

В. А. Огородников

Винницкий национальный технический университет

И. А. Деревенько

Винницкий национальный аграрный университет

А. М. Миколайчук

Винницкий национальный технический университет

### Анизотропное пластическое упрочнение цилиндрических заготовок

*Отримано залежність крутного моменту від абсолютного кута закручування анізотропно – зміцнюючихся матеріалів, що проявляють ефект Баушингера, яка дозволяє враховувати анізотропне зміцнення металу при крученні попередньо розтягнутих заготовок. Запропоновано використовувати пластичну деформацію розтягування або стиснення з подальшим закручуванням як зміцнюючу обробку заготовок валів, виготовлених з не термообробленого металу.*

*Ключові слова: крутний момент, умовна межа текучості на зсув, анізотропне зміцнення.*

*Dependence of twisting moment is got on the absolute corner of rollup anisotropic - strengthening materials that show the effect of Bauschinger, that allows to take into account the anisotropic strengthening of metal at twisting of the preliminary stretched purveyances. It offers to use the flowage of stretch or compression with a further rollup as strengthening treatment of purveyances of the billows made from the not heat-treated metal.*

*Keywords: twisting moment, conditional limit of fluidity on a change, anisotropic strengthening.*

**Вступление.** Известно, что одним из факторов технологического наследия в процессах холодной обработки металлов давлением является упрочнение. В машиностроении применяют различные способы упрочнения – роликовая обкатка, дробеструйная обработка, вибронакатывание, ультразвуковые выглаживания и др. Одним из способов упрочнения можно предложить для деталей типа «вал» пластическим осевым деформированием с последующим закручиванием [1]. Однако в этом случае, необходимо разработать расчетный аппарат, с помощью которого можно оценивать энергосиловые параметры процесса, а также знать степень накопленных деформаций в процессе пластического деформирования.

Задачей данной работы является разработка расчетного аппарата, позволяющего оценивать крутящий момент и степень деформации цилиндрических заготовок различных анизотропно – упрочняющихся материалов, цветных сплавов, малоуглеродистых сталей, аустенитных нержавеющей и др. сталей. При проектировании технологических процессупрочняющей обработки заготовок валов необходимо знать величину повышенного значения предела текучести на сдвиг  $\tau_{0,2}$ , который является важной характеристикой прочности металлов.

В данной статье рассматривается задача оценки степени повышения  $\tau_{0,2}$  при кручении валов после предварительного их осевого деформирования до некоторой накопленной пластической деформации  $e_u = \varepsilon_0$ . Напряженно – деформированное состояние заготовок при кручении определяем в цилиндрической системе координат (см. рис.1).

**Основная часть.** Компоненты тензора приращений деформаций:

$$\left. \begin{aligned} d\varepsilon_{rz} = d\varepsilon_{r\varphi} = 0; d\varepsilon_{z\varphi} = 0 \\ d\varepsilon_z = -2d\varepsilon_z = -2d\varepsilon_\varphi \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

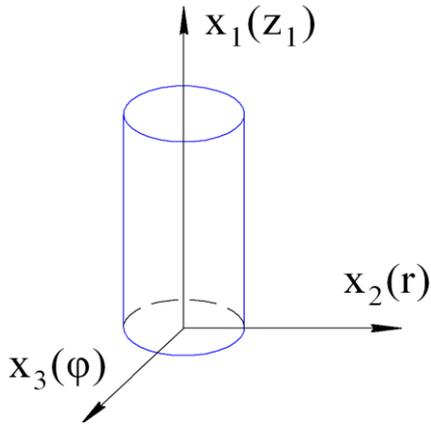


Рис.1 - Цилиндрический образец в системе координат 1, 2, 3(z, r, φ)

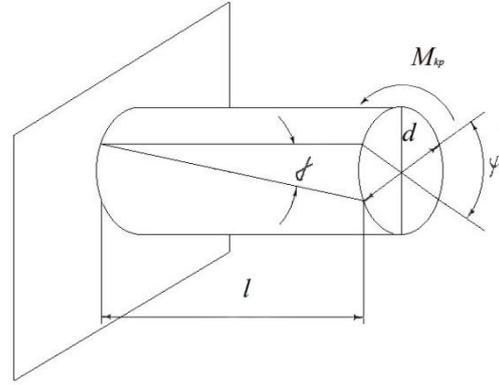


Рис. 2 - Схема кручения цилиндрического образца

В работе [2] предложено уравнения координат центра поверхности нагружения согласно теории Г. Бакхауза представить в виде:

$$\alpha_{ij} = \frac{1 - \beta(e_0)}{3} \sigma_u(e_u) \frac{d\varepsilon_{ij}}{de_u} - \frac{1}{3} \int_0^{e_u} [1 - \beta(e_u^*)] \sigma_u(e_u^*) \varphi(e_u - e_u^*) \frac{d^2\varepsilon_{ij}}{de_u^{*2}} de_u^*, \quad (2)$$

где  $\varphi(e_u - e_u^*)$  - функция, характеризующая наследственное влияние истории нагружения;  $e_u^*$  - переменная подинтегральной функции.

