

УДК 620.17

А.А. Крюков, В.Е. Калугин, М.П. Третьяков, **Н.Н. Вассерман**

A.A. Kryukov, W.E. Kalugin, M.P. Tretyakov, **N.N. Wasserman**

Пермский национальный исследовательский политехнический университет
State National Research Polytechnic University of Perm

ИССЛЕДОВАНИЕ ПОВЕДЕНИЯ КОНСТРУКЦИОННОЙ СТАЛИ ПРИ ПРОСТЫХ ВИДАХ НАГРУЖЕНИЯ

INVESTIGATION OF THE BEHAVIOR OF STRUCTURAL STEEL FOR SIMPLE TYPES OF LOADING

С использованием современного высокоточного оборудования Центра экспериментальной механики ПНИПУ проведено исследование закономерностей упругопластического деформирования сплава 15Х2ГМФ при одноосном растяжении и чистом сдвиге. С единых позиций описано поведение материала при рассмотренных видах деформирования.

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

Investigation of the regularities of elastoplastic deformation of the alloy 15H2GMF under uniaxial tension and torsion was carried out using modern high-precision equipment the Center for Experimental Mechanics PNRPU. The behavior of the material at the considered types of deformation is described with a unified position.

Keywords: tension, torsion, deformation, elasticity, plasticity, experiment.

Изучение особенностей поведения материала и построение моделей деформирования сред требует проведения экспериментальных исследований при различных видах напряженно-деформированного состояния. В частности исследование напряженного состояния, реализуемого в случае совместного растяжения и кручения [1, 2], предполагает рассмотрение входящих в него более простых видов деформирования: одноосного растяжения и чистого сдвига (кручения). В данной работе представлены результаты экспериментов на образцах из стали 15Х2ГМФ при данных простых видах деформирования. Испытания выполнены в Центре экспериментальной механики ПНИПУ на универсальной двухосевой сервогидравлической испытательной системе Instron 8850 (рис. 1), позволяющей проводить осевое нагружение с усилием до 100 кН и нагружение кручением с моментом до 1000 Н·м.

Испытания проведены с использованием двухосевого экстензометра (рис. 2), позволяющего одновременно отслеживать деформацию образца в осевом направлении и угловую деформацию на заданной базе. Он устанавливается непосредственно на образец, тем самым исключая погрешности измерения, обусловленные податливостью нагружающей системы и несовершенством закрепления образца в захватах, поэтому обеспечивает получение более достоверных результатов. Экстензометр позволяет 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 измерительной шкалы). Регистрация деформаций осуществлялась на базе образца 10 мм. Испытания на растяжение выполнены на образцах круглого поперечного сечения (в рабочей части диаметр $d = 10$ мм). Испытания на кручение выполнены на тонкостенных трубчатых образцах, у которых отношение среднего диаметра ($d_0 = 10$ мм) к толщине стенки ($\delta = 1$ мм) равняется 10, что обеспечивает практически однородное напряженное состояние в их рабочей части.



Рис. 1. Испытательная система Instron 8850

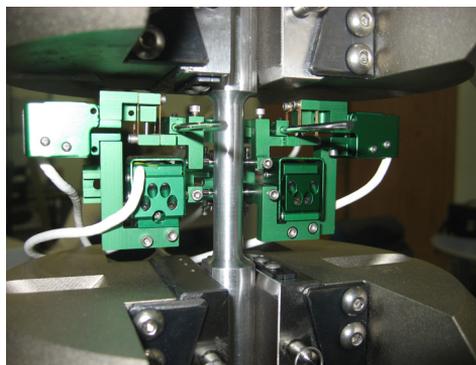


Рис. 2. Двухосевой экстензометр, установленный на образце

Основными параметрами каждого испытания были величины деформаций и соответствующих им напряжений. Регистрация деформаций – линейной ϵ и угловой γ , как было сказано выше, осуществлялась непосредственно с помощью экстензометра. Частота регистрации деформаций – 100 измерений в секунду. Через датчик силы синхронно проводилась регистрация нагрузок (осевого усилия F , Н, и момента кручения M , Н·м) с той же частотой 100 из-

