

УДК.:539.374

ЭФФЕКТ БАУШИНГЕРА И СОПУТСТВУЮЩИЕ ЯВЛЕНИЯ

РЫЧКОВ Б.А.

rychkovba@mail.ru

КОМАРЦОВ Н.М.

komartsovm@mail.ru

ЛУЖАНСКАЯ Т.А.

tatianaluzhanskaya@gmail.com

Кыргызско-Российский Славянский университет, г. Бишкек, Кыргызстан

BAUCHINGER'S EFFECT AND ATTENDANT PHENOMENONES

RYCHKOV B.A.

rychkovba@mail.ru

KOMARTSOV N.M.

komartsovm@mail.ru

LUZHANSKAYA T.A.

tatianaluzhanskaya@gmail.com

Kyrgyz-Russian Slavik University, Bishkek, Kyrgyzstan

В статье рассматривается ортогональный эффект Баушингера, который происходит в случае смены вида напряженного состояния после предварительного активного нагружения и полной разгрузки, заключающийся в уменьшении накопленной на предварительном этапе нагружения соответствующей компоненты тензора пластической деформации. Для аналитического описания этого эффекта применена концепция скольжений в трактовке М.Я. Леонова – Б.А. Рычкова.

Рассмотрим такой эффект Баушингера, который происходит в случае смены напряженного состояния при повторном нагружении после полной разгрузки и проявляется в уменьшении накопленной предварительной пластической деформации. Об этом ортогональном эффекте Баушингера иногда судят только по тому, изменяется или нет предел текучести при данном виде напряженного состояния по сравнению с его значением на начальном этапе при пропорциональном нагружении. Если значение этого предела не меняется, то говорят об отсутствии ортогонального эффекта. Однако он всегда проявляется, если учитывать указанное уменьшение накопленной деформации на первом звене траектории нагружения.

Для аналитического описания данного эффекта (как показали проведенные нами предварительные исследования) принцип Г.Мазинга и его обобщение, сделанное В.В. Москвитиним [1], не позволяет адекватно описывать данное явление. Неприменима также гипотеза о трансляции поверхности нагружения как жесткого целого. Поэтому применим концепцию скольжения для описания ортогонального эффекта Баушингера.

Будем полагать, что материал начально изотропен, а разгрузка происходит по упругому закону.

1. Повторное растяжение после кручения

Рассмотрим нагружение, при котором образец сначала выводится кручением в пластическую область, потом производится полная разгрузка и затем прикладывается растягивающее усилие. При этом оказывается, что на последнем этапе происходит уменьшение накопленной пластической деформации от кручения, т.е. пластическое раскручивание образца. Впервые это, по-видимому, наблюдал М. Фейгин [2], поэтому в дальнейшем будем называть этот эффект эффектом М. Фейгина. При первоначальном кручении в двух взаимно перпендикулярных направлениях под 45° к оси образца возникают главные деформации Γ_1 и

Γ_3 . При повторном растяжении эти деформации уже не будут главными. Если рассматривать направление, в котором происходила деформация растяжения, то деформация в этом направлении $\Gamma_1^{45^\circ}$ будет получать положительное приращение, а деформация $\Gamma_3^{45^\circ}$ (в направлении, в котором происходило сжатие) получит отрицательное приращение практически сразу со сменой знака напряжения. Именно этим характеризуется эффект Баушингера, что и приводит к уменьшению накопленной на предварительном этапе деформации.

Для аналитического описания этого эффекта применим концепцию скольжения в трактовке М.Я. Леонова [3], но вместо основного понятия данной концепции «– сопротивление сдвигу» введем в рассмотрение аналогичное ему понятие «сопротивление растяжению» для направления под 45° к оси образца, в котором напряжение меняет знак:

$$S_3^p = \tau_T(m_2) \left[1 + 2\Psi \cdot \left(-|\Gamma_3^{0*}| + \kappa \cdot \Delta\Gamma_3^0 \right) \right]. \quad (1.1)$$

Здесь Γ_3^{0*} – накопленная на предварительном этапе основная деформация, $\Delta\Gamma_3^0$ – приращение основной деформации в данном направлении, $\tau_T(m_2)$ – предел текучести при растяжении, Ψ – функция упрочнения, κ – коэффициент, отвечающий за изменение уровня вторичной пластической деформации при достижении, прикладываемом напряжением значения первоначального предела текучести.

