

УДК 621.73.042

Хван А. Д.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК СОПРОТИВЛЕНИЯ МАТЕРИАЛОВ ПЛАСТИЧЕСКОМУ ДЕФОРМИРОВАНИЮ

Во многих видах обработки металлов давлением заготовки подвергаются немонокотному нагружению. При этом для описания пластического состояния формообразующихся деталей используются различные модели упрочняющихся тел, включающие в себя те или иные характеристики сопротивления материалов пластическому деформированию.

Результаты исследований [1], свидетельствуют о достаточно хорошем соответствии предложенной Г. Бакхаузом [2] теории анизотропно упрочняющегося тела реальным свойствам многих конструкционных металлов. В данной модели наряду с кривой течения дополнительно используются наследственная функция $\varphi(e - \varepsilon)$ и характеризующая эффект Баушингера функция $\beta(e)$, где e – накопленная деформация, ε – деформация, при достижении которой происходит изменение направления деформирования. Предполагается, что эти характеристики сопротивления материалов пластическому деформированию являются независимыми от истории нагружения и вида напряженного состояния.

В работе [1] предлагается определять указанные функции по данным испытаний цилиндрических образцов в цикле нагружения растяжение – сжатие или в другом виде реверсивного нагружения. Однако эти функции можно было бы определять и при других циклах немонокотного нагружения, соответствующих реальному характеру деформирования, что в некоторых случаях может быть более приемлемым по сравнению с реверсивным нагружением.

Целью работы является исследование возможности оценки функций β и φ по результатам испытания образцов в следующих циклах нагружения: растяжение – кручение («р–к»); сжатие – кручение («с–к»); кручение – растяжение («к–р») и кручение – сжатие («к–с»).

Для определения указанных характеристик сопротивления материалов пластическому деформированию необходимо иметь соответствующие формулы, получаемые согласно принятому определению для параметра β и на основании модели упрочняющегося тела Г. Бакхауза для наследственной функции φ . При этом следует отметить, что в испытуемых образцах при их нагружении должно быть реализовано однородное напряженное состояние по всему объему деформируемой части. В связи с этим в указанных циклах нагружения подвергаться испытанию должны тонкостенные трубки, и предлагаемые ниже соотношения для определения параметра β и наследственной функции φ устанавливаются исходя из расчетной схемы деформирования трубок.

Параметр β для циклов нагружения «р–к» и «с–к» предлагается определять соответственно по соотношениям:

$$\beta(e) = \frac{\sqrt{3}\tau_{0,3}(e)}{\sigma_p(e)} ; \quad (1)$$

$$\beta(e) = \frac{\sqrt{3}\tau_{0,3}(e)}{\sigma_c(e)} . \quad (2)$$

Для циклов же нагружения «к–р» и «к–с» этот параметр определяется соответственно по формулам:

$$\beta(e) = \frac{\sigma_{0,2}^p(e)}{\sqrt{3}\tau(e)} ; \quad (3)$$

$$\beta(e) = \frac{\sigma_{0,2}^c(e)}{\sqrt{3}\tau(e)}. \quad (4)$$

В представленных соотношениях $\tau_{0,3}(e)$ – условный предел текучести на сдвиг с допуском на пластическую деформацию 0,3 %; $\sigma_p(e), \sigma_c(e)$ – напряжения растяжения и сжатия, соответствующие накопленной деформации e , при которой происходит изменение направления деформирования; $\tau(e)$ – касательное напряжение при деформации e ; $\sigma_{0,2}^p(e), \sigma_{0,2}^c(e)$ – условные пределы текучести на растяжение и сжатие после кручения заготовок до накопленной деформации e .

При определении наследственной функции φ рассматриваются уравнения состояния [2] применительно к выше указанным циклам нагружения тонкостенных трубок.

1. Растяжение – кручение, сжатие – кручение.

