

УДК 621.77

ОСТАТОЧНЫЕ НАПРЯЖЕНИЯ ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ ПРУТКОВ

Наталья Сергеевна Подкина

*Студент 4 курса**Кафедра «Динамика и прочность машин»**Пермский Национальный Исследовательский Политехнический Университет**Научный руководитель: Е.В. Кузнецова**Кандидат технических наук, доцент кафедры «Динамика и прочность машин»*

Прутковые изделия изготавливаются с применением методов обработки металлов давлением, а именно, волочением, которое в свою очередь сопровождается пластическим деформированием, где реализуются большие степени деформации. Остаточные напряжения при этом в некоторых случаях могут превышать физический предел текучести или прочности материала, что может привести к изменению размеров или даже к разрушению. На рисунках показаны латунный пруток и арматурная проволока, разрушившиеся от действия остаточных напряжений возникших после волочения [1].

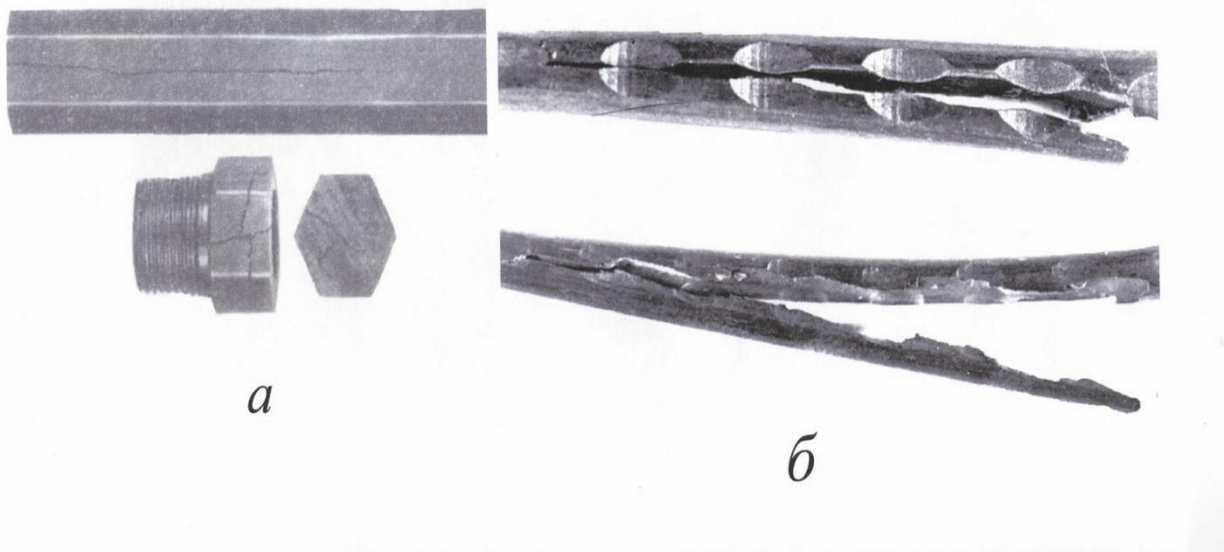


Рис. 1. Продольные и поперечные трещины на латунном прутке от действия остаточных напряжений— а; б— разрушение арматурной проволоки от действия остаточных напряжений.

При холодном пластическом деформировании осесимметричных изделий реализуется схема (см. рис.2) плоского деформированного состояния, которое описывается уравнениями и соотношениями теории упругости в цилиндрических координатах. Мы ограничимся таким видом деформации тел вращения, при котором распределение напряжений не зависит от угла θ , а также принимаем, что трубы достаточно длинные. Таким образом, система после принятых допущений принимает такой вид [2]:

Уравнения равновесия в цилиндрической системе координат:

$$\left. \begin{aligned} r \frac{d \sigma_z}{d z} + \frac{d}{d r} (r \tau_{rz}) &= 0 \\ \frac{d}{d r} (r \sigma_r) - \sigma_\theta + r \frac{d \tau_{rz}}{d z} &= 0 \end{aligned} \right\}, \quad (1)$$

В условиях осевой симметрии для плоскодеформированного состояния принимаем допущения:

$$\frac{d \sigma_z}{d z} = 0; \quad \frac{d \tau_{rz}}{d r} = 0; \quad (2)$$

$$\left. \begin{aligned} \frac{d}{d r} (r \tau_{rz}) &= 0 \\ \frac{d}{d r} (r \sigma_r) - \sigma_\theta &= 0 \end{aligned} \right\}, \quad (3)$$

В работе [3] показана методика нахождения расчетных формул для определения радиальных σ_r , окружных σ_θ и осевых σ_z остаточных напряжений, где осевые напряжения задаются в виде ряда:

$$\sigma_z = a_0 + a_1 r, \quad (5)$$

далее из условия самоуравновешенности определяются константы:

$$\int_0^{2\pi} \int_0^{R_0} \sigma_z r dr d\theta = 0, \quad (6)$$

$$a_0 = -\frac{a_1 R_0^2}{2}. \quad (7)$$

Из обобщенного закона Гука определяются упругие деформации (для длинных изделий осевые деформации нулевые) :

$$\varepsilon_z = \frac{1}{E} [\sigma_z - \mu (\sigma_r + \sigma_\theta)] = 0, \quad (8)$$

$$\varepsilon_r = \frac{1}{E} [\sigma_r - \mu (\sigma_z + \sigma_\theta)], \quad (9)$$

$$\varepsilon_\theta = \frac{1}{E} [\sigma_\theta - \mu (\sigma_r + \sigma_z)]. \quad (10)$$

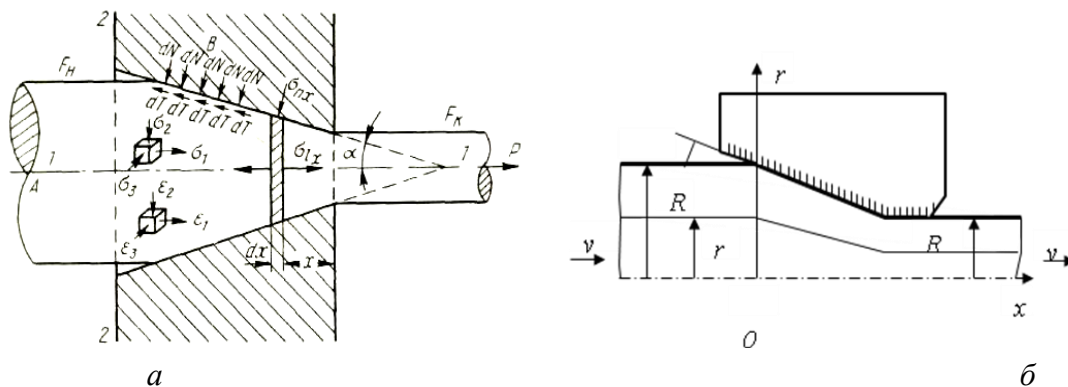


Рис. 2. Процесс волочения прутковой заготовки через коническую матрицу – а; б – схема волочения.

Применим к определению остаточных напряжений энергетический подход. В работе использовалась методика, с применением энергетического подхода, где потенциальная энергия упругих остаточных напряжений рассматривается как часть энергии, пошедшей на пластическое деформирование, $U = \psi U_d$, где ψ – параметр, определяющий долю энергии пластического деформирования, пошедшую на формирование остаточных напряжений; U_d – энергия пластического деформирования [3]

$$U = \psi U_d, \quad (11)$$

$$U = \frac{1}{2} \int_V \sigma_{ij}, \varepsilon_{ij} dV, \quad (12)$$

$$U_d = S_{сеч} \int_0^\varepsilon \sigma_s d\varepsilon, \quad (13)$$

где U – потенциальная энергия упругих остаточных напряжений; U_d – энергия, затраченная на пластическую деформацию заготовки; $S_{сеч}$ – площадь сечения заготовки; σ_s – сопротивление деформации материала заготовки, $\sigma_{ij}, \varepsilon_{ij}$ – компоненты тензора остаточных напряжений и упругих деформаций от их действия, соответственно.

Решая, систему уравнений с учетом допущений, используя полуобратный метод теории упругости, (т.е. часть решения задаем сами, а часть находим из уравнений и соотношений теории упругости). Задается осевое напряжение в виде ряда, и с учетом обобщенного закона Гука определяются упругие деформации от действия остаточных напряжений находятся выражения для определения радиальных окружных и осевых остаточных напряжений

$$\left. \begin{aligned} \sigma_r &= \frac{\bar{a}_1}{4\mu} (\bar{r}^2 - 1) \\ \sigma_\theta &= \frac{\bar{a}_1}{4\mu} (3\bar{r}^2 - 1) \\ \sigma_z &= \frac{\bar{a}_1}{2} (2\bar{r}^2 - 1) \end{aligned} \right\}, \quad (14)$$

где \bar{a}_1 – параметр, характеризующий распределение остаточных напряжений по сечению прутка и находится из энергетического условия (11) и послеупрощений имеет вид:

$$\bar{a}_1 = \sqrt{\frac{\psi \sigma_{s0} E 24 \mu^2}{1 - \mu^2} \varepsilon_{cp} \left(1 + \frac{m \varepsilon_{cp}^n}{(n+1)} \right)}. \quad (15)$$

