

УДК 621.7.044

А.П. МЕЛЬНИЧУК

Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Украина

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ГИДРОДИНАМИЧЕСКОЙ ШТАМПОВКИ: ОБОСНОВАНИЕ ОПРЕДЕЛЕНИЯ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ТОНКОСТЕННЫХ ОСЕСИММЕТРИЧНЫХ ОБОЛОЧЕК

Изготовление гидродинамической штамповкой тонкостенных деталей производится поэтапно – оформление основного контура изделия, формирование локальных элементов рельефа, калибровка детали. Этапы формообразования характеризуются различными технологическими и энергосиловыми параметрами процесса, что приводит к существенным различиям в постановке и методах решения задач определения напряженно-деформированного состояния (НДС) оболочек. В статье рассмотрен вопрос теоретического описания НДС тонкостенных деталей трубопроводов систем ЛА – сферических и конусных наконечников. Обосновано теоретическое представление НДС тонкостенных осесимметричных оболочек на этапе оформления основного (генерального) контура. Определение НДС выполнено с использованием положений классических теорий тонких оболочек и пластического течения в динамической постановке.

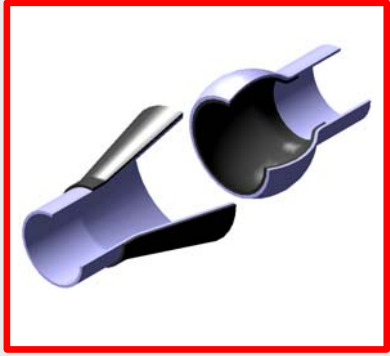
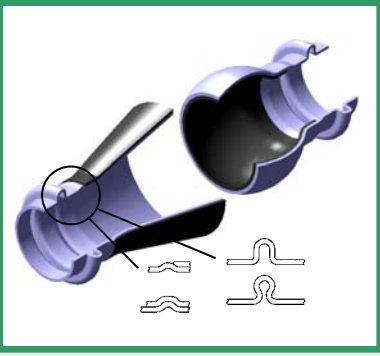
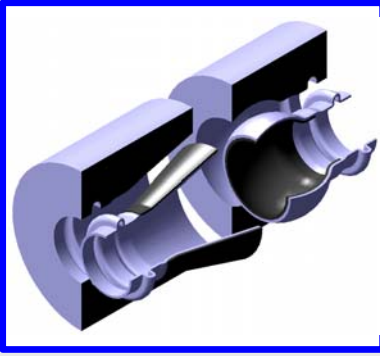
Ключевые слова: гидродинамическая штамповка, тонкостенная осесимметричная оболочка, напряженно-деформированное состояние, пластическое течение.

В работах [1, 2], основываясь на результатах экспериментальных исследований и опыте промышленного использования методов гидродинамической штамповки (ГДШ), была обоснована необходимость разделения процесса ГДШ тонкостенных осесимметричных оболочек (деталей) на три отличитель-

ных этапа – оформление основного контура оболочек, оформление элементов взаимной фиксации и компенсаторов, калибровка оболочек; также были определены параметры внешнего нагружающего воздействия на заготовку – импульса давления в формирующей камере.

Таблица 1

Особенности деформирования тонкостенных осесимметричных оболочек на различных этапах формообразования при гидродинамической штамповке

Оформление основного контура сферических и конусных оболочек	Оформление элементов взаимной фиксации и компенсаторов	Калибровка сферических и конусных оболочек
		
$\frac{\delta}{D} \leq 0,02; \delta \ll r_s;$ $\frac{\Delta W}{W_0} \geq 0,05$	$\delta \approx r_s;$ $\frac{\Delta W}{W_0} \ll 1$	$\frac{\Delta W}{W_0} \rightarrow 0; v_c \rightarrow v_{пр};$ $\Delta D = f(\epsilon_m)$
<p>δ – толщина заготовки; D – диаметр заготовки; r_s – радиус кривизны элемента оболочки; ΔW – приращение объема внутренней полости детали; W_0 – начальный объем; v_c – скорость соударения заготовки с матрицей; $v_{пр}$ – предельная скорость; ΔD – отклонение диаметра детали; ϵ_m – упругая деформация матрицы</p>		