Применительно к данному виду нагружения круглой заготовки напряженно-деформированное состояние характеризуется следующими соотношениями, записанными в цилиндрической системе координат $x_1 = z$; $x_2 = \rho$; $x_3 = \eta$.

$$S_z = S_\rho = S_\eta = S_{z\rho} = S_{\rho\eta} = 0; \quad (5)$$

$$S_{z\eta} = \tau(e) = \frac{2}{3}\sigma_0(e)\frac{d\varepsilon_{z\rho}}{de} - \frac{1}{3}[1 - \beta(\varepsilon)]\sigma_0(\varepsilon)\varphi(e - \varepsilon) \left[\left(\frac{d\varepsilon_{z\eta}}{de} \right)_2 - \left(\frac{d\varepsilon_{z\eta}}{de} \right)_1 \right]. \quad (6)$$

Здесь $d\varepsilon_{z\eta} = \sqrt{3}de/2$ – компонента приращения пластической деформации на этапе кручения; $\tau(e)$ – касательное напряжение при кручении. Индексы «1» и «2» у производных $d\varepsilon_{z\eta}/de$ указывают на этапы нагружения соответственно растяжение (сжатие) и кручение. На первом этапе нагружения деформации сдвига отсутствуют и поэтому $(d\varepsilon_{z\eta}/de)_1 = 0$.

С учетом отмеченного из выражения (6) следует:

$$\varphi(e - \varepsilon) = \frac{[\sigma_0(e) - \sqrt{3}\tau(e)]}{\sigma_0(\varepsilon)[1 - \beta(\varepsilon)]}. \quad (7)$$

В этом соотношении необходимо иметь в виду, что при растяжении и сжатии интенсивность напряжений равна соответственно напряжениям растяжения и сжатия $\sigma_0 = \sigma_\rho = \sigma_c$.

На рис. 1 показана схема, согласно которой определяются все необходимые параметры данного выражения.

2. Кручение – растяжение (сжатие).

В силу приобретенной деформационной анизотропии при растяжении (сжатии) предварительно закрученной заготовки могут возникнуть угловые деформации в последней. В связи с этим рассматривается деформирование заготовок в жестких направляющих, обеспечивающих растяжение (сжатие) заготовки без взаимных поворотов ее головок в захватах испытательной машины. Тогда уравнения в системе координат z, ρ, η примут вид:

$$\left. \begin{aligned} S_\eta = S_\rho = -\frac{\sigma_z}{3}; S_z = \frac{2}{3}\sigma_z - \text{при растяжении;} \\ S_\eta = S_\rho = \frac{\sigma_z}{3}; S_z = -\frac{2}{3}\sigma_z - \text{при сжатии.} \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

$$S_{z\eta} = -\frac{1}{3}\sigma_0(\varepsilon)[1-\beta(\varepsilon)]\varphi(e-\varepsilon)\left[\left(\frac{d\varepsilon_{z\eta}}{de}\right)_2 - \left(\frac{d\varepsilon_{z\eta}}{de}\right)_1\right]. \quad (9)$$

$$S_z = \pm \frac{2}{3}\sigma_z(e) = \frac{2}{3}\sigma_0(e)\left(-\frac{d\varepsilon_z}{de}\right) - \frac{1}{3}[1-\beta(\varepsilon)]\sigma_0(\varepsilon)\varphi(e-\varepsilon)\times\left[\left(\frac{d\varepsilon_z}{de}\right)_2 - \left(\frac{d\varepsilon_z}{de}\right)_1\right]. \quad (10)$$

Здесь индекс «1» – относится к первому этапу нагружения – кручению; «2» – ко второму этапу нагружения – растяжению (сжатию); знак «+» относится к растяжению, «-» – к сжатию.

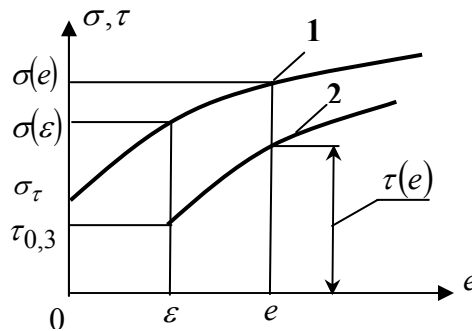


Рис. 1. Схема к расчету наследственной функции φ

Следует отметить, что производная $(d\varepsilon_z/de)$ является переменной, стремящейся с увеличением деформации на втором этапе нагружения к единице. В работе [1] отмечено, что уже при деформациях $\Delta e = e - \varepsilon > 0,05$ $(d\varepsilon_z/de) \approx 1$. Таким образом, используя выражение (7) для определения наследственной функции φ , примем в первом приближении $(d\varepsilon_z/de) = 1$ во всем диапазоне изменения деформации Δe на втором этапе нагружения заготовки.

