достаточно хорошее совпадение. Таким образом, величина снижения напряжения σ на первых двух стадиях знакопеременного кручения аналогична величине снижения σ при однократном кручении с большим значением величины деформации γ .

Связь между касательными и нормальными напряжениями для вышеприведённых испытаний с растяжением и последующим знакопеременным кручением представлена на рис. 10.

Эллипс Мизеса 4 соответствует величине эквивалентного напряжения, равного пределу текучести σ_{02} , наименьшему среди образцов ($\sigma_{02} = 845$ МПа). Кривые 1, 2 и 3 почти не выходят за область эллипса. Первая стадия кручения для кривых повторяет зависимости для однократного кручения. При смене направления закручивания последовательно проходят этапы разгрузки и упругой нагрузки, в это время на-

пряжение σ практически постоянно при изменении τ для всех представленных кривых. При возникновении заметных пластических деформаций напряжение σ начинает уменьшаться при уменьшении τ . Течение начинается немного раньше эллипса 4, но в итоге кривые приближаются к эллипсу и немного выходят за его пределы. На третьей стадии кручения наблюдается эффект, отмеченный ранее, когда σ немного увеличивается при изменении τ . Но в итоге кривые опять выходят на эллипс Мизеса.

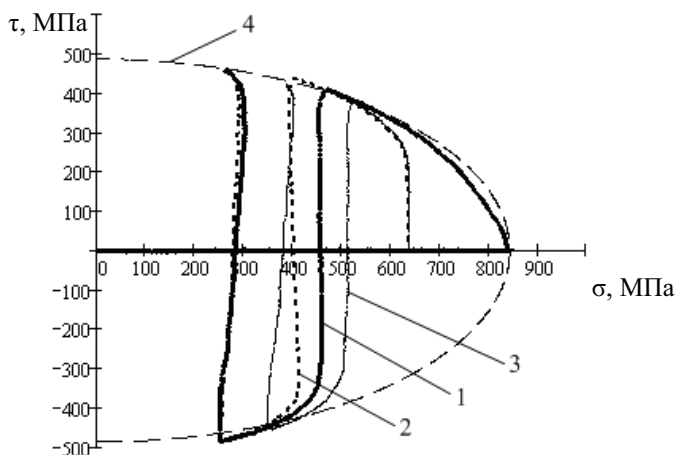


Рис. 10. Связь между касательными и нормальными напряжениями при испытании образцов из стали 15Х2ГМФ: 1 – знакопеременное кручение с амплитудой $\gamma = 0,01$ после пластического деформирования при одноосном растяжении до σ_{02} и фиксации деформации ϵ ; 2 – знакопеременное кручение с амплитудой $\gamma = 0,01$ после пластического деформирования при одноосном растяжении до σ_{02} , разгрузки до $0,75\sigma_{02}$ и фиксации деформации ϵ ; 3 – знакопеременное кручение с амплитудой $\gamma = 0,007$ после пластического деформирования при одноосном растяжении до σ_{02} , разгрузки до $0,75\sigma_{02}$ и фиксации деформации ϵ ; 4 – эллипс Мизеса: $\sigma^2 + 3\tau^2 = \sigma_{02}^2$

Анализ рис. 5–10 показывает, что на первых двух стадиях знакопеременного кручения сохраняются основные закономерности, свойственные однократному кручению. Поэтому оценка величины накопленных пластических деформаций на данных стадиях может быть проведена так же, как и в случае деформирования с однократным кручением, по формуле (1). На третьей стадии кручения в области уп-

ругих деформаций появляется взаимовлияние друг на друга растяжения и сдвига, т.е. влияние деформации γ на напряжение σ , а деформации ε на напряжение τ . Это может быть связано с наведенной в процессе деформирования анизотропией свойств материала. Поэтому формула (1) на третьей стадии кручения может дать значительную погрешность. Графики изменения величины линейной пластической деформации в процессе испытания, рассчитанные по формуле (1), представлены на рис. 11.