Дальнейшим шагом в изучении и исследовании процессов ГДШ является определение параметров напряженно-деформированного состояния (НДС) тонкостенных осесимметричных оболочек на различных этапах формообразования, при этом особенности процессов ГДШ (табл. 1) оказывают существенное влияние на теоретическое представление НДС оболочек. Так при оформлении основного контура детали отношение толщины заготовки к диаметру менее 2 %, радиус изгиба существенно больше толщины материала, а приращение объема внутренней полости детали при штамповке превышает 5 %. Оформление элементов взаимной фиксации и компенсаторов характеризуются несущественными объемами проштамповки, при этом радиус изгиба элементов оболочки уже сопоставим с толщиной материала. При калибровке приращение объема ничтожно, но скорость соударения заготовки с матрицей приближается к предельной, также существенно пружинение детали, что обусловлено упругой деформацией матрицы. Все это приводит к различиям в постановке и методах решения задач определения НДС оболочек на различных этапах формообразования.

Теоретическое описание НДС тонкостенных осесимметричных деталей базируется на положениях классических теорий тонких оболочек и пластического течения в динамической постановке.

В общем виде теория изгиба тонких оболочек под действием осесимметричной нагрузки представлена в работах [3, 4]. Поскольку оболочка тонкая и цилиндрическая, справедливы известные допущения:

– изменение толщины оболочки в процессе деформирования мало по сравнению с ее прогибом в радиальном направлении

$$\tilde{u}(r, z) = u(R, z), \quad (1)$$

где R – радиус срединной поверхности;

– осевые σ_z и тангенциальные σ_θ напряжения допустимо считать основными, а радиальные и касательные – второго порядка малости, что определяет зависимость между деформациями и напряжениями (осевыми ε_z, σ_z и тангенциальными $\varepsilon_\theta, \sigma_\theta$ соответственно) вида:

$$\varepsilon_z = \frac{1}{E}(\sigma_z - \nu\sigma_\theta); \quad (2)$$

$$\varepsilon_\theta = \frac{1}{E}(\sigma_\theta - \nu\sigma_z); \quad (3)$$

$$\sigma_z = \frac{E}{1-\nu^2}(\varepsilon_z + \nu\varepsilon_\theta); \quad (4)$$

$$\sigma_\theta = \frac{E}{1-\nu^2}(\varepsilon_\theta + \nu\varepsilon_z), \quad (5)$$

где E – модуль упругости материала;

ν – коэффициент Пуассона;

– отнесение касательных напряжений к второстепенным означает отнесение к этой группе и деформаций сдвига, что равносильно допущению о неискривляемости прямых нормалей. Это допущение дает возможность выразить компоненты смещения любой точки A цилиндрической оболочки, находившейся до деформации на расстоянии ξ от срединной поверхности (рис. 1), как

$$\tilde{u} = u; \quad (6)$$

$$w = w_0 - \xi \frac{du}{dz}; \quad (7)$$

$$\xi = r - R, \quad (8)$$

где u, w – проекции перемещения точки на направления r и z соответственно.

При этом деформации и напряжения в перемещениях примут вид:

$$\varepsilon_z = \frac{\partial w}{\partial z} = \frac{dw_0}{dz} - \xi \frac{d^2u}{dz^2}; \quad (9)$$

$$\varepsilon_\theta = \frac{\tilde{u}}{r} \approx \frac{u}{R}; \quad (10)$$

$$\sigma_z = \frac{E}{1-\nu^2} \left(\frac{dw_0}{dz} - \xi \frac{d^2u}{dz^2} + \nu \frac{u}{R} \right); \quad (11)$$