После решения уравнения (7) относительно функции $\varphi(e-\varepsilon)$ с учетом представленных выражений получим для обоих циклов нагружения заготовки:

$$\varphi(e-\varepsilon) = \frac{[\sigma_0(e) - \sigma_p(e)]}{\sigma_0(\varepsilon)[1-\beta(\varepsilon)]}. \quad (11)$$

На рис. 2 показаны все необходимые для определения φ характеристики данного соотношения.

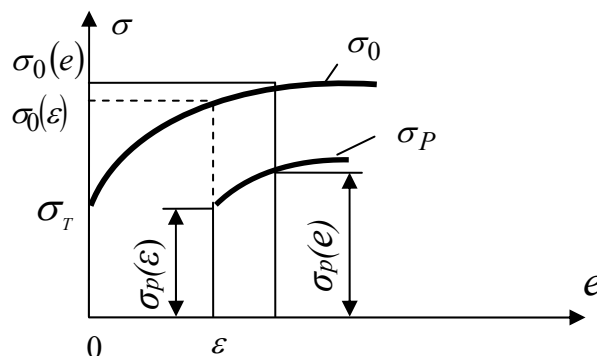


Рис. 2. Схема к определению наследственной функции φ

Жесткие требования, связанные с обеспечением однородного напряженного состояния в испытуемых образцах, в реальных условиях деформирования тонкостенных трубок кручением являются практически выполнимыми только лишь при малых упруго – пластических деформациях (в пределах $e \approx 0,05$). При деформациях $e > 0,05$ трубки теряют устойчивость.

Для определения же рассматриваемых характеристик сопротивления пластическому деформированию необходимо иметь опытные данные при деформациях более 0,05. В связи с этим нужно разрабатывать соответствующие методики испытания цилиндрических образцов сплошного сечения.

В настоящей работе из-за невозможности закручивания тонкостенных трубок до больших степеней пластической деформации будут рассматриваться результаты испытаний сплошных образцов, которые как показывают представленные в работе [3] данные с достаточной точностью можно считать адекватными опытными данным испытаний трубок.

Были выполнены испытания на образцах диаметром $d_0 = 17$ мм из сталей 20, 35 и IX18Н9Т. Образцы (по 3 шт.) для каждой из приведенных сталей предварительно растягивались до накопленных деформаций $\varepsilon = 0,04, 0,08, 0,126$; после чего закручивались на крутильной машине КМ-50 с целью получения данных для построения диаграммы кручения $M = M(\gamma)$.

Диаграмму сдвига строили по диаграмме кручения, используя при этом известную формулу П. Людвига [4]. Величину условного предела текучести на сдвиг $\tau_{0,3}(\varepsilon)$ определяли в соответствии со стандартной методикой [5] по опытным данным, полученным с помощью специального угломера [1].

На рис. 3 приведены опытные значения параметра β для исследованных сталей: крестики – сталь 20; светлые точки – сталь 35; треугольники – сталь IX18Н9Т; сплошные линии – усредненные значения функции β .

