

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ ТЕОРИИ ПЛАСТИЧНОСТИ ДЛЯ РАЗРАБОТКИ КОМБИНИРОВАННОГО СПОСОБА КОВКИ ТРУБ НА РКМ

Кондратьев В.И.¹, Колосунин А.А.¹, Потупчик А.И.²

¹*Уральский федеральный университет имени первого Президента России
Б.Н. Ельцина, г. Екатеринбург;*

²*Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова,
г.Барнаул*

Ключевые слова: ковка, САПР, методика, вариация, программа, модуль, заготовка, технология, параметры, геометрия, деталь, оправка, бойки, размер, расчет.

Аннотация. Тема работы посвящена применению методов теории пластичности для совершенствования технологии ковки трубчатых заготовок на радиально-ковочных машинах (РКМ) с целью повышения качества и снижения себестоимости изделий за счет уменьшения номенклатуры оправок и заготовок.

APPLICATION OF METHODS OF THE THEORY OF PLASTICITY FOR WORKING OUT OF THE COMBINED WAY FORMING PIPES ON RKC

Kondratiev V.I.¹, Kolosunin A.A.¹, Potupchik A.I.²

¹*Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin,
Ekaterinburg;*

²*Altai State Technical University named after I.I. Polzunov, Barnaul*

Keywords: forming, CAD, technique, variation, the program, module, preparation, technology, parameters, geometry, detail, core, tools, the size, calculation.

Abstract. The work theme is devoted application of methods of the theory of plasticity for improvement to technology forming tubular preparations by radially-kovochnyh cars (RKC) for the purpose of improvement of quality and decrease in the cost price of products at the expense of nomenclature reduction cores and preparations.

Ковка полых заготовок на РКМ реализуется с применением оправок [1,2]. При этом, если для каждого типоразмера заготовки изготовить свою оправку, то процесс реализуется до конца на оправке.

Можно уменьшить расходы на изготовление оправок за счет применения дополнительной операции редуцирования, т. е. ковки без оправки. В этом случае можно использовать ковку нескольких изделий с разными размерами на одной оправке и затем доводить размеры изделий до конечных путем применения операции редуцирования.

Решение этой задачи возможно проведением исследования формоизменения при редуцировании.

Расчет конечного формоизменения при редуцировании для решения поставленной задачи сводится к определению соотношения объемов металла перемещаемого в радиальном направлении и в длину.

Ввиду сказанного задача ставится следующим образом: при известных параметрах заготовки, бойков и технологии определить изменение толщины

стенки исходной заготовки.

Для решения поставленной задачи были приняты следующие допущения или гипотезы: о несжимаемости, жестких концов, плоских сечений, среда принята жестко-пластической, заготовка концентрической.

В этом случае критическое сечение находится в середине очага деформации и для расчета формоизменения можно рассмотреть его половину.

Решение проводилось с помощью вариационного принципа Лагранжа [3,4] для малых пластических деформаций в цилиндрической системе координат (рис. 1).

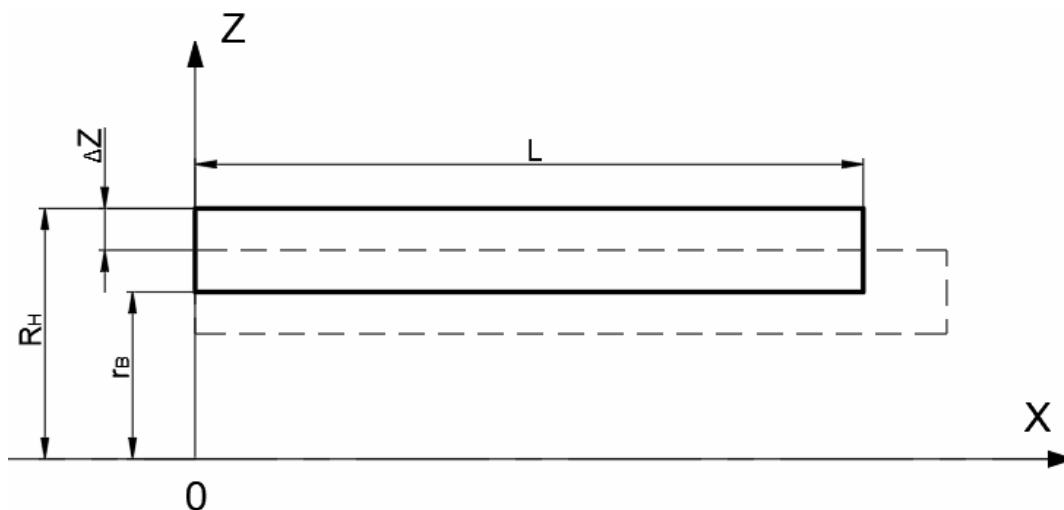


Рис. 1. Принятая схема процесса редуцирования

Составим поле кинематических деформаций и перемещений.