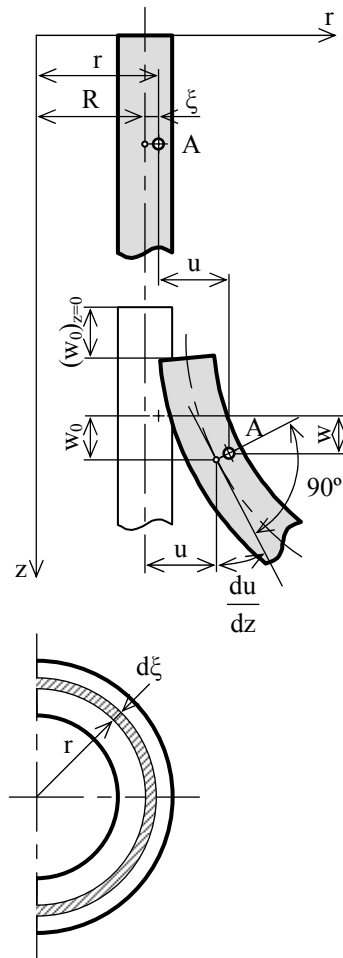


Рис. 1. Компоненты перемещения точки цилиндрической оболочки при деформации

$$\sigma_\theta = \frac{E}{1-\nu^2} \left(\frac{u}{R} + \nu \frac{dw_0}{dz} - \nu \xi \frac{d^2 u}{dz^2} \right). \quad (12)$$

В тонкостенной оболочке реализуется плоское напряженное состояние, причем при осесимметричной деформации главными будут оси, направленные вдоль образующей и в окружном направлении [3, 4].

Согласно работе [5] уравнения движения элемента оболочки (рис. 2) в приращениях с учетом инерционных сил в цилиндрической системе координат имеют вид:

$$\begin{aligned} r h \rho \frac{d^2 r}{dt^2} &= p r \sin \alpha + \frac{\partial}{\partial S} (N_s r \cos \alpha) - \\ &- \frac{\partial}{\partial S} (Q r \sin \alpha) - N_\theta; \end{aligned} \quad (13)$$

$$\begin{aligned} r h \rho \frac{d^2 z}{dt^2} &= p r \cos \alpha - \frac{\partial}{\partial S} (N_s r \sin \alpha) - \\ &- \frac{\partial}{\partial S} (Q r \cos \alpha); \end{aligned} \quad (14)$$

$$\frac{\partial}{\partial S} (M_s r) - M_\theta \cos \alpha - Q r = 0, \quad (15)$$

где r, z – текущие эйлеровы координаты оболочки;
 h – текущая толщина оболочки;
 α – угол между нормалью к поверхности элемента оболочки и положительным направлением оси z ;
 ρ – плотность материала;
 S – длина дуги вдоль меридиана;

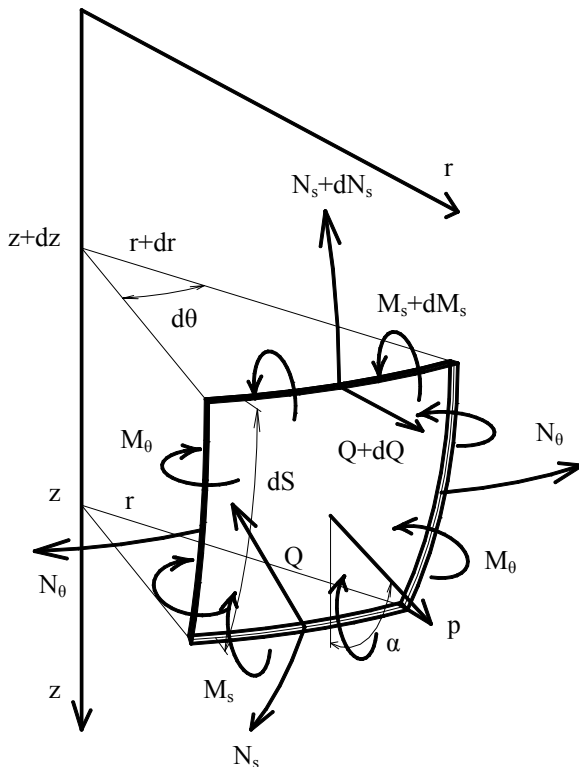


Рис. 2. Равновесие элемента тонкостенной осесимметричной оболочки

p – нормальное давление, действующее на оболочку;

Q – перерезывающая сила;

$N_s, N_\theta, M_s, M_\theta$ – продольные силы и изгибающие моменты (погонные) в меридиональном (вдоль образующей) и широтном (окружном) направлениях.