Функции  $\varphi(e_u - e_u^*)$ ,  $\sigma_u(e_u)$ ,  $\beta(e_u)$  являются инвариантными, не зависящими от вида напряженного состояния и истории нагружения. Их следует рассматривать как характеристики материала, которые используются в принятой модели.

Уравнения состояния, согласно ассоциированного закона течения запишем в виде:

$$d\varepsilon_{ij} = \frac{3}{2} \frac{de_u}{\sigma_u} (S_{ij} - \alpha_{ij}), \quad (3)$$

где  $\overline{\sigma_u} = \overline{\sigma_u}(e_u)$  - диаграмма деформирования, учитывающая анизотропию (характеристика материала).

$$\overline{\sigma_u} = \frac{1 + \beta(e_u)}{2} \sigma_u(e_u). \quad (4)$$

В (4)  $\beta(e_u) = \frac{\sigma_{0,2}}{\sigma}$  - отношение условного предела текучести на сжатие с допуском на пластическую деформацию  $e_u=0,002$  к напряжению растяжения до интенсивности деформации  $e_u$ .

Компоненты девiatorа напряжений с учетом (2):

$$S_{ij} = \frac{2}{3} \sigma_u(e_u) \frac{d\varepsilon_{ij}}{de_u} - \frac{1}{3} \int_0^{e_u} [1 - \beta(e_u^*)] \sigma_u(e_u^*) \varphi(e_u - e_u^*) \frac{d^2\varepsilon_{ij}}{de_u^{*2}} de_u^*. \quad (5)$$

В условиях свободного кручения вала когда он в зависимости от предварительного нагружения, может свободно удлиняться или укорачиваться, компоненты прироста пластических деформаций определяются по формулам (1). Компоненты девiatorа напряжений согласно (5) равны:

$$\left. \begin{aligned} S_{zr} = S_{r\varphi} = 0; S_r = S_\varphi = -0,5S_z \\ S_z = \frac{2}{3}\sigma_u(e_u)\frac{d\varepsilon_z}{de_u} - \frac{1}{3}[1-\beta(e_u)]\varphi(e_u - \varepsilon_0)\left[\left(\frac{d\varepsilon_z}{de_u}\right)_0 - 1\right] \\ S_{z\varphi} = \frac{2}{3}\sigma_u(e_u)\frac{d\varepsilon_{z\varphi}}{de_u} - \frac{1}{3}[1-\beta(\varepsilon_u)]\sigma_u(\varepsilon_u)\varphi(e_u - \varepsilon_u)\left(\frac{d\varepsilon_{z\varphi}}{de_u}\right)_0, \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

где  $\left(\frac{d\varepsilon_z}{de_u}\right)_0, \left(\frac{d\varepsilon_{z\varphi}}{de_u}\right)_0$  - производные осевых и угловых деформаций в момент начала закручивания.

Компоненты девиатора напряжений:

$$S_r = S_\varphi = -0,5S_z = -\frac{\sigma_z}{3}. \quad (7)$$

В начальный момент пластического кручения ( $e = \varepsilon_0$ ) касательное напряжение, отвечающее условной границе текучести  $\tau_{0,2}$  равно:

$$\tau_{0,2} = \frac{\sigma_u(\varepsilon_0)\sqrt{\beta(e_0)}}{\sqrt{3}}. \quad (8)$$

Если принять ( $e_0 = \varepsilon_u$ ), то зависимость предела текучести на сдвиг от накопленной интенсивности деформаций предварительного растяжения (сжатия) имеет вид:

$$\tau_{0,2} = \frac{\sigma_u(\varepsilon_u)\sqrt{\beta(e_u)}}{\sqrt{3}}. \quad (9)$$

Для изотропных материалов  $\beta(e_u) = 1$  и полученные соотношения приводят к формулам Мизеса.

Оценка условного предела текучести на сдвиг при кручении заготовок после их предварительного растяжения или сжатия до деформации  $e_0$  имеет вид:

$$\tau_{0,2} = \frac{\sigma_u(\varepsilon_u)}{\sqrt{3}} \left\{ 1 - \frac{[1-\beta(\varepsilon_0)]\sqrt{\beta(\varepsilon_0)}}{1+\beta(\varepsilon_0)} \right\}. \quad (10)$$

Наименьший крутящий момент, при котором в упроченной цилиндрической заготовке напряжения на контуре  $r = R$  при ее закручивании достигнут предела текучести  $\tau_{0,2}$  можно рассчитать по формуле сопротивления материалов:

$$M_{кр} = \tau_{0,2} \frac{\pi d^3}{12}. \quad (11)$$

Подставив в формулу (11)  $\tau_{0,2}$  рассчитанную по (10) получим:

$$M_{кр} = \frac{\pi d^3}{12} \frac{\sigma_u(\varepsilon_u)}{\sqrt{3}} \left\{ 1 - \frac{[1-\beta(\varepsilon_0)]\sqrt{\beta(\varepsilon_0)}}{1+\beta(\varepsilon_0)} \right\}. \quad (12)$$

Или если принять ( $e_0 = \varepsilon_u$ ), получим:

$$M_{кр} = \frac{\pi d^3}{12} \frac{\sigma_u(\varepsilon_u)}{\sqrt{3}} \left\{ 1 - \frac{[1-\beta(e_u)]\sqrt{\beta(e_u)}}{1+\beta(e_u)} \right\}. \quad (13)$$

Если кривую течения аппроксимировать формулой Людвига:

$$\sigma_u = A \varepsilon_u^n, \quad (14)$$

а  $e_u$  при кручении рассчитать по формуле (см. рис. 2):

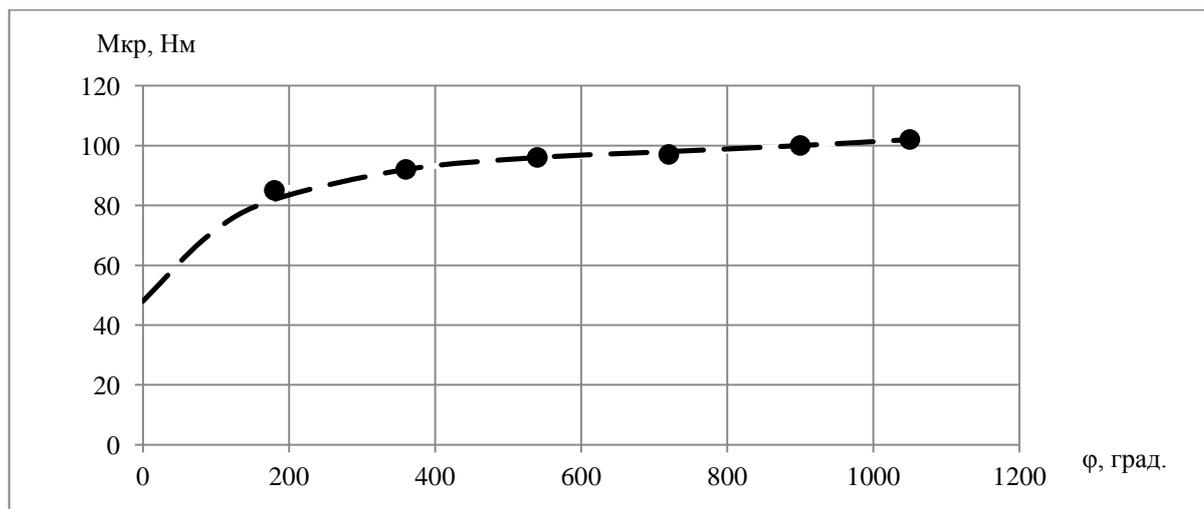
$$e_u = \frac{\operatorname{tg} \gamma}{\sqrt{3}} = \frac{\varphi d \pi}{2l180\sqrt{3}}, \quad (15)$$

то окончательно получим:

$$M_{кр} = \frac{A}{\sqrt{3}} \left( \frac{\varphi d \pi}{2l180\sqrt{3}} \right)^n \frac{\pi d^3}{12} \left\{ 1 - \frac{[1 - \beta(e_u)] \sqrt{\beta(e_u)}}{1 + \beta(e_u)} \right\}. \quad (16)$$

Соотношения (9), (16) можно использовать для оценки эффекта упрочнения при свободном кручении тонкостенных трубок и заготовок сплошного сечения после их предварительного растяжения (сжатия) до накопленной деформации  $e_0$ .