мерений в секунду. По известным размерам поперечных сечений образцов нагрузки пересчитывались в напряжения по формулам:

$$\sigma = \frac{4 \cdot F}{\pi \cdot d^2}, \quad \tau = \frac{2 \cdot M}{\pi \cdot d_0^2 \cdot \delta}.$$

Таким образом, основные параметры испытания: σ , МПа, τ , МПа, ε и γ . Кроме этого, велась запись времени испытания – t , с. Скорость деформирования контролировалась по встроенному датчику захватов. Деформирование растяжением осуществлялось при постоянной скорости удлинения образца 0,4 мм/мин, деформирование кручением при постоянной скорости изменения угла закручивания 10°/мин. Построенные по результатам испытаний графики зависимостей являются точечными, т.е. представляют собой последовательный ряд экспериментальных точек, не соединенных между собой прямыми линиями.

Результаты испытания на одноосное растяжение представлены на рис. 3, *а* в виде диаграммы деформирования в координатах $\sigma - \varepsilon$. Результаты испытания на кручение (чистый сдвиг) представлены на рис. 3, *б* в виде диаграммы деформирования в координатах $\tau - \gamma$. Эксперименты проведены до момента разрушения каждого из образцов, на рисунках представлены части диаграмм, соответствующие диапазонам деформаций, которые регистрировал экстензометр.

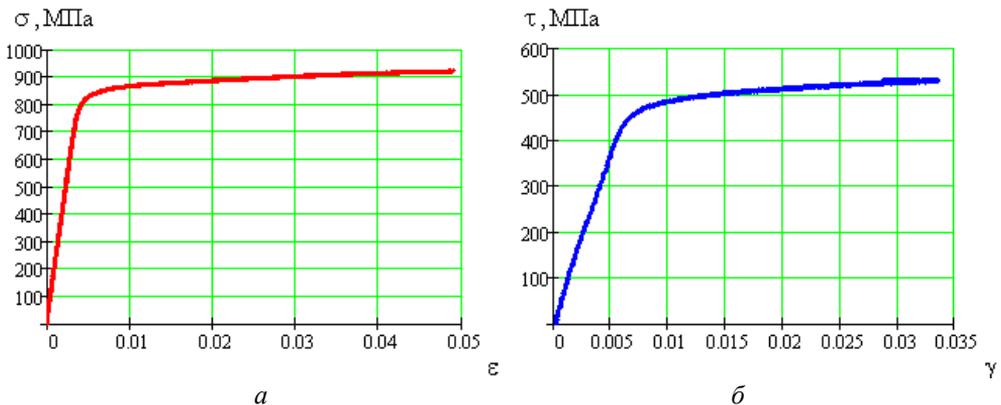


Рис. 3. Диаграммы деформирования образцов из стали 15X2ГМФ:
а – при одноосном растяжении; *б* – при чистом сдвиге

В общем случае в зависимости от условий нагружения выделяют такие свойства материала, как упругость, пластичность и вязкость или временной фактор. Обычно при комнатных температурах и умеренных скоростях нагружения вязкостью пренебрегают. Для оценки влияния временного фактора

в данных условиях испытаний был проведен следующий эксперимент: одноосное растяжение до деформации $\varepsilon = 0,01$ (до уровня, когда материал образца вошел в область достаточных пластических деформаций), фиксация деформации ε на постоянном уровне с выдержкой 5 мин, затем полная разгрузка. Графики зависимостей, построенные по результатам испытания, представлены на рис. 4, а, б. После выдержки напряжение снизилось с уровня 865 МПа до уровня 828 МПа, т.е. на 4,3 %. Таким образом, временным фактором с погрешностью 5 % можно пренебречь.