С учетом условия пластичности и постоянства объема, величины деформаций, напряжений и их взаимосвязь определяется следующим образом [3, 4]:

$$\text{div}(\vec{W}) = 0; \quad (16)$$

$$\varepsilon_s + \varepsilon_\theta + \varepsilon_h = 0, \quad (17)$$

где W – объем элемента оболочки;

$\varepsilon_s, \varepsilon_\theta, \varepsilon_h$ – деформации вдоль образующей, окружные и по толщине соответственно:

$$\varepsilon_s = \ln \frac{S}{S_0}; \quad (18)$$

$$\varepsilon_\theta = \ln \frac{r}{r_0}; \quad (19)$$

$$\varepsilon_h = \ln \frac{h}{h_0}, \quad (20)$$

где S_0, S – начальное и текущее значения длины образующей;

r_0, r – начальное и текущее значения радиуса;

h_0, h – начальное и текущее значения толщины заготовки.

При формообразовании основного контура детали достигаются существенные пластические деформации (15...20%), при этом требования к точности обвода оболочки невысоки. В этом случае нет необходимости учитывать упругие деформации и скоростное упрочнение материала. Поэтому, представление физического закона упрочнения материала можно использовать в виде [6]:

$$\sigma_i = \sigma_T + \Pi \varepsilon_i; \quad (21)$$

$$\varepsilon_i = \frac{\sqrt{2}}{3} \sqrt{(\varepsilon_s - \varepsilon_\theta)^2 + (\varepsilon_\theta - \varepsilon_h)^2 + (\varepsilon_h - \varepsilon_s)^2}; \quad (22)$$

$$E_c = \frac{\sigma_i}{\varepsilon_i}, \quad (23)$$

где σ_i – интенсивность напряжений;

ε_i – интенсивность деформаций;

σ_T – предел текучести;

Π – модуль упрочнения;

E_c – секущий модуль.

Критерий условия пластичности Губера-Мизеса-Генки при плоском напряженном состоянии

$$\sigma_s^2 - \sigma_s \sigma_\theta + \sigma_\theta^2 - \sigma_i^2 = 0. \quad (24)$$

С учетом изменения деформаций и напряжений по толщине оболочки в зависимости от расстояния ξ от срединной поверхности (рис. 3) выражения для определения величин деформаций и напряжений

выглядят следующим образом [7]:

$$\varepsilon_s(\xi) = \ln \frac{dS}{dS_0} + \ln \left(1 + \xi \left(\frac{d\alpha}{dS} \right) \right); \quad (25)$$

$$\varepsilon_\theta(\xi) = \ln \frac{r(\xi)}{r_0(\xi)}; \quad (26)$$

$$\sigma_s(\xi) = \frac{2}{3} E_c (2 \varepsilon_s(\xi) + \varepsilon_\theta(\xi)); \quad (27)$$

$$\sigma_\theta(\xi) = \frac{2}{3} E_c (2 \varepsilon_\theta(\xi) + \varepsilon_s(\xi)), \quad (28)$$

где ξ – расстояние от срединной поверхности;

α – угол поворота элемента оболочки.

Связь между напряжениями и внутренними усилиями определяется интегральными уравнениями равновесия, которые при плоском напряженном состоянии имеют вид [7]:

$$N_s = \int_{-\frac{h}{2}}^{\frac{h}{2}} \sigma_s(\xi) d\xi; \quad (29)$$

$$N_\theta = \int_{-\frac{h}{2}}^{\frac{h}{2}} \sigma_\theta(\xi) d\xi; \quad (30)$$

$$M_s = \int_{-\frac{h}{2}}^{\frac{h}{2}} \sigma_s(\xi) \xi d\xi; \quad (31)$$

$$M_\theta = \int_{-\frac{h}{2}}^{\frac{h}{2}} \sigma_\theta(\xi) \xi d\xi. \quad (32)$$

Значение перерезывающей силы Q определяется из третьего уравнения движения элемента оболочки – (15).