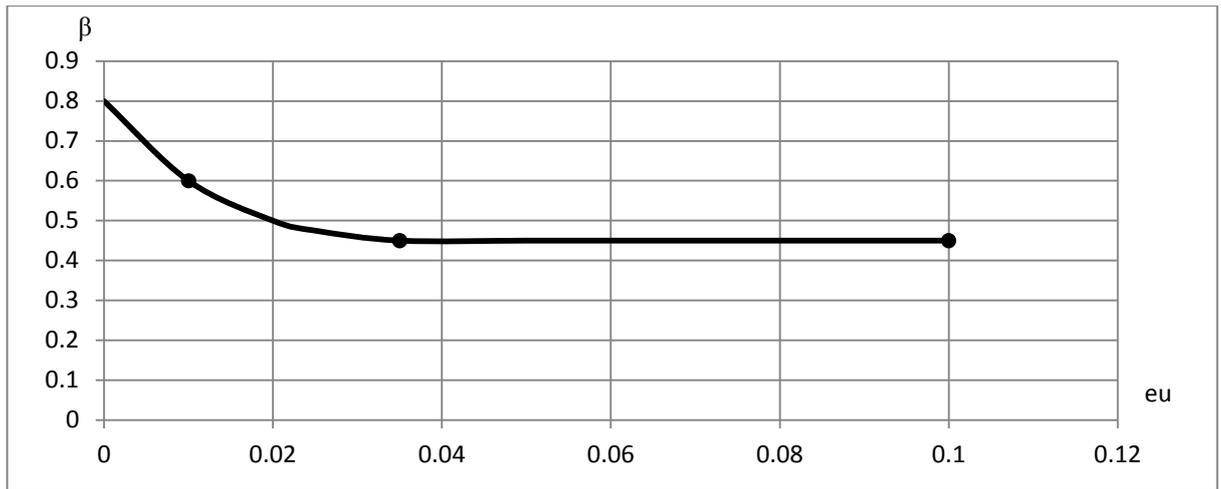
Формулу (16) проверяли экспериментально. С этой целью изготовили цилиндрические образцы из стали 20 диаметром  $d=10$  мм и длиной рабочей части  $l = 70$  мм. Часть из них предварительно растягивали до интенсивности деформаций  $e_0 = 0,0352$ , а затем закручивали на угол  $\varphi=180^0, 360^0, 540^0, 720^0, 900^0, 1050^0$  на испытательной машине КМ-50. На рабочую поверхность образца с помощью штангенциркуля наносили продольную риску вдоль образующей цилиндра. Угол  $\gamma$  измеряли с помощью инструментального микроскопа. Крутящий момент при каждом угле поворота  $\varphi$  отсчитывали на делительном устройстве машины КМ-50. Полученные данные в виде зависимости  $M_{кр} = f(\varphi)$  показаны на рис. 3.



**Рис. 3 –Зависимость угла закручивания и крутящего момента предварительно растянутой цилиндрической заготовки стали 20.**

Штриховая линия соответствует результатам расчета по формуле (16), круглыми точками отмечен эксперимент. Как следует из рис. 3 сходимость результатов расчета по формуле (16) и экспериментом удовлетворительная.

Для построения кривой течения в области конечных деформаций испытывали цилиндрические образцы на сжатие со смазкой. Методика испытаний изложена в работе [3]. В результате получена кривая течения стали 20. Кривая аппроксимирована уравнением (14). Коэффициенты аппроксимации кривой течения  $A= 673$ ,  $n = 0,15$ . Кроме того построена зависимость  $\beta = \beta(e_u)$ , которая получена после испытания цилиндрического образца на растяжение с последующим сжатием [1] (рис. 4). Величина  $\beta$  оказалась равной  $\beta = 0,45$ .



**Рис. 4 –Зависимость параметра  $\beta$  от предварительной деформации растяжения  $\epsilon_u$  стали 20.**

**Выводы.** Таким образом, на основе полученных результатов можно сделать вывод о том, что пластическую деформацию растяжение либо сжатие с последующим закручиванием можно использовать как упрочняющую обработку заготовок валов, изготовленных из не термообработанного металла. Получена зависимость (16) крутящего момента от абсолютного угла закручивания анизотропно – упрочняющихся материалов проявляющих эффект Баушингера, которая позволяет учитывать анизотропное упрочнение металла при кручении предварительно растянутых заготовок.

#### Литература

1. Зміцнення валів пластичним деформуванням // В. А. Огородніков, В. Ф. Середюк, В. Л. Разуваєв // Вісник Вінницького політехнічного інституту:1(14) – 1997. С. 67-71
2. Дель Г.Д.Деформируемость материалов с анизотропным упрочнением / Г. Д. Дель. – прикладные задачи механики сплошных сред. – Воронеж: Изд – во ВГУ, 1988.-152с.
3. Огородников В.А. Оценка деформируемости металлов при обработке давлением // Головне вид –во «Вища школа», 1983. – 175 с.
4. Хван Д.В. Повышение эффективности в обработке металлов давлением / Хван Д.В. – Воронеж: Изд–во Воронежского университета, 1995. - 224 с.