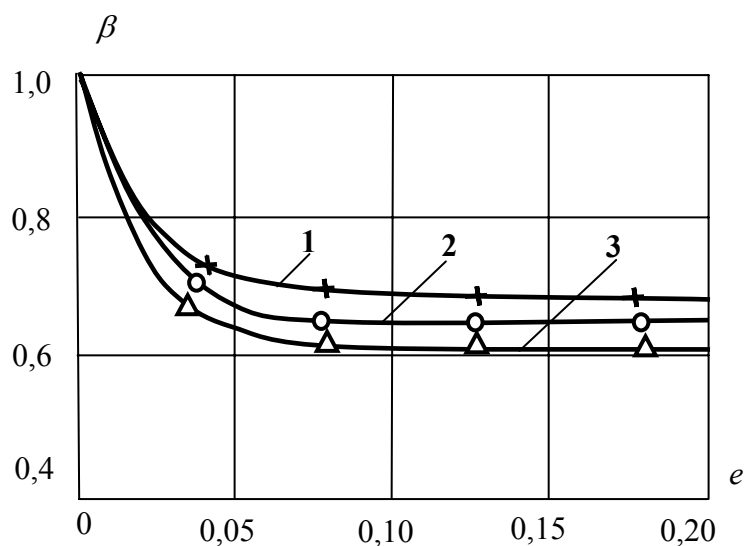


Рис. 3. Графики изменения параметра β

Результаты анализа представленных данных показывают, что характер изменения этих функций такой же, что и для данных, полученных испытанием образцов в цикле нагружения растяжение – сжатие [1].

На рис. 4 представлены опытные значения наследственной функции для стали 20. Здесь: сплошная линия – усредненные значения φ ; светлые кружочки – $\varepsilon = 0,04$; крестики – $\varepsilon = 0,08$; треугольники – $\varepsilon = 0,126$.

В работе [1] предлагается с целью реализации компьютерных технологий в обработке металлов давлением опытные значения функций β и φ аппроксимировать соответственно уравнениями:

$$\beta = \beta_0 + (1 - \beta_0) \exp(-100e); \quad (12)$$

$$\varphi = \varphi_0 + (1 - \varphi_0) \exp[c_1(e - \varepsilon)^{c_2}] \quad (13)$$

Здесь $\beta_0, \varphi_0, c_1, c_2$ – характеристики материала, определяемые статистической обработкой опытных данных испытаний образцов на реверсивное нагружение.

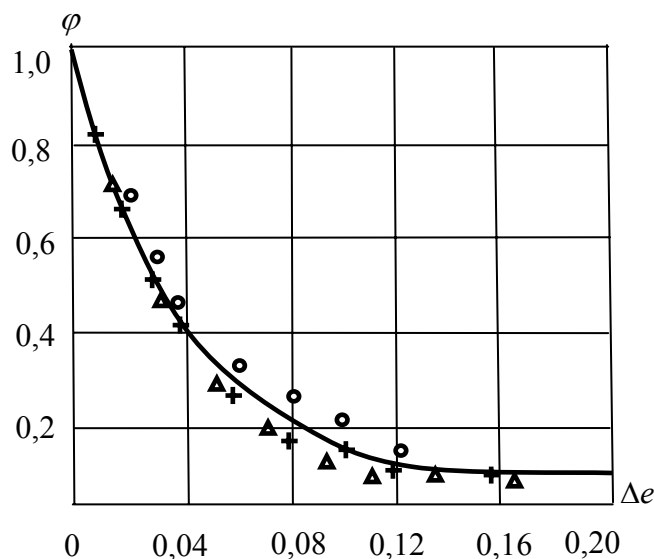


Рис. 4. Изменение наследственной функции

Эти характеристики для исследованных сталей представлены в табл. 1.

Таблица 1

Характеристики материалов

Материал	β_0	φ_0	$c_1,$ (-)	c_2
Сталь 20	0,7 (0,45)	0,10 (0,22)	33,01 (24,0)	1,01 (0,73)
Сталь 35	0,65 (0,40)	0,12 (0,25)	43,38 (85,9)	1,00 (1,13)
1Х18Н9Т	0,61 (0,38)	0,12 (0,16)	31,13 (75,0)	0,98 (1,00)

Здесь в скобках указаны для сравнения значения представленных коэффициентов, определенных по данным испытаний на растяжение – сжатие [1].

Из сопоставления приведенных данных следует, что характеристики исследованных металлов, установленные по двум методикам, отличаются существенно, за исключением коэффициента c_2 . Однако очень важная для оценки пластического состояния заготовок наследственная функция φ , определенная по данным испытаний при рассмотренных видах немоного нагружения, может быть практически независимой от вида испытаний. В связи с этим на рис. 5 приведены данные расчета функции φ по соотношению (13) при принятых значениях коэффициентов табл. 1. Здесь сплошная линия – по данным испытания на растяжение – кручение; штриховая линия – на растяжение – сжатие. Как видим, аппроксимированная соотношением (13) наследственная функция φ может быть использована при оценке пластического состояния металлов с применением определенных испытаний образцов в цикле нагружения растяжение – кручение характеристик φ_0, c_1 и c_2 .

