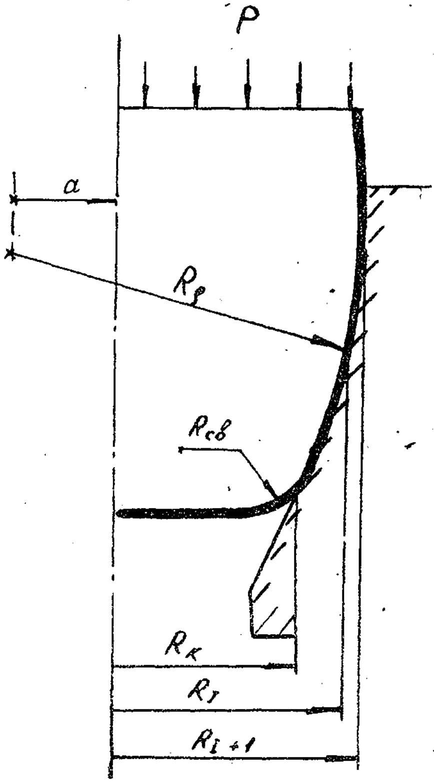
УДК 621.98.016.3

В.Д.Маслов

К АНАЛИЗУ ПРОДОЛЬНОГО ОБЖИМА ПОЛОЙ ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ЗАГОТОВКИ С ДНОМ*

Одним из основных требований, предъявляемых к листовым деталям конструкций летательных аппаратов, является жесткое ограничение их веса, а следовательно и разнотолщинности. Снизить разнотолщинность сужающихся осесимметричных штампованных оболочек и интенсифицировать процесс их формообразования позволяет последовательное совмещение технологических операций вытяжки заготовки с последующим обжимом заготовки [1],[2].



Р и с. I. Схема продольного обжима заготовки

В статье приведена методика определения напряженно-деформированного состояния при обжиме цилиндрической заготовки в матрице с криволинейной образующей (рис. I) с учетом основных факторов, влияющих на процесс пластического деформирования (упрочнения материала, контактного трения, изменения толщины стенки).

В методике используются общепринятые при анализе операций листовой штамповки допущения, а именно: рассматривается плоское напряженное состояние, применяется безмоментная теория оболочек, σ_ρ , σ_θ - главные нормальные напряжения, равномерно распределенные по толщине, материал заготов-

* Работа выполнена под руководством доц. В.П.Чистякова

ки изотропен и подчиняется условию пластичности Губера – Мизеса.

Напряжения и деформации в различных точках заготовки можно определить на основе теории пластичности с применением известной кривой упрочнения материала.

По условию пластичности Губера–Мизеса напряжение текучести [3]

$$\bar{\sigma} = \left[\frac{1}{2}\left\{(\sigma_\rho - \sigma_\theta)^2 + (\sigma_\theta - \sigma_s)^2 + (\sigma_s - \sigma_\rho)^2\right\}\right]^{\frac{1}{2}}, \qquad (1)$$

где $\bar{\sigma}$ – интенсивность напряжений;

$\sigma_\rho, \sigma_\theta, \sigma_s$ – главные нормальные напряжения.

Это напряжение зависит от деформационного упрочнения материала и связано с эквивалентной деформацией

$$\bar{\varepsilon} = \int d\bar{\varepsilon}. \qquad (2)$$

Приращение эквивалентной деформации с учетом условия постоянства объема

$$d\varepsilon_\theta + d\varepsilon_\rho + d\varepsilon_s = 0, \qquad (3)$$

где $d\varepsilon_\theta$, $d\varepsilon_\rho$, $d\varepsilon_s$ – приращение главных деформаций, определяется по формуле

$$d\bar{\varepsilon} = \left[\frac{4}{3}\left(d\varepsilon_\theta^2 + d\varepsilon_s^2 + d\varepsilon_\theta\, d\varepsilon_s\right)\right]^{\frac{1}{2}}. \qquad (4)$$

Для плоского напряженного состояния, используя зависимость Лева–Лоде [3], получаем:

$$\sigma_\rho = \frac{2}{3}\frac{\bar{\sigma}}{d\bar{\varepsilon}}\left(-d\varepsilon_\theta - 2d\varepsilon_\rho\right); \qquad (5)$$

$$\sigma_\theta = \frac{2}{3}\frac{\bar{\sigma}}{d\bar{\varepsilon}}\left(d\varepsilon_\theta - d\varepsilon_s\right). \qquad (6)$$

Функция, аппроксимирующая упрочнения материала заготовки, задается в виде

$$\bar{\sigma} = \bar{\sigma}_0 + A\bar{\varepsilon}^n, \qquad (7)$$

где σ_0 – исходный предел текучести материала;

A и n – константы упрочнения материала.