Считая деформацию однородной вдоль оси вращения в качестве варьируемого параметра примем относительное удлинение вдоль этой оси: $a = \varepsilon_x$.

Условие несжимаемости примет вид: $\frac{\partial U_r}{\partial r} + \frac{U_r}{r} + a = 0$.

Общее решение этого уравнения: $U_r = \frac{C_1}{2 \cdot r} - \frac{a \cdot r}{2}$.

Воспользуемся граничным условием: $U_r = -\Delta r$ при $r = R_H$.

После преобразований, используя $\varepsilon = \frac{\Delta r}{R_H}$, получим:

$$U_r = \left(\frac{a}{2} - \varepsilon \right) \cdot \frac{R_H^2}{r} - \frac{a \cdot r}{2}; \quad U_x = a \cdot x;$$

$$\varepsilon_r = \frac{\partial U_r}{\partial r} = - \left(\frac{a}{2} - \varepsilon \right) \cdot \frac{R_H^2}{r^2} - \frac{a}{2}; \quad \varepsilon_\varphi = \frac{U_r}{r} = \left(\frac{a}{2} - \varepsilon \right) \cdot \frac{R_H^2}{r^2} - \frac{a}{2};$$

$$\varepsilon_x = \frac{\partial U_x}{\partial x} = \varepsilon_x = a.$$

Интенсивность сдвиговой деформации определяем по формуле

$$\Gamma = 2 \cdot \sqrt{\varepsilon_r^2 + \varepsilon_\varphi^2 + \varepsilon_r \cdot \varepsilon_\varphi} = 2 \cdot \sqrt{\frac{3 \cdot a^2}{4} + \left(\frac{a}{2} - \varepsilon \right)^2 \cdot \frac{R_H^4}{r^4}}.$$

Значение варьируемого параметра a определяется из условия минимума приращения полной работы деформации ΔA :

$$\frac{\partial \Delta A}{\partial a} = 0.$$

Составляющими приращения полной работы деформации являются:

$$\Delta A_{вн} = 2 \cdot \pi \cdot \tau_s \int_0^L \int_{r_6}^{R_H} \Gamma r dr dx - \text{ работа внутренних сил;}$$

$$\Delta A_{мп} = 2 \cdot \pi \cdot \psi \cdot \tau_s \int_0^L U_x \cdot R_H \cdot dx - \text{ работа сил трения;}$$

$$\Delta A_{ср} = 2 \cdot \pi \cdot \tau_s \int_{r_6}^{R_H} U_r \cdot r \cdot dr - \text{ работа сил среза,}$$

где τ_s - предел текучести материала; ψ – коэффициент трения;

$$\Delta A = \Delta A_{вн} + \Delta A_{мп} + \Delta A_{ср}.$$

Вычислим приращения работ:

$$\Delta A_{вн} = 4 \cdot \pi \cdot \tau_s \cdot L \cdot \left\{ \frac{R_H^2}{2} \cdot \sqrt{\left(\frac{a}{2} - \varepsilon\right)^2 + \frac{3 \cdot a^2}{4}} - \frac{1}{2} \cdot \sqrt{\left(\frac{a}{2} - \varepsilon\right)^2 \cdot R_H^4 + \frac{3 \cdot a^2}{4} \cdot r_6^4} + \left(\frac{a}{2} - \varepsilon\right) \cdot \frac{R_H^2}{4} \right. \\ \left. \cdot \left(\ln \left[\frac{\left[R_H^2 \cdot \sqrt{\frac{3 \cdot a^2}{4} + \left(\frac{a}{2} - \varepsilon\right)^2} - \left(\frac{a}{2} - \varepsilon\right) \cdot R_H^2 \right] \cdot \left[\sqrt{\frac{3 \cdot a^2}{4} r_6^4 + \left(\frac{a}{2} - \varepsilon\right)^2} \cdot R_H^4 + \left(\frac{a}{2} - \varepsilon\right) \cdot R_H^2 \right]}{\left[R_H^2 \cdot \sqrt{\frac{3 \cdot a^2}{4} + \left(\frac{a}{2} - \varepsilon\right)^2} + \left(\frac{a}{2} - \varepsilon\right) \cdot R_H^2 \right] \cdot \left[\sqrt{\frac{3 \cdot a^2}{4} r_6^4 + \left(\frac{a}{2} - \varepsilon\right)^2} \cdot R_H^4 - \left(\frac{a}{2} - \varepsilon\right) \cdot R_H^2 \right]} \right] \right\},$$

$$\Delta A_{мп} = \pi \cdot \psi \cdot \tau_s \cdot R_H \cdot a \cdot L^2,$$

$$\Delta A_{ср} = 2 \cdot \pi \cdot \tau_s \cdot \left[\left(\frac{a}{2} - \varepsilon\right) \cdot R_H^3 \cdot \left(1 - \frac{r_6}{R_H}\right) - \frac{a}{6} \cdot (R_H^3 - r_6^3) \right].$$