Пренебрегая временным фактором, общие деформации можно разложить на две составляющие: упругие ε_e, γ_e и пластические ε_p, γ_p . Упругие деформации согласно закону Гука при одноосном растяжении и чистом сдвиге определяются по формулам:

$$\varepsilon_e = \frac{\sigma}{E}, \quad \gamma_e = \frac{\tau}{G}. \quad (1)$$

Модуль упругости (Юнга) E определяем как тангенс угла наклона к оси абсцисс прямой линии, аппроксимирующей начальный участок диаграммы растяжения на интервале напряжений от 0,1 до 0,75 от условного предела текучести $\sigma_{0,2}$ (рис. 5). Модуль сдвига G определяем аналогичным образом по диаграмме чистого сдвига.

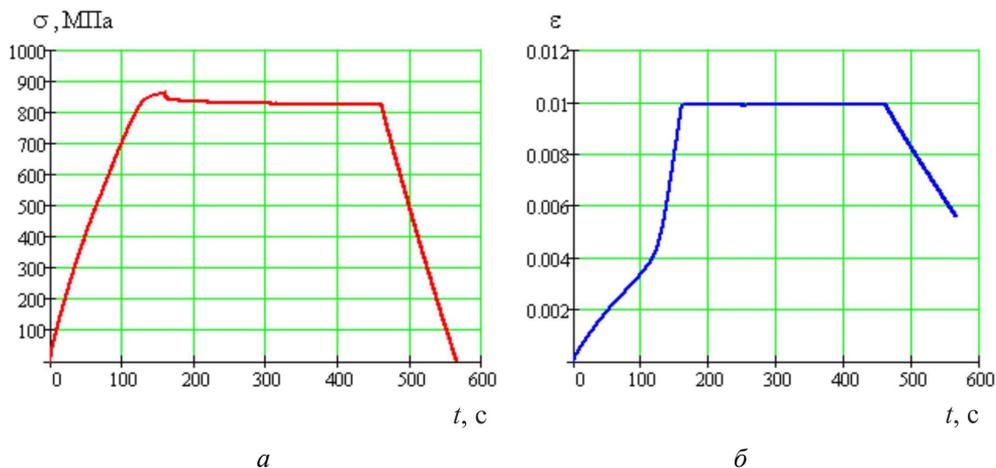


Рис. 4. Диаграмма релаксации напряжений (а), график зависимости деформация – время в зоне измерений на базе 10 мм (б) при испытании образца из стали 15Х2ГМФ в последовательности «растяжение – выдержка при постоянной деформации – полная разгрузка»

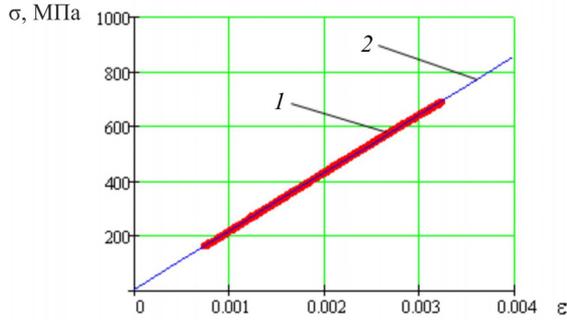


Рис. 5. Определение модуля упругости образца из стали 15X2ГМФ: 1 – начальный участок диаграммы растяжения по экспериментальным точкам; 2 – аппроксимирующая линия

Если разгрузка после деформирования идет по линейному закону и расхождение между модулями Юнга (аналогично модулям сдвига) на стадиях нагрузки и разгрузки незначительно, то для определения величин пластических деформаций достаточно из общих деформаций вычесть упругие составляющие, т.е. воспользоваться следующими формулами:

$$\varepsilon_p = \varepsilon - \frac{\sigma}{E}, \quad \gamma_p = \gamma - \frac{\tau}{G}. \quad (2)$$

Для проверки закона разгрузки проведено следующее испытание: одноосное растяжение образца до уровня напряжения, соответствующего $\sigma_{0,2}$, полная разгрузка, далее четыре цикла повторной нагрузки до достигнутого ранее уровня напряжения и последующей разгрузки. Диаграмма представлена на рис. 6, а, увеличенный фрагмент диаграммы – на рис. 6, б.