Приращение главных деформаций определяется через размеры заготовки:

$$d\varepsilon_\theta = \ln \frac{z}{z_0} \; ; \qquad (8)$$

$$d\varepsilon_S = \ln \frac{S}{S_0} \; ; \qquad (9)$$

$$d\varepsilon_\rho = \ln \frac{dz}{dz_0} \frac{\sin\alpha_0}{\sin\alpha} \, . \qquad (10)$$

Здесь α – угол между образующей к рассматриваемому элементу и осью симметрии.

Из геометрических соотношений

$$R_\rho = (a + z)\cos\alpha \, . \qquad (11)$$

Уравнение равновесия безмоментной оболочки на участке контакта с матрицей имеет вид

$$\frac{d}{dz}(\sigma_\rho z S) - \sigma_\theta S + \frac{\mu z S}{\sin\alpha}\left(\frac{\sigma_\rho}{R_\rho} + \frac{\sigma_\theta}{R_\theta}\right) = 0 , \qquad (12)$$

где μ – коэффициент контактного трения;

R_ρ и R_θ – радиусы кривизны оболочки.

При продольном обжиме заготовки с дном очаг деформации имеет неустановившиеся, изменяющиеся размеры. В процессе формоизменения в него последовательно вливаются новые недеформированные элементы дна и цилиндрической стенки заготовки. Кроме того, из-за сложностей, возникающих при попытке учесть все факторы, влияющие на процесс формоизменения, нелинейный закон упрочнения, предисторию деформации, граничное трение, непостоянство толщины и распределения деформации после вытяжки, а также изменение граничных условий в процессе формоизменения, невозможно получить законченное аналитическое решение. Поставленную задачу целесообразно решать численным методом с привлечением ЭВМ.

К неизвестным искомым величинам для участка оболочки, контактирующей с матрицей, относятся:

$$\varepsilon_\rho ,\ \varepsilon_\theta ,\ \varepsilon_S ,\ \bar{\varepsilon} ,\ \sigma_\theta ,\ \sigma_\rho ,\ \bar{\sigma} ,\ z ,\ \alpha ,\ p ,\ S .$$

Определение поля напряжения и деформаций в деформируемой заготовке сводится к решению системы (2) – (12), состоящей из нелинейных алгебраических и дифференциального уравнений. Решается система численным методом, искомые величины определяются в конечном числе точек. Заготовка разбивается на ℓ колец, причем число колец выбирается достаточным, чтобы считать толщину рассматриваемого кольца постоянной. Искомые величины внутри кольца также считаются постоянными.

Дифференциальное уравнение равновесия (12) интегрируется численно с применением метода трапеций:

$$(\sigma_\rho S z)_{i+1} - (\sigma_\rho S z)_i = \frac{1}{2}\left\{(z_{i+1} - z_i) * \left[\left(\sigma_\theta S - \frac{\mu p z}{\sin\alpha}\right)_{i+1} + \left(\sigma_\theta S - \frac{\mu p z}{\sin\alpha}\right)_i\right]\right.,$$

где $p = S\left(\frac{\sigma_\rho}{R_\rho} + \frac{\sigma_\theta}{R_\theta}\right)$.

Таким образом, для каждой точки заготовки получена замкнутая система нелинейных алгебраических уравнений.

Процесс формоизменения разбивается на стадии, внутри которых нагружение считается простым.

Напряжения и деформации рассчитываются от стадии к стадии, от точки к точке, начиная в каждой стадии с границы контакта дна заготовки с поверхностью матрицы. Граничные условия устанавливаются следующим образом: пластическая деформация оболочек начинается при достижении тангенциального напряжения сжатия предела текучести материала $\sigma_\theta = \sigma_S$.

Наличие плоского дна у обжимаемой заготовки учитывается путем увеличения радиального напряжения, которое вызвано изгибом и последующим спрямлением дна заготовки в процессе обжима. Это приращение определяется по методике, предложенной Е.А.Поповым [4]:

$$\Delta\sigma_\rho = 2\,\frac{\sigma_S\, S}{4\, R_{cв}},$$

где $R_{cв}$ – радиус свободного изгиба.

Применительно к данному случаю

$$R_{cв} = \frac{\sqrt{R_к\, S}}{\sin\alpha}.$$

Каждой стадии нагружения ставится в соответствии определенная величина радиуса границы контакта дна заготовки с матрицей.