Соотношения между геометрическими параметрами элемента оболочки можно представить следующим образом [5]:

$$\cos \alpha = \frac{dr}{dS}; \quad (33)$$

$$\sin \alpha = -\frac{dz}{dS}; \quad (34)$$

$$\left(\frac{dr}{dS} \right)^2 + \left(\frac{dz}{dS} \right)^2 = 1. \quad (35)$$

Граничные условия на торцах оболочки назначаются в соответствии с реализуемой на практике технологической схемой штамповки:

– со свободными торцами – $N_s = 0$, $M_s = 0$, $Q \neq 0$;

– с защемленными торцами – $N_s \neq 0$, $M_s \neq 0$, $Q \neq 0$;

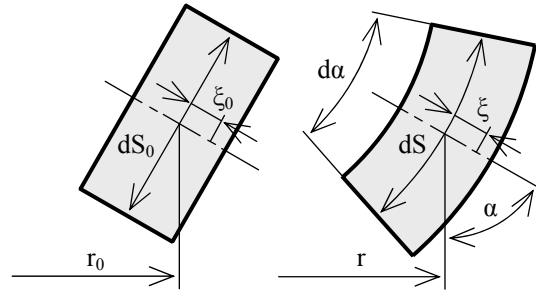


Рис. 3. Определение деформаций элемента оболочки в зависимости от расстояния ξ от срединной поверхности

– с подпираемыми торцами – $N_s \neq 0$, $M_s \neq 0$, $Q \neq 0$.

Внешнее нагружающее воздействие на оболочку определяется величиной импульса давления жидкости в формующей камере.

Как показывают результаты экспериментальных исследований и опыт промышленного внедрения ГДШ характер импульса давления, действующего на заготовку, при оформлении основного контура оболочки можно аппроксимировать функцией $p = p(t)$ и представить в виде синусоидального закона [2]:

$$p = p_{\max} \cdot \sin \left(\frac{\pi t}{t_{\max}} \right), \quad (36)$$

где p_{\max} – максимальное давление;

t_{\max} – продолжительность импульса давления;

p , t – текущие значения давления и времени импульса.

Как уже отмечалось, при формообразовании основного контура оболочки, характеризующегося значительным объемом проштамповки, требования к точности геометрии оболочки невысоки, поскольку после формообразующего перехода следует калибровочный. В то же время при оформлении основного контура детали оптимальным является такое нагружение рабочим импульсом давления, при котором оболочка подходит к матрице с минимальной скоростью, что способствует получению оболочки с рациональными параметрами НДС и обуславливает минимизацию энергозатрат на деформирование [6].

Для решения задачи описания НДС элементов взаимной фиксации и компенсаторов сферических и конусных наконечников в первом приближении можно использовать систему соотношений (13 – 15). Однако необходимо учитывать, что при построении расчетной модели недопустимо применение гипотезы Кирхгофа-Лява, т.к. радиусы кривизны отдельных элементов оболочки становятся соизмеримыми с толщиной заготовки.

Дифференциальные уравнения равновесия толстостенного элемента оболочки в цилиндрической системе координат имеют вид (рис. 4) [8]:

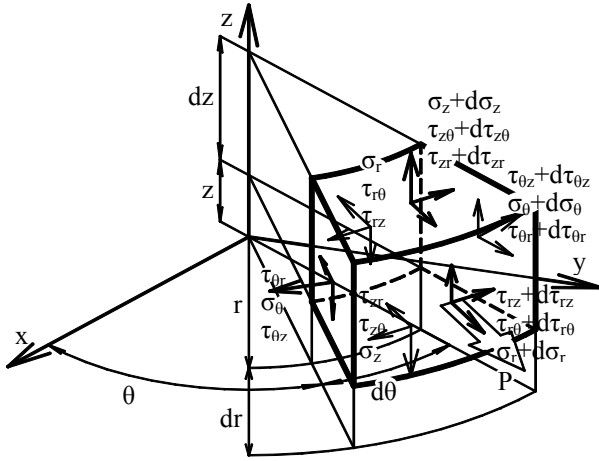


Рис. 4. Равновесие толстостенного элемента оболочки

$$\frac{\partial \sigma_r}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial \tau_{r\theta}}{\partial \theta} + \frac{\partial \tau_{rz}}{\partial z} + \frac{\sigma_r - \sigma_\theta}{r} + P = \rho \frac{\partial^2 r}{\partial t^2}; \quad (37)$$

$$\frac{\partial \tau_{r\theta}}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial \sigma_\theta}{\partial \theta} + \frac{\partial \tau_{\theta z}}{\partial z} + \frac{2\tau_{r\theta}}{r} = \rho \frac{\partial^2 \theta}{\partial t^2}; \quad (38)$$

$$\frac{\tau_{rz}}{r} + \frac{1}{r} \frac{\partial \tau_{\theta z}}{\partial \theta} + \frac{\partial \sigma_z}{\partial z} + \frac{\partial \tau_{rz}}{\partial r} = \rho \frac{\partial^2 z}{\partial t^2}, \quad (39)$$