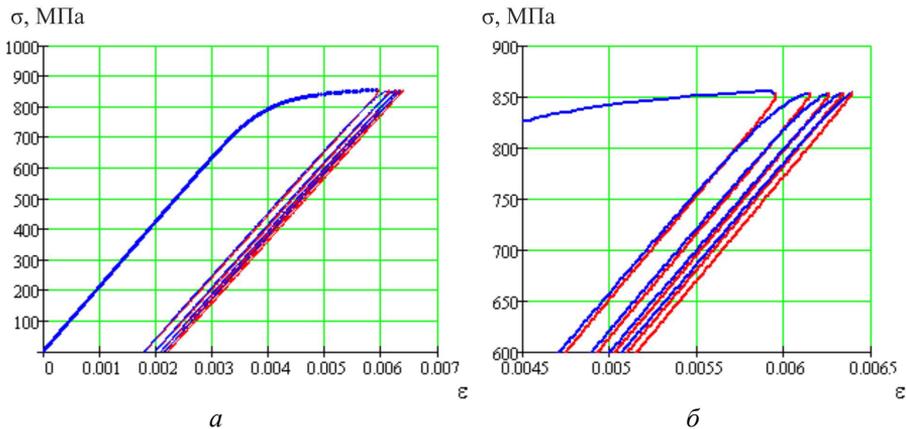


Рис. 6. Диаграмма деформирования образца из стали 15X2ГМФ при одноосном растяжении, разгрузке и последующих четырех циклах повторной нагрузки до достигнутого ранее уровня напряжения и разгрузки: а – полная диаграмма; б – увеличенный фрагмент

На рисунке видно, что разгрузка идет по линейному закону. После повторной нагрузки, дойдя до достигнутого ранее уровня напряжения, материал образца получает незначительную пластическую деформацию. Значение среднего модуля упругости по стадиям нагрузки $E = 2,11 \cdot 10^5$ МПа. Значение среднего модуля упругости по стадиям разгрузки $E = 2,04 \cdot 10^5$ МПа. Расхождение составляет 3,3 %. Таким образом, разгрузку в случае растяжении можно считать полностью упругой, изменяющейся по линейному закону, а общую деформацию рассматривать как сумму упругой и пластической. Напряжение, соответствующее величине пластической деформации $\epsilon_p = 0,002$, будет условным пределом текучести. На рис. 7 представлен фрагмент диаграммы пластического деформирования для первого образца (испытание на одноосное растяжение). На диаграмме видно, что для данного образца $\sigma_{0,2} = 840$ МПа.

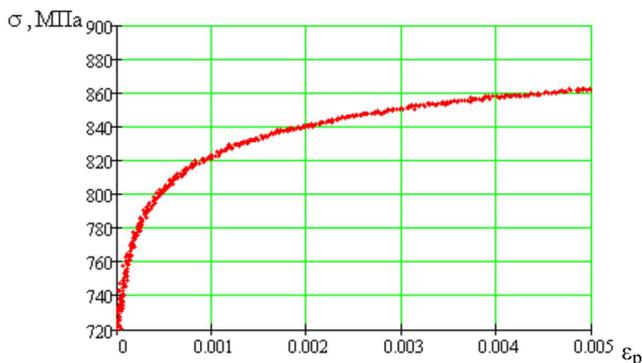


Рис. 7. Фрагмент диаграммы пластического деформирования образца из стали 15X2ГМФ при одноосном растяжении

Для случая кручения также был рассмотрен закон разгрузки на следующем эксперименте: 5 стадий деформирования кручением со сменой направления закручивания (знакопеременное кручение) при постоянной амплитуде $\gamma = 0,01$. Всего в ходе испытания получилось 5 стадий нагрузки и 4 стадии разгрузки. Диаграмма представлена на рис. 8. Модуль сдвига, определенный по первой стадии нагрузки, $G = 7,58 \cdot 10^4$ МПа, средний модуль сдвига по четырем полным стадиям разгрузки с начальной линейной частью каждой последующей стадии нагрузки $G = 7,55 \cdot 10^4$ МПа. Расхождение составляет 0,4 %. Исходя из этого, разгрузку, как и при растяжении, в случае кручения можно считать полностью упругой, изменяющейся по линейному закону, а общую деформацию также рассматривать как сумму упругой и пластической. Таким образом, с допустимой точностью можно использовать формулы (2) для определения величин пластических деформаций при растяжении и чистом сдвиге.

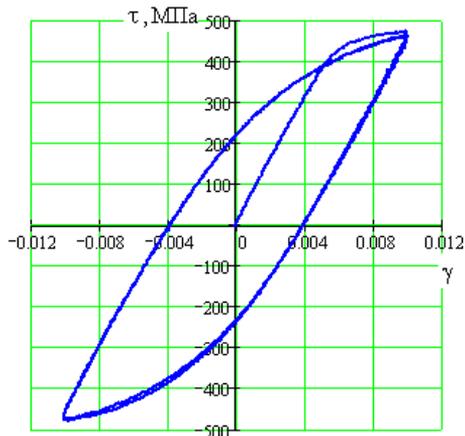


Рис. 8. Диаграмма деформирования образца из стали 15X2ГМФ при знакопеременном кручении с постоянной амплитудой $\gamma = 0,01$. Пять стадий кручения

Испытание, представленное на рис. 8, выявило ярко выраженный эффект Баушингера [3], когда первичное пластическое деформирование материала снижает его сопротивление пластическому деформированию при повторной нагрузке, имеющей направление, противоположное первичному. В данном случае величина предела пропорциональности по касательным напряжениям $\tau_{пл}$ (напряжения, до которого можно считать справедливым закон Гука), на первой стадии деформирования оказывается значительно больше, чем на следующей стадии, противоположной по направлению. Предел текучести по касательным напряжениям $\tau_{0,346}$ также на первой стадии оказывается наибольшим, соответственно $\tau_{0,346} = 474$ МПа. На второй стадии $\tau_{0,346} = 403$ МПа, на третьей и последующих стадиях он сопоставим со второй и устанавливается приблизительно на одном уровне: $\tau_{0,346} = 380 \dots 390$ МПа. Сам вид зависимости $\tau - \gamma$ после замыкания петли принимает практически постоянную форму, на которую ложатся все последующие стадии деформирования. Это можно наблюдать на рисунке, где 4-я стадия кручения практически полностью повторяет 2-ю, а 5-я практически полностью повторяет 3-ю стадию. Отличной от всех остальных оказывается только начальная стадия кручения, где произошло первичное пластическое деформирование материала.

Для описания диаграмм деформирования при одноосном растяжении и чистом сдвиге с единых позиций рассмотрим напряженное состояние, эквивалентное одноосному растяжению. В качестве эквивалентного напряжения $\sigma_{ек}$ и приращения эквивалентной пластической деформации $d\varepsilon_{ек,п}$ принимаем интенсивность напряжений σ_i и интенсивность приращений пластических деформаций $d\varepsilon_{ip}$ для случая совместного растяжения и кручения. Согласно [3] получаем следующие зависимости:

$$\sigma_{ek} = \sqrt{\sigma^2 + (K_1 \cdot \tau)^2}, \quad d\varepsilon_{ek,p} = \sqrt{d\varepsilon_p^2 + (K_2 \cdot d\gamma_p)^2},$$

где $d\varepsilon_p$ и $d\gamma_p$ – соответственно приращения линейной и угловой пластических деформаций; K_1 и K_2 – безразмерные коэффициенты, $K_1 = \sqrt{3}$, $K_2 = 1/\sqrt{3}$.

Если материал однородный и изотропный, то при одноосном растяжении не возникают угловые деформации и касательные напряжения, поэтому

$$\sigma_{ek} = \sigma, \quad d\varepsilon_{ek,p} = d\varepsilon_p, \quad (3)$$

а при чистом сдвиге не возникают линейные деформации и нормальные напряжения, поэтому

$$\sigma_{ek} = K_1 \cdot |\tau|, \quad d\varepsilon_{ek,p} = K_2 \cdot |d\gamma_p|. \quad (4)$$

Для определения линейной и угловой пластических деформаций используем формулы (2). Подставляя значения пластических деформаций и напряжений в формулы (3)–(4), переходя при этом от дифференциалов к полным деформациям, получаем экспериментальные зависимости в координатах эквивалентное напряжение (σ_{ek}) – эквивалентная пластическая деформация ($\varepsilon_{ek,p}$) при деформировании растяжением и при деформировании кручением. Для результатов первых двух испытаний на растяжение и чистый сдвиг они представлены на рис. 9.

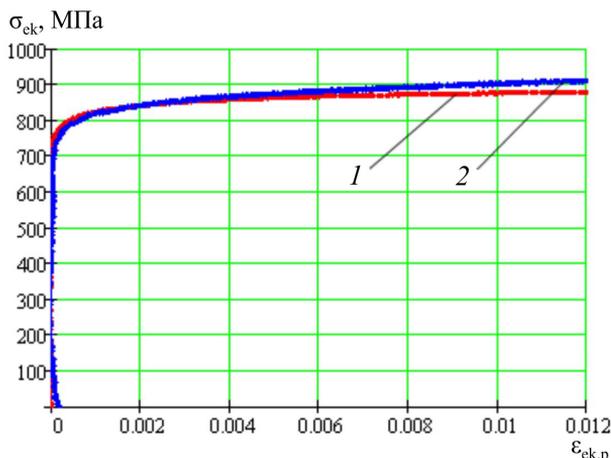


Рис. 9. Кривые пластического деформирования образцов из стали 15Х2ГМФ в координатах эквивалентное напряжение – эквивалентная пластическая деформация: 1 – при одноосном растяжении; 2 – при чистом сдвиге

На рисунке видно, что кривые достаточно хорошо согласуются вплоть до $\varepsilon_{ek,p} = 0,01$. Изменение коэффициентов K_1 и K_2 не приводит к лучшему со-

ответствию зависимостей, т.е. для данного материала они наиболее хорошо согласуются именно при значениях $K_1 = \sqrt{3}$, $K_2 = 1/\sqrt{3}$. Получается при данных коэффициентах кривую пластического деформирования при растяжении в координатах $\sigma - \varepsilon_p$ можно перевести в кривую пластического деформирования при чистом сдвиге в координатах $\tau - \gamma_p$, и наоборот. Таким образом, подтверждается, что растяжение и чистый сдвиг – это эквивалентные напряженные состояния, а для исследуемого материала частично подтверждается гипотеза о существовании единой кривой пластичности.

Для описания кривой пластического деформирования применяем уравнение вида

$$d\varepsilon_{\text{ек.п}} = A(\sigma_{\text{ек}})^m d\sigma_{\text{ек}}, \quad (5)$$

где A и m – постоянные коэффициенты. Коэффициент A удобнее выразить через условный предел текучести $\sigma_{0,2}$, так как для большинства материалов эта величина приводится в справочных данных. Проинтегрировав уравнение (5) и задав условие, что кривая пластического деформирования проходит через точку с координатами $(0,002; \sigma_{0,2})$, получаем выражение

$$\varepsilon_{\text{ек.п}} = 0,002 \left(\frac{\sigma_{\text{ек}}}{\sigma_{0,2}} \right)^{m+1}. \quad (6)$$

Показатель степени m определяется из условия наилучшего соответствия экспериментальной и теоретической кривой, для исследуемого материала $m = 32$. При построении диаграммы деформирования общую деформацию (ε или γ) рассматриваем как сумму пластической и упругой. С учетом формул (1) и (3) теоретическая диаграмма растяжения описывается зависимостью

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E} + 0,002 \left(\frac{\sigma}{\sigma_{0,2}} \right)^{m+1}. \quad (7)$$

Используя соотношения (1), (3), (4) и (6), теоретическую диаграмму деформирования при растяжении можно перевести в теоретическую диаграмму деформирования при чистом сдвиге, которая будет описываться следующей зависимостью

$$\gamma = \frac{\tau}{G} + 0,002 \cdot \sqrt{3} \left(\frac{\sqrt{3} \cdot \tau}{\sigma_{0,2}} \right)^{m+1}. \quad (8)$$

На рис. 10 представлены экспериментальные и теоретические диаграммы деформирования при растяжении ($\sigma - \varepsilon$) и при чистом сдвиге ($\tau - \gamma$).

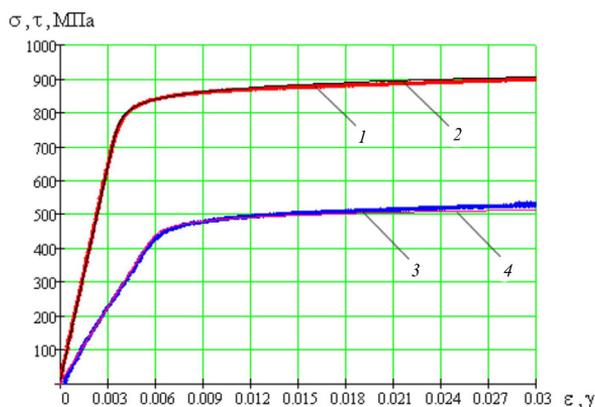


Рис. 10. Диаграммы деформирования образцов из стали 15Х2ГМФ: 1 – экспериментальная при растяжении; 2 – теоретическая при растяжении, полученная аппроксимацией экспериментальной диаграммы; 3 – экспериментальная при чистом сдвиге; 4 – теоретическая при чистом сдвиге, полученная переводом из теоретической диаграммы растяжения

Теоретическая диаграмма растяжения на рис. 10 получена аппроксимацией экспериментальной по формуле (7), а теоретическая диаграмма чистого сдвига получена переводом из диаграммы растяжения по формуле (8), т.е. исходя из испытания только на одноосное растяжение. Как видно, она достаточно хорошо согласуется с результатом независимого эксперимента на кручение вплоть до деформации 0,03. Согласно этому для исследуемого материала достаточно испытания на один вид деформирования, чтобы построить диаграммы двух различных видов деформирования: растяжения и кручения.

Список литературы

1. Исследование закономерностей упругопластического деформирования стали 15Х2ГМФ при сложном напряженном состоянии / Н.Н. Вассерман, В.Э. Вильдеман, А.А. Крюков, М.П. Третьяков // Вестник ПГТУ. Механика. – Пермь, 2010. – № 2. – С. 34–47.

2. Крюков А.А., Калугин В.Е., Вассерман Н.Н. Моделирование упруго-пластического деформирования конструкционной стали при сложном напряженном состоянии // Вестн. Самар. гос. техн. ун-та. Сер. «Технические науки». – 2011. – № 3 (31). – С. 122–128.

3. Малинин Н.Н. Прикладная теория пластичности и ползучести: учебник для вузов. – М.: Машиностроение, 1968. – 400 с.

Получено 1.02.2012