Складывая полученные составляющие приращений полной работы получим:

$$\Delta A = 4 \cdot \pi \cdot \tau_s \cdot L \cdot \left\{ \frac{R_H^2}{2} \cdot \sqrt{\left(\frac{a}{2} - \varepsilon\right)^2 + \frac{3 \cdot a^2}{4}} - \frac{1}{2} \cdot \sqrt{\left(\frac{a}{2} - \varepsilon\right)^2 \cdot R_H^4 + \frac{3 \cdot a^2}{4} \cdot r_6^4} + \left(\frac{a}{2} - \varepsilon\right) \cdot \frac{R_H^2}{4} \right. \\ \left. \cdot \left(\ln \left[\frac{\left[R_H^2 \cdot \sqrt{\frac{3 \cdot a^2}{4} + \left(\frac{a}{2} - \varepsilon\right)^2} - \left(\frac{a}{2} - \varepsilon\right) \cdot R_H^2 \right] \cdot \left[\sqrt{\frac{3 \cdot a^2}{4} r_6^4 + \left(\frac{a}{2} - \varepsilon\right)^2} \cdot R_H^4 + \left(\frac{a}{2} - \varepsilon\right) \cdot R_H^2 \right]}{\left[R_H^2 \cdot \sqrt{\frac{3 \cdot a^2}{4} + \left(\frac{a}{2} - \varepsilon\right)^2} + \left(\frac{a}{2} - \varepsilon\right) \cdot R_H^2 \right] \cdot \left[\sqrt{\frac{3 \cdot a^2}{4} r_6^4 + \left(\frac{a}{2} - \varepsilon\right)^2} \cdot R_H^4 - \left(\frac{a}{2} - \varepsilon\right) \cdot R_H^2 \right]} \right] \right\} + \\ + \pi \cdot \psi \cdot \tau_s \cdot R_H \cdot a \cdot L^2 + 2 \cdot \pi \cdot \tau_s \cdot \left[\left(\frac{a}{2} - \varepsilon\right) \cdot R_H^3 \cdot \left(1 - \frac{r_6}{R_H}\right) - \frac{a}{6} \cdot (R_H^3 - r_6^3) \right]. \quad (1)$$

Найдем параметр a из условия минимума приращения полной работы, затрачиваемой на деформацию:

$$\frac{\partial \Delta A}{\partial a} = 0,$$

$$\frac{\partial \Delta A}{\partial a} = 4 \cdot \pi \cdot \tau_s \cdot L \cdot \left\{ \frac{R_H^2}{2} \cdot \frac{\frac{3}{2} \cdot a + \left(\frac{a}{2} - \varepsilon\right)}{\sqrt{\frac{3 \cdot a^2}{4} + \left(\frac{a}{2} - \varepsilon\right)^2}} - \frac{\frac{3}{4} \cdot a \cdot r_6^4 + \frac{R_H^4}{2} \cdot \left(\frac{a}{2} - \varepsilon\right)}{\sqrt{\frac{3 \cdot a^2}{4} \cdot r_6^2 + \left(\frac{a}{2} - \varepsilon\right)^2} \cdot R_H^4} + \frac{R_H^2}{8} \right.$$

$$\cdot \ln \left[\frac{\left[R_H^2 \cdot \sqrt{\frac{3 \cdot a^2}{4} + \left(\frac{a}{2} - \varepsilon\right)^2} - \left(\frac{a}{2} - \varepsilon\right) \cdot R_H^2 \right] \cdot \left[\sqrt{\frac{3 \cdot a^2}{4} \cdot r_6^2 + \left(\frac{a}{2} - \varepsilon\right)^2} R_H^4 + \left(\frac{a}{2} - \varepsilon\right) \cdot R_H^2 \right]}{\left[R_H^2 \cdot \sqrt{\frac{3 \cdot a^2}{4} + \left(\frac{a}{2} - \varepsilon\right)^2} + \left(\frac{a}{2} - \varepsilon\right) \cdot R_H^2 \right] \cdot \left[\sqrt{\frac{3 \cdot a^2}{4} \cdot r_6^4 + \left(\frac{a}{2} - \varepsilon\right)^2} R_H^4 - \left(\frac{a}{2} - \varepsilon\right) \cdot R_H^2 \right]} \right] +$$

$$\left. + \left(\frac{a}{2} - \varepsilon\right) \cdot \frac{R_H^2}{4} \cdot \frac{u' \cdot v - v' \cdot u}{v^2} \right\} + \pi \cdot \psi \cdot \tau_s \cdot R_H \cdot L^2 + \pi \cdot \tau_s \cdot \left[R_H^3 \cdot \left(1 - \frac{r_6}{R_H}\right) - \frac{1}{3} \cdot (R_H^3 - r_6^3) \right] = 0. \quad (2)$$

Здесь

$$v = \left[R_H^2 \cdot \sqrt{\frac{3 \cdot a^2}{4} + \left(\frac{a}{2} - \varepsilon\right)^2} - \left(\frac{a}{2} - \varepsilon\right) \cdot R_H^2 \right] \cdot \left[\sqrt{\frac{3 \cdot a^2}{4} \cdot r_6^4 + \left(\frac{a}{2} - \varepsilon\right)^2} \cdot R_H^4 + \left(\frac{a}{2} - \varepsilon\right) \cdot R_H^2 \right],$$

$$u = \left[R_H^2 \cdot \sqrt{\frac{3 \cdot a^2}{4} + \left(\frac{a}{2} - \varepsilon\right)^2} + \left(\frac{a}{2} - \varepsilon\right) \cdot R_H^2 \right] \cdot \left[\sqrt{\frac{3 \cdot a^2}{4} \cdot r_6^4 + \left(\frac{a}{2} - \varepsilon\right)^2} \cdot R_H^4 - \left(\frac{a}{2} - \varepsilon\right) \cdot R_H^2 \right],$$

$$u' = \left[R_H^2 \cdot \frac{\frac{3}{2} \cdot a + \left(\frac{a}{2} - \varepsilon\right)}{\sqrt{\frac{3 \cdot a^2}{4} + \left(\frac{a}{2} - \varepsilon\right)^2}} + \frac{R_H^2}{2} \right] \cdot \left[\sqrt{\frac{3 \cdot a^2}{4} \cdot r_6^4 + \left(\frac{a}{2} - \varepsilon\right)^2} \cdot R_H^4 - \left(\frac{a}{2} - \varepsilon\right) \cdot R_H^2 \right] +$$

$$+ \left[R_H^2 \cdot \sqrt{\frac{3 \cdot a^2}{4} + \left(\frac{a}{2} - \varepsilon\right)^2} + \left(\frac{a}{2} - \varepsilon\right) \cdot R_H^2 \right] \cdot \left[\frac{\frac{3 \cdot a}{2} \cdot r_6^4 + \left(\frac{a}{2} - \varepsilon\right) \cdot R_H^4}{\sqrt{\frac{3 \cdot a^2}{4} \cdot r_6^4 + \left(\frac{a}{2} - \varepsilon\right)^2} \cdot R_H^4} - \frac{R_H^2}{2} \right],$$

$$v' = \left[R_H^2 \cdot \frac{\frac{3}{2} \cdot a + \left(\frac{a}{2} - \varepsilon\right)}{\sqrt{\frac{3 \cdot a^2}{4} + \left(\frac{a}{2} - \varepsilon\right)^2}} - \frac{R_H^2}{2} \right] \cdot \left[\sqrt{\frac{3 \cdot a^2}{4} \cdot r_6^4 + \left(\frac{a}{2} - \varepsilon\right)^2} \cdot R_H^4 + \left(\frac{a}{2} - \varepsilon\right) \cdot R_H^2 \right] +$$

$$+ \left[R_n^2 \cdot \sqrt{\frac{3 \cdot a^2}{4} + \left(\frac{a}{2} - \varepsilon\right)^2} - \left(\frac{a}{2} - \varepsilon\right) \cdot R_n^2 \right] \cdot \left[\frac{\frac{3 \cdot a}{2} \cdot r_6^4 + \left(\frac{a}{2} - \varepsilon\right) \cdot R_n^4}{\sqrt{\frac{3 \cdot a^2}{4} \cdot r_6^4 + \left(\frac{a}{2} - \varepsilon\right)^2 \cdot R_n^4}} + \frac{R_n^2}{2} \right].$$

Решение полученного уравнения было проведено численным методом.

Диапазон изменения варьируемого параметра a определялся из условий соответствия схемам деформации, когда весь металл течет в радиальном

направлении ($a_{\min} = 0$) и когда весь металл течет вдоль оси $\left(a_{\max} = \frac{2 \cdot \varepsilon}{1 - \frac{r_6^2}{R_n^2}} \right)$.