где $\sigma_r, \sigma_\theta, \sigma_z, \tau_{r\theta}, \tau_{rz}, \tau_{\theta z}, \tau_{zr}, \tau_{z\theta}, \tau_{\theta r}$ – компоненты тензора напряжений в цилиндрической системе координат;

r, θ, z – текущие координаты элемента оболочки;

P – проекция объемной силы на ось r , обусловленная действующим давлением жидкости.

Следует отметить, что для корректного решения задачи определения НДС элементов взаимной фиксации и компенсаторов наконечников трубопроводов необходимо в этом направлении провести соответствующие теоретические и экспериментальные исследования.

В процессе калибровки осесимметричных оболочек необходимо рассматривать две стадии их радиального деформирования [2, 9]:

- движение заготовки под действием импульса давления;
- соударение заготовки и матрицы, а также их пружинение.

Основной характеристикой, определяющей отклонение размеров детали после прекращения действия нагрузки, является пружинение материала, величина которой может быть сведена практически к нулю за счет пластической деформации заготовки при ударе о матрицу. При этом скорость соударения определяется как [9]:

$$v_p = 2,1 \frac{a_b \varepsilon_s}{k_c}, \quad (40)$$

где a_b – скорость волн упругой деформации в материале заготовки;

ε_s – величина упругой деформации заготовки;

k_c – коэффициент, учитывающий акустическое сопротивление заготовки и матрицы (табл. 2).

Однако в формуле (40) не учтена упругая деформация матрицы, способствующая дополнительному перемещению заготовки с разгрузкой из растянутого положения. Расчет упругой деформации матрицы производится по формуле [9]:

$$\varepsilon_M = \frac{J}{\rho_M \omega r_B^2 \ln \frac{r_H}{r_B}}, \quad (41)$$

где J – импульс давления;

ρ_M – плотность материала матрицы;

ω – частота собственных колебаний матрицы;

r_H, r_B – наружный и внутренний радиусы матрицы соответственно.

Тогда при любой скорости соударения отклонение наружного диаметра детали от номинального диаметра матрицы определяется выражением

$$\Delta D = 2r_B (-\varepsilon_s + K \rho \delta v_c^2 + \varepsilon_M), \quad (42)$$

где v_c – текущая скорость соударения заготовки и матрицы;

δ, ρ – толщина и плотность материала заготовки;

$$K = \frac{\varepsilon_s}{\rho \delta v_p^2}, \quad (43)$$

где v_p – расчетная по формуле (40) скорость соударения заготовки и матрицы.

Решая (42) относительно v_c определяем ту минимальную скорость соударения, при которой величина пружинения будет в пределах поля допуска

$$v_c = \sqrt{\frac{1}{K \rho \delta} \left(\frac{\Delta D}{2r_B} + \varepsilon_s - \varepsilon_M \right)}. \quad (44)$$

Однако следует заметить, что при превышении скорости соударения свыше определенной предельной величины происходит “пластическое сращивание” заготовки с металлической матрицей. Поэтому максимальная скорость подхода заготовки к поверхности матрицы не должна превышать $v_{пр}$ (табл. 2) [9].

Таблица 2

Значения коэффициента k_c и предельной скорости соударения $v_{пр}$ для различных материалов

Материал матрицы	Материал заготовки	k_c	$v_{пр}, м/с$
Инструментальная сталь	Сталь	0,50	250
	Титановый сплав	0,63	320...350
	Алюминиевый сплав	0,74	200

При невозможности обеспечить заданную точность детали при $v_c \leq v_{пр}$ следует скорректировать в сторону увеличения диаметр матрицы, компенсируя этим пружинение детали после снятия нагрузки.

Литература

1. Мельничук А.П. Исследование процессов гидродинамической штамповки: обоснование принципиального подхода к решению задач деформирования тонкостенных осесимметричных оболочек / А.П. Мельничук // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2008. – № 1 (48). – С. 36-39.