Считается, что приращение пластической деформации состоит из двух составляющих [3]: основной $\Delta\Gamma_i^0$ и дополнительной $\Delta\Gamma_i^\partial$ деформации. От растяжения на направление под 45° к оси образца дает вклад только дополнительная деформация $\Delta\Gamma_1^\partial$ (поскольку $\Delta\Gamma_1^0 = -\Delta\Gamma_3^0$, $\Delta\Gamma_3^\partial = 0$), и в данном направлении она равна $\Delta\Gamma_1^\partial/2$.

Выражая из (1.1) приращение основной деформации, учитывая при этом, что сопротивление растяжению численно равно (за счет преобразования компонент тензора при переходе к повернутым осям) соответствующей компоненте касательного напряжения. В данном случае $\tau_m = \sigma_x/2$, тогда имеем:

$$\Delta\Gamma_3^0 = \frac{1}{\kappa} \left(\frac{1}{2\Psi} \left[\frac{\tau_m}{\tau_T(m_2)} - 1 \right] + |\Gamma_3^{0*}| \right). \quad (1.2)$$

Таким образом, при последующем растяжении деформации в направлениях, которые были главными при кручении, определяются следующим образом:

$$\begin{aligned} \Gamma_1^{45^\circ} &= \Gamma_1^* + \Delta\Gamma_1^\partial/2 - \Delta\Gamma_3^0, \\ \Gamma_3^{45^\circ} &= \Gamma_3^* + \Delta\Gamma_1^\partial/2 + \Delta\Gamma_3^0. \end{aligned} \quad (1.3)$$

Как показали эксперименты, предварительное кручение не влияет на диаграмму последующего растяжения, поэтому в расчетах оно определяется так, как если бы нагружение было из исходного недеформированного состояния.

2. Повторное кручение после растяжения

Теперь рассмотрим нагружение, при котором образец сначала выводится растяжением в пластическую область, потом производится полная разгрузка и затем прикладывается крутящий момент. При этом на последнем этапе происходит уменьшение накопленной пластической деформации от растяжения, т.е. пластическое укорочение образца. При первоначальном растяжении в направлении под 45° к оси образца возникают деформации $\Gamma_1^{45^\circ}$ и $\Gamma_3^{45^\circ}$, имеющие один и тот же положительный знак. При повторном кручении эти деформации будут главными. Причем Γ_1 продолжает получать положительное приращение, а в направлении деформации $\Gamma_3^{45^\circ}$ напряжение поменяет знак, и она получит отрицательное приращение. Именно этим характеризуется эффект Баушингера, что и приводит к уменьшению накопленной на предварительном этапе деформации.

Для аналитического описания этого эффекта, как и в случае смены кручения растяжением, вместо сопротивления сдвигу запишем сопротивление сжатию для направления под 45° к оси образца, в котором напряжение меняет знак:

$$S_3^c = \tau_T(m_2) \left[1 + 2\Psi \cdot \left(-\Gamma_1^{\partial*} / 2 + \kappa \cdot \Delta\Gamma_3^0 \right) \right]. \quad (2.1)$$

Здесь параметры такие же, как и для формулы (1.1), кроме одного: $\Gamma_1^{\partial*} / 2$ – накопленная деформация при растяжении, спроектированная на направление под 45° к оси образца по тензорному правилу перехода от одних осей к другим (поскольку $\Gamma_1^0 = -\Gamma_3^0$, $\Gamma_3^{\partial} = 0$).

Выразим из (2.1) приращение основной деформации, учитывая при этом, что сопротивление сжатию численно равно соответствующей компоненте касательного напряжения. В данном случае $\tau_m = \tau_{xy}$, тогда имеем:

$$\Delta\Gamma_3^0 = \frac{1}{\kappa} \left(\frac{1}{2\Psi} \left[\frac{\tau_m}{\tau_T(m_2)} - 1 \right] + \frac{\Gamma_1^{\partial*}}{2} \right). \quad (2.2)$$

Таким образом, при последующем кручении деформации в направлении его главных осей определяются следующим образом:

$$\begin{aligned} \Gamma_1 &= \Gamma_1^{\partial*} / 2 + \Delta\Gamma_3^0, \\ \Gamma_3 &= \Gamma_1^{\partial*} / 2 - 2\Delta\Gamma_3^0. \end{aligned} \quad (2.3)$$

Как показали эксперименты, предварительное растяжение влияет на диаграмму последующего кручения, начиная с самых малых уровней возникающего напряжения. Это проявляется в том, что на диаграмме повторного деформирования начальный ее участок (имеющий вид почти прямой линии) имеет меньший наклон относительно оси полной (упруго-пластической) деформации по сравнению с соответствующим упругим участком диаграммы чистого кручения. Однако данное обстоятельство нельзя трактовать как изменение упругих параметров материала при осуществляемом нагружении. Дело, по сути, состоит в следующем.

Возникающий в направлении деформации $\Gamma_3^{45^\circ}$ эффект Баушингера накапливается (если судить по приращениям деформации) настолько постепенно, что и вызывает наблюдаемую картину кажущегося изменения модуля упругости при сдвиге.

3. Сопоставление построенных определяющих соотношений с экспериментальными данными

Б.А. Рычковым были проведены две серии опытов на тонкостенных трубчатых образцах стали 45 и стали 40Х. В первой серии измерялась только суммарная деформация от датчиков, наклеенных в двух взаимно перпендикулярных направлениях под 45° к оси образца, т.е. сразу деформация сдвига от крутящего момента. Во второй серии для стали 40Х деформации в указанных направлениях фиксировались отдельно.

Диаграммы знакопеременного кручения для одного из испытанных образцов показаны на рис. 1.1 и 1.2. Деформации, измеренные в двух взаимно перпендикулярных направлениях (под углом 45° к оси образца), при кручении являются главными, как и напряжения $\sigma_1 = -\sigma_3 = \tau$.

При нагружении из исходного состояния один из датчиков работал на растяжение (рис. 3.1), а другой – на сжатие (рис. 3.2)

При кручении образцов из исходного состояния образовалась площадка текучести, а при кручении в обратном направлении возник эффект Баушингера. При повторном нагружении растяжением, после указанного знакопеременного кручения и полной разгрузки, остаточная деформация от предварительного кручения уменьшилась в силу ортогонального эффекта Баушингера.

Наклоны упругих участков деформирования при повторном нагружении отличаются от соответствующих участков при предварительном нагружении, что объясняется различием в виде напряженного состояния в том и другом случае. Для примера на рис. 3.2 показан (темными точками) результат пересчета продольной и поперечной деформаций (измеренных в

опыте) на направление под 45^0 к оси образца. Эти расчетные и измеренные упругие деформации совпали, что свидетельствует о достаточной точности измерения деформаций.

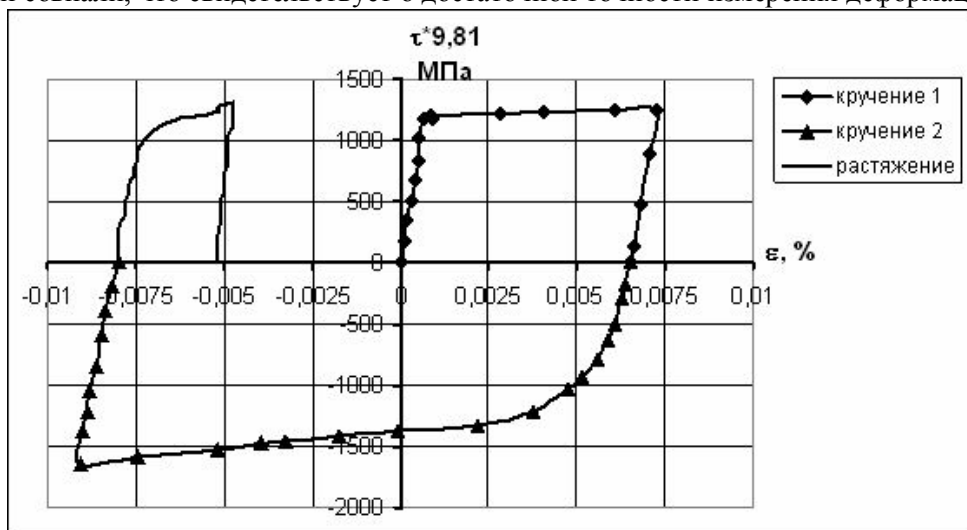


Рис. 3.1

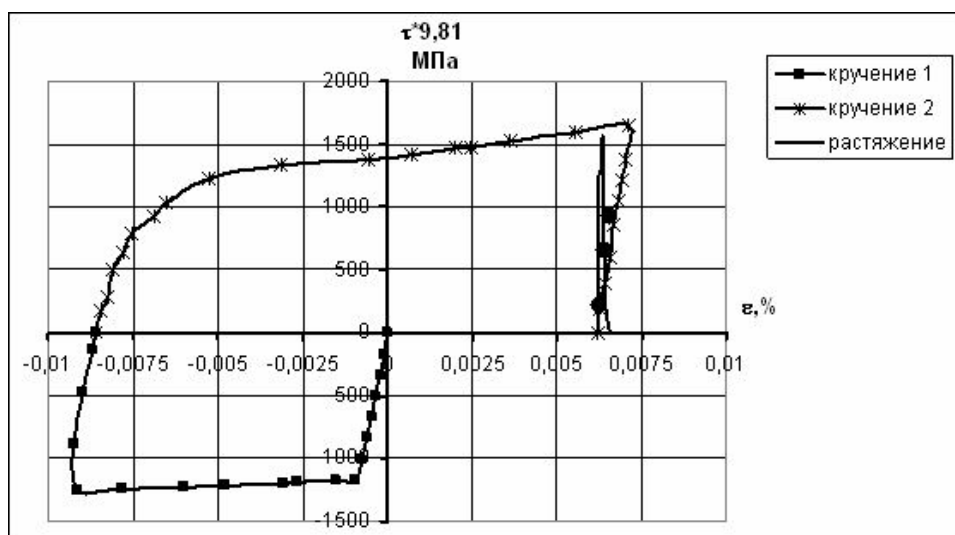


Рис. 3.2

Наклоны упругих участков деформирования при повторном нагружении отличаются от соответствующих участков при предварительном нагружении, что объясняется различием в виде напряженного состояния в том и другом случае. Для примера на рис. 3.2 показан (темными точками) результат пересчета продольной и поперечной деформаций (измеренных в опыте) на направление под 45^0 к оси образца. Эти расчетные и измеренные упругие деформации совпали, что свидетельствует о достаточной точности измерения деформаций.

На рис. 3.2 при повторном нагружении наблюдалась только упругая деформация, поскольку в этом направлении при предварительном кручении происходила деформация растяжения. Тогда как на рис. 3.1 при таком же уровне повторного нагружения отмечено появление упруго-пластической деформации, поскольку в этом направлении при предварительном кручении происходила деформация сжатия. Именно такое поведение материала при повторном нагружении и характеризует эффект Фейгина, который может быть отображен согласно развиваемой модели, как показано в предыдущих разделах.

На рис.3.3 – 3.4 приведены диаграммы пластического «раскручивания» образца № 12 стали 45 и деформации этого образца в направлении под 45^0 к его оси после предварительного кручения, полной разгрузки и последующего растяжения.