Таким образом, немонотонное нагружение образцов в цикле растяжение – кручение может быть использовано для оценки наследственной функции φ пластически деформируемых металлов. Что же касается остальных рассмотренных в этом разделе видов немонотонного нагружения, то возможности применения их для оценки характеристик сопротивления материалов пластическому деформированию будут установлены в дальнейших исследованиях.

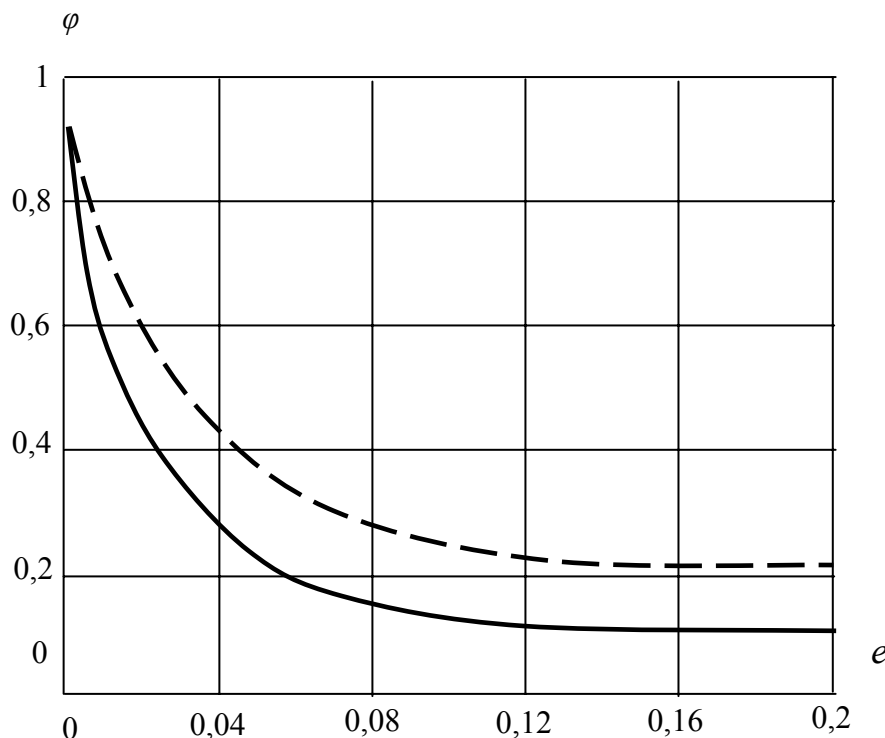


Рис. 5. Расчетное значение наследственной функции (сталь 20)

ВЫВОДЫ

Получены соотношения для оценки характеристик сопротивления материалов пластическому деформированию по данным испытаний образцов нагружения растяжение (сжатие) – кручение и кручение – растяжение (сжатие). При этом определяются функции, определяющие эффект Баушингера и наследственные свойства материалов при немонотонном нагружении.

ЛИТЕРАТУРА

1. Хван Д. В. Повышение эффективности в обработке металлов давлением / Д. В. Хван. – Воронеж, Воронеж : Воронежский государственный университет, 1995. – 224 с.
2. Бакхауз Г. Анизотропия упрочнения. Теория в сопоставлении с экспериментом / Г. Бакхауз // Изв. АН СССР. Механика твердого тела, 1976. – № 6. – С. 12–129.
3. Хван А. Д. Упрочнение металлов реверсивным кручением / Д. В. Хван // Техника машиностроения, 2003. – № 2. – С. 33–35.
4. Людвик П. Основы технологической механики / П. Людвик // Расчеты на прочность. – М.: Машиностроение, 1920. – Вып. 15. – С. 130–166.
5. ГОСТ 3565-80. Металлы. Методы испытаний на кручение. – М., 1980.

Хван А. Д. – канд. техн. наук, доц. ВГТУ.

ВГТУ – Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия.

E-mail: prmex@prmex.vorstu.ru