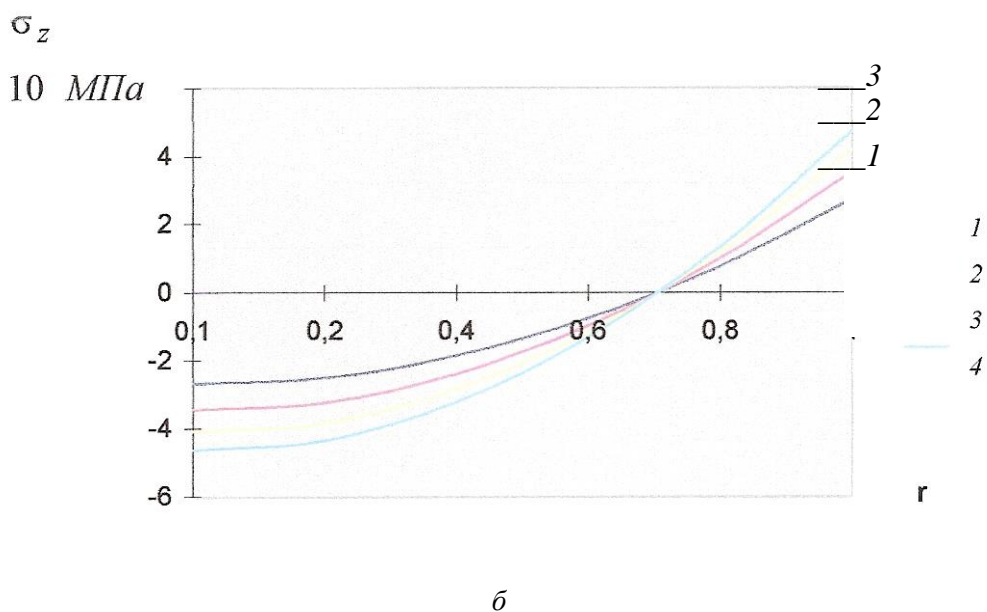
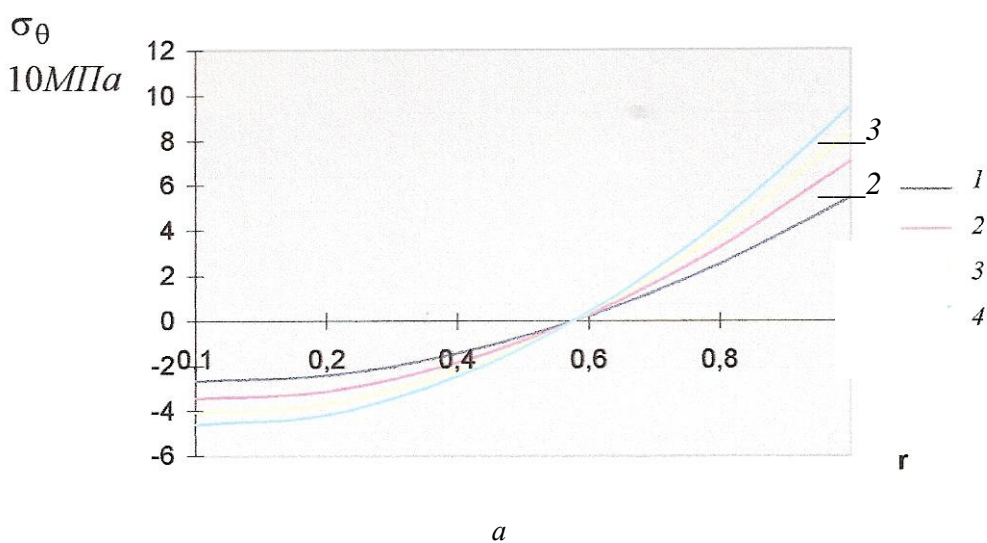
где ψ – параметр деформативности, характеризующий механические свойства обрабатываемого материала [4]. Степень пластической деформации прутка ε_{cp} , где d, d_0 – диаметры заготовки (прутка, проволоки) до и после пластической деформации; α – угол наклона образующей матрицы [5].

$$\varepsilon_{cp} = 2 \ln d / d_0 + \frac{4}{3\sqrt{3}} \operatorname{tg} \alpha, \quad (16)$$

Приведенная методика применена для расчета технологических остаточных напряжений в прутках диаметром 8 мм, при $\mu = 0,32$; $d / d_0 = 1,2$; $\psi = 0,004$; $\alpha = 8^\circ$. Результаты расчета показали (см. рис. 4), что радиальные напряжения на поверхности отрицательные, что подтверждается известными из литературы закономерностями формирования остаточных напряжений [1]. Окружные и осевые остаточные напряжения растягивающие на поверхности и

сжимающие в центре прутка, при этом окружные растягивающие напряжения достигают на поверхности 100 МПа, что является опасным для циркониевых сплавов, так как многие свойства циркония схожи со свойствами меди.