Поскольку прирост деформации по стадиям ограничен, то для текущей стадии

$$\Delta \mathcal{E}_{\theta j} = \mathcal{E}_{\theta j} - \mathcal{E}_{\theta j-1} ;$$

$$\Delta \mathcal{E}_{Sj} = \mathcal{E}_{Sj} - \mathcal{E}_{Sj-1} ,$$

а следовательно и

$$\Delta \bar{\mathcal{E}}_j = \bar{\mathcal{E}}_j - \bar{\mathcal{E}}_{j-1} .$$

Эквивалентная деформация $\bar{\mathcal{E}}_j$ на данной стадии равна

$$\bar{\mathcal{E}}_j = \sum \Delta \bar{\mathcal{E}} .$$

Напряженно-деформированное состояние в точке заготовки определяется при решении системы уравнений (I) - (2) методом последовательных приближений.

Условием того, что поле напряжений и деформаций определено с требуемой точностью, является выполнение неравенства

$$\frac{(\sigma_\rho S)_i^{K} - (\sigma_\rho S)_i^{K-1}}{(\sigma_\rho S)_i^{K-1}} \leqslant \Delta ,$$

где индексы K и $K-1$ означают соответственно K-е и $K-1$-е приближение; Δ - параметр, определяющий точность расчета.

Для реализации численного метода определения напряженно-деформированного состояния разработана программа на языке $ALGOL$ для машины М 222. Блок схема этой программы приведена на рис. 2.

Предварительный расчет толщины конических оболочек, полученных по данной методике, удовлетворительно согласуются с экспериментальными данными (погрешность составляет 10%).

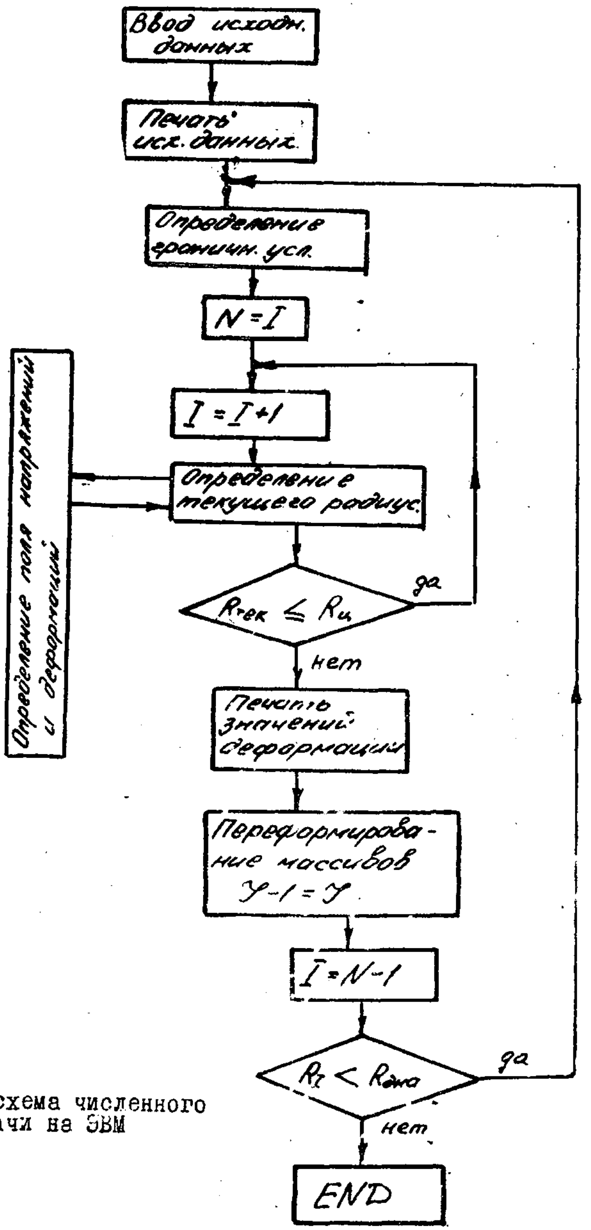
Литература

1. Овчинников А.Г., Чистяков В.П., Попов И.П., Штамповка полусфер без утонения стенки. Сб.: "Машины и технология ОМД". Труды МВТУ им. Н.Э.Баумана, № 229, 1976.

2. Мельников Э.Л. "Холодная штамповка. М., "Машиностроение", 1976.

3. Хилл Р. Математическая теория пластичности. ГИТТЛ, 1956.

4. Попов Е.А. Основы теории листовой штамповки. М., "Машиностроение", 1977.



Р и с. 2. Блок-схема численного решения задачи на ЭВМ