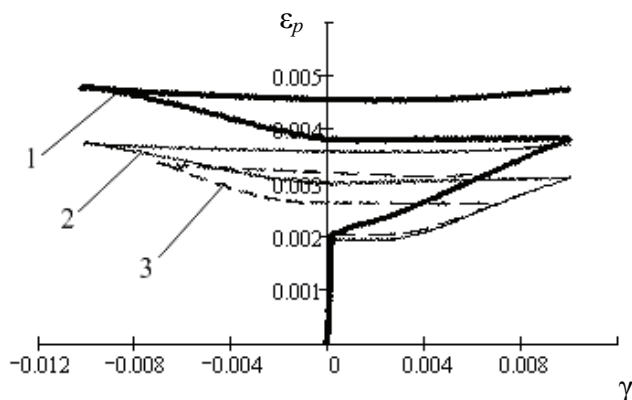


Рис. 11. Графики зависимости линейной пластической деформации от угловой деформации при знакопеременном кручении предварительно растянутых образцов из стали 15Х2ГМФ с фиксированной продольной деформацией ε : 1 – с уровня σ_{02} при амплитуде $\gamma_a = 0,01$; 2 – с уровня $0,75\sigma_{02}$ при амплитуде $\gamma_a = 0,01$; 3 – с уровня $0,75\sigma_{02}$ при амплитуде $\gamma_a = 0,007$

Для режима при кручении с уровня σ_{02} итоговая величина ε_p получается наибольшей, т.е. так же, как и при однократном кручении. При одинаковых уровнях предварительного нормального напряжения, соответствующих $0,75\sigma_{02}$, итоговая величина ε_p получается большей при большей амплитуде стадий кручения γ_a .

Таким образом, как при однократном, так и при знакопеременном кручении предварительно растянутых тонкостенных образцов с фиксированной продольной деформацией ε наблюдается интенсивное снижение нормальных напряжений. Снижение тем больше, чем больше величина угловой деформации. При этом за счет уменьшения линейной упругой деформации увеличивается линейная пластическая деформация. В случае знакопеременного кручения снижение напряже-

ния σ наблюдается на первых двух стадиях кручения. На третьей стадии кручения петля $\tau - \gamma$ завершает прохождение полного цикла, обнаруживая тенденцию к замыканию, и дальнейшее снижение напряжения σ приостанавливается.

Библиографический список

1. Ильюшин А.А. Пластичность. Ч. I. Упруго-пластические деформации. – М.: Логос, 2004. – 388 с.
2. Горшков А.Г., Старовойтов Э.И., Тарлаковский Д.В. Теория упругости и пластичности: учеб. для вузов. – М.: Физматлит, 2002. – 416 с.
3. Вассерман Н.Н. Насосным штангам долгую жизнь // Механико-технологическому факультету 50 лет: сб. науч. тр. – Пермь, 2005. – С. 118–129.
4. Вассерман Н.Н., Калугин В.Е. Определение остаточных напряжений в длинномерных цилиндрических изделиях после их пластического деформирования растяжением и кручением // Динамика и прочность механических систем: сб. науч. тр. – Пермь, 1996. – С. 35–43.
5. Технология восстановления прямолинейности и упрочнения насосных штанг / Н.Н. Вассерман [и др.] // Наука производству. – 2000. – № 5. – С. 49–50.
6. Пат. 2069496 Рос. Федерация, МПК С 21 Д 7/12 8/00. Способ восстановления длинномерных цилиндрических изделий / В.В. Семенов, Н.Н. Вассерман, В.Е. Калугин. – 94030098/02; заявл. 11.08.94; опубл. 20.11.96, Бюл. № 32. – 3 с.
7. Надымов А.Н. Моделирование и оптимизация процесса восстановления насосных штанг: автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Пермь, 2002. – 17 с.
8. Экспериментальное изучение закономерностей упругопластического деформирования стали 15Х2ГМФ при растяжении и кручении / Н.Н. Вассерман [и др.] // Вестник ПГТУ. Машиностроение и материаловедение. – 2010. – Т. 13, № 5. – С. 127–138.

Получено 5.10.2010