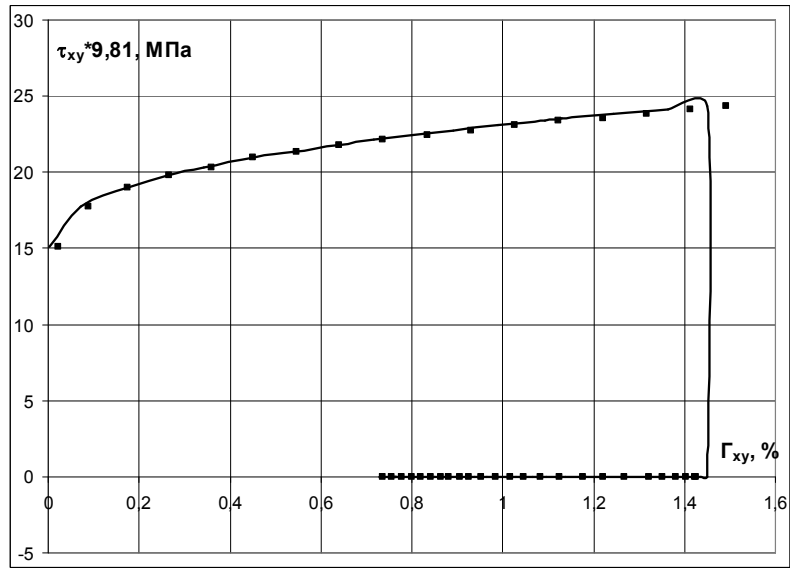


Рис. 3.3. Зависимость $\tau_{xy} \sim \Gamma_{xy}$ для образца № 12
(сплошная линия – расчеты, квадраты – эксперимент)

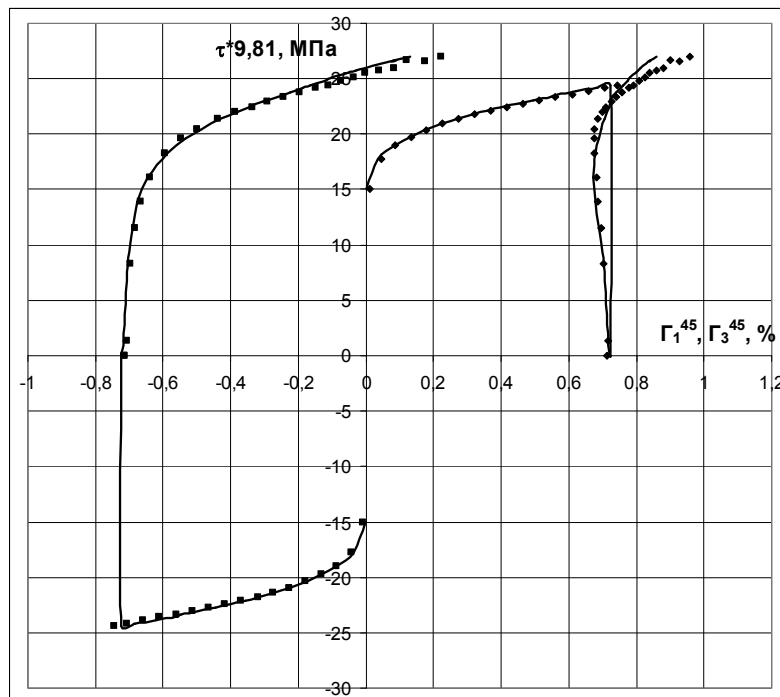


Рис 3.4. Зависимость напряжений и деформаций для образца № 12
в направлении под 45° к его оси
(сплошная линия – расчеты, квадраты – эксперимент).

Литература

1. *Москвитин В.В.* Пластичность при переменных нагружениях. – М.: Изд-во МГУ, 1965. 264 с.

2. *Feigen M.*, Inelastic behavior under combine tension and torsion, Proceedings of the second U. S. National Congress of Applied Mechanics, 469 – 476 (1954).
3. *Комарцов Н.М., Рычков Б.А.* Деформация сдвига как основной аргумент прочностной характеристики материала // Вестник Кыргызско-Российского Славянского университета. 2007. Т. 7. № 8. С. 123 – 129.