Из циркониевых прутков, выдавленных или катаных заготовок можно тянуть прутки и проволоку. Параметры волочения циркония обычно сравнивали с параметрами волочения нержавеющей стали, хотя в настоящее время механические свойства циркония значительно приблизились к свойствам меди. Прутки волочат, используя специальные смазки с обжатами за проход 10-15 % с суммарным обжатием между отжигами до 60 %. Обычно нужно волочить проволоку с обжатием по калибру 1/2 (за проход 10%) и суммарным обжатием до отжига примерно 50%. Также проволочат проволоку до меньших размеров (диаметром менее 0,76 мм) без отжига неограниченно [6]. Для циркония применяют стандартные волокна из стали или карбидов. Карбидные волокна значительно уменьшают проблему трения и износа.



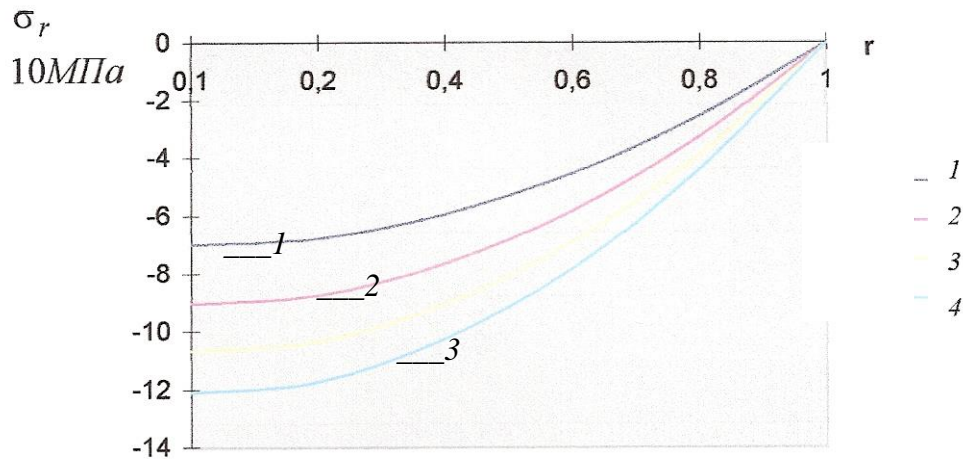


Рис. 3. Распределение *a* – окружных, *b* – осевых и *в* - радиальных напряжений по объему прутков из 1 – иодидного циркония, 2 – циркалоя, 3 – сплава циркония с 2,5% ниобия с 2,5% ниобия

В работе рассмотрены актуальные вопросы возникновения технологических остаточных напряжений и упругих деформаций в прутковых изделиях, произведенных волочением. Методика определения остаточных напряжений, основанная на энергетическом подходе применена для расчета технологических остаточных напряжений в прутках из различных циркониевых сплавов. Результаты расчета показали, что радиальные напряжения на поверхности отрицательные, что подтверждается известными из литературы закономерностями формирования остаточных напряжений. Окружные и осевые остаточные напряжения растягивающие на поверхности и сжимающие в центре прутка.

Литература

1. Соколов И.А., Уральский В.И. Остаточные напряжения и качество металлопродукции. – М.: Металлургия, 1981.-96 с.
2. Лурье А.И. Теория упругости. – М.: Наука, 1970.-940 с.
3. Колмогоров Г.Л., Кузнецова Е.В., Тиунов В.В. Технологические остаточные напряжения и их влияние на долговечность и надежность металлоизделий. –Пермь: Изд-во Перм. нац. исслед. политехн. ун-та. –2012. –226.
4. Пат. 2128329 РФ. Способ определения показателя деформированности материала / Колмогоров Г.Л., Мельникова Т.Е., Курапова Н.А.; заявитель и патентообладатель Перм. гос. тех. ун-т. –Бюл. №9 от 27.03.1999.
5. Колмогоров Г.Л., Кузнецова Е.В. О степени деформации при осесимметричном деформировании // Изв. вуз. Черная металлургия. – 2000. –№11. –С.31– 33
6. Меерсона Г.А. Металлургия циркония. –М.: Изд-во ИЛ, 1959.