В итоге имеем $0 < a \leq \frac{2 \cdot \varepsilon}{1 - \frac{r_6^2}{R_n^2}}$. (3)

Расчет конечного формоизменения выполнен по следующему алгоритму.

1. Задаются размеры заготовки:

R_{zn} – наружный радиус заготовки, мм;

$R_{зв}$ – внутренний радиус заготовки, мм;

L_3 – длина заготовки, мм;

L_6 – длина бойка, мм;

L_{pz} – длина рабочей зоны бойка, мм;

τ_s – предел текучести материала, кг/мм² ;

ψ – коэффициент трения;

$R_{дн}$ – наружный радиус детали, мм;

Требуется определить внутренний радиус ($R_{дв}$) детали и (L_d)длину.

2. Задается число шагов итерации n .

3. Определяется абсолютная величина обжатия.

$$\Delta r = \frac{R_{zn} - R_{дн}}{n}.$$

4. Определяется с использованием формулы (3) диапазон изменения варьируемого параметра на первом шаге итерации a_1 .

$$0 < a_1 \leq \frac{2 \cdot \varepsilon}{1 - \frac{R_{зв}^2}{R_{zn}^2}}.$$

5. Определяется по формуле (2) значение параметра a_1 на первом шаге итерации.

6. Рассчитываются размеры заготовки после первого шага

$R_{zn1} = R_{zn} - \Delta r$ - наружный радиус заготовки перед вторым шагом;

$$\varepsilon_1 = \frac{\Delta r}{R_{3H}} - \text{относительное обжатие на первом шаге;}$$

$$U_{r1} = \left(\frac{a_1}{2} - \varepsilon_1 \right) \cdot \frac{R_{3H}^2}{R_{36}} - \frac{a_1 \cdot R_{36}}{2}.$$

$R_{361} = R_{36} - U_{r1}$ - внутренний радиус заготовки перед вторым шагом;

$\varepsilon_{x1} = a_1$; $L_{31} = L_3 + a_1 \cdot L_3$ - длина заготовки перед вторым шагом.

7. Определяется по формуле (2) значение параметра a_2 на втором шаге итерации.

8. Рассчитываются размеры заготовки после второго шага

$R_{3H2} = R_{3H1} - \Delta r$ - наружный радиус заготовки перед третьим шагом;

$$\varepsilon_2 = \frac{\Delta r}{R_{3H2}} - \text{относительное обжатие на втором шаге;}$$

$$U_{r2} = \left(\frac{a_2}{2} - \varepsilon_2 \right) \cdot \frac{R_{3H2}^2}{R_{362}} - \frac{a_1 \cdot R_{362}}{2}.$$

$R_{362} = R_{361} - U_{r2}$ - внутренний радиус заготовки перед третьим шагом;

$\varepsilon_{x2} = a_2$; $L_{31} = L_{32} + a_2 \cdot L_{32}$ - длина заготовки перед третьим шагом.

Шаги 7 и 8 повторяем до получения наружного диаметра детали $R_{\text{дн}}$.

Для реализации комбинированного способаковки следует выбрать ближайшую большую по диаметру к внутреннему диаметру детали оправку и численным методом, используя приведенные выше зависимости, рассчитать размеры откованной заготовки.

Затем выбрать из сортамента исходную заготовку из условия обеспечения необходимого кова для обеспечения качества металла.

Согласно предложенному алгоритму был разработан программный модуль, который включен в состав САПР проектирования технологииковки на РКМ.

Список литературы

1. Радюченко Ю.С. Ротационнаяковка: Обработка деталей на ротационно- и радиально-обжимных машинах. - М.: Машгиз, 1962. - 187 с.
2. Радюченко Ю.С. Ротационное обжатие. М.: Машиностроение, 1972. - 175 с.
3. Викдорчик С.Ю. Исследование процесса точнойковки полых заготовок на радиально-ковочной машине: дисс. ... канд. техн. наук. - Свердловск, 1972. - 196 с.
4. Тарновский И.Я., Поздеев А.А., Ганаго О.А. и др. Теория обработки металлов давлением: вариационные методы расчета усилий и деформации. - М.: Металлургиздат, 1963. - 672 с.

Сведения об авторах:

Кондратьев Владимир Иванович - к.т.н., доцент, УрФУ, г. Екатеринбург;

Колосунин Александр Андреевич - студент, УрФУ, г. Екатеринбург;

Потупчик Андрей Иванович - к.т.н., доцент, АлтГТУ, г. Барнаул.