2. Мельничук А.П. Исследование процессов гидродинамической штамповки: обоснование определения параметров импульса давления в формирующей камере / А.П. Мельничук // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2008. – № 2 (49). – С. 39-44.

3. Тимошенко С.П. Пластинки и оболочки / С.П. Тимошенко, С. Войновский-Кригер. – М.: Наука, 1963. – 635 с.

4. Безухов Н.И. Основы теории упругости, пластичности и ползучести / Н.И. Безухов. – М.: Высшая школа, 1968. – 512 с.

5. Уитмер. Большие динамические деформации балок, колец, пластин и оболочек / Уитмер, Бал-

мер, Лич, Пиан // *Ракетная техника и космонавтика*. – 1963. – №8. – С. 111-123.

6. Кривцов В.С. Особенности описания деформирования тонкостенных цилиндрических деталей при гидродинамической штамповке / В.С. Кривцов, А.П. Мельничук // *Авиационно-космическая техника и технология*. – X., 2001. – Вып. 25. – С. 28-34.

7. Родько С.Я. Исследование, разработка и внедрение процессов гидродинамического формообразования тонколистовых деталей летательных аппаратов: дис. ... канд. техн. наук: 05.07.04 / Сергей Яковлевич Родько. – X., 1985. – 238 с.

8. Писаренко С.Г. Уравнения и краевые задачи теории пластичности и ползучести / С.Г. Писаренко, Н.С. Можаровский. – К.: Наукова думка, 1981. – 496 с.

9. Муравьев С.Д. Разработка, исследование и внедрение технологических процессов калибровки и рельефной формовки на гидродинамических пресспушках с интенсификацией внешней нагрузки в формирующих камерах: дис. ... канд. техн. наук: 05.07.04 / Сергей Дмитриевич Муравьев. – X., 1985. – 184 с.

Поступила в редакцию 20.05.2008

Рецензент: д-р техн. наук, проф. М.Е. Тараненко, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков.

ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСІВ ГІДРОДИНАМІЧНОГО ШТАМПУВАННЯ: ОБГРУНТУВАННЯ ВИЗНАЧЕННЯ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ ТОНКОСТІННИХ ВІСЕСИМЕТРИЧНИХ ОБОЛОНОК

О.П. Мельничук

Виготовлення гідродинамічним штампуванням тонкостінних деталей проводиться поетапно – оформлення основного контуру виробу, формування локальних елементів рельєфу, калібрування деталі. Етапи формоутворення характеризуються різними технологічними та енергосиловими параметрами процесу, що призводить до істотних відмінностей у постановці та методах вирішення задач визначення напружено-деформованого стану (НДС) оболонок. В статті розглянуто питання теоретичного уявлення НДС тонкостінних деталей трубопроводів систем ЛА – сферичних та конусних наконечників. Обгрунтовано теоретичне визначення НДС тонкостінних вісесиметричних оболонок на етапі оформлення основного (генерального) контуру. Визначення НДС виконане з використанням положень класичних теорій тонких оболонок і пластичної течії в динамічній постановці.

Ключові слова: гідродинамічне штампування, тонкостінна вісесиметрична оболонка, напружено-деформований стан, пластична течія.

PROCESSES OF HYDRODYNAMIC STAMPING: DEFLECTED MODE OF THIN-WALLED AXISYMMETRIC SHELLS

A.P. Melnychuk

Manufacturing of thin-walled parts via hydrodynamic stamping is made by few steps – obtaining of general contours of shells, elements of fixing and compensators, calibration of parts. Stages of shaping can be characterized by different technological and energy-power parameters of process. That requires different methods of determining of shells' deflected mode. The article examines theoretical method of determining of shells' deflected mode for pipelines of aircrafts. For general contour of thin shell, theoretical determining of deflected mode was given. For determining, classical theory of thin shells and dynamic plastic flow were used.

Key words: hydrodynamic stamping, thin-walled axisymmetric shell, deflected mode, plastic flow.

Мельничук Александр Петрович – канд. техн. наук, и.о. доцента кафедры технологии производства летательных аппаратов Национального аэрокосмического университета им. Н. Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина.