

В.С. Кривцов, А.П. Брагин, А.П. Мельничук, С.А. Полтарушников

*Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского
«Харьковский авиационный институт», Украина*

ОПРЕДЕЛЕНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ТОНКОСТЕННЫХ СФЕРИЧЕСКИХ ОБОЛОЧЕК

Рассмотрен вопрос определения параметров напряженно-деформированного состояния (НДС) произвольного элемента сферической оболочки. Для решения этой задачи использованы системы дифференциальных уравнений движения с учетом реализации больших пластических деформаций, с использованием гипотезы Кирхгофа-Ляве, с использованием физического закона, учитывающего упругую деформацию и линейное упрочнение в области пластических деформаций. Задача решена в предположении осесимметричности заготовки и детали, осесимметричности нагружения и однородности его в осевом направлении. Результаты численного решения задачи и сравнения их с результатами экспериментов подтверждают работоспособность выбранной модели.

осесимметричная сферическая оболочка, НДС произвольного элемента оболочки, гипотеза Кирхгофа-Лява, упругие, пластические деформации, расчетная модель, эксперимент, сравнение

В самолетостроении при монтаже отдельных участков трубопроводов широкое распространение получило соединение сфера-конус (рис. 1), обеспечивающее герметичность стыка участков трубопровода, компенсацию их угловых и линейных перемещений под воздействием переменных эксплуатационных нагрузок. К элементам соединения сфера-конус – сферическим и конусным наконечникам предъявляют жесткие требования соответствия критериям качества и технологичности.

Процесс оформления основного (генерального) контура детали характеризуется значительными величинами проштамповки, что при деформировании маложестких оболочек требует, чтобы нагружающее воздействие было как можно более плавным, приближающимся к статическому. Решение этой задачи возможно с использованием положений классических теорий тонких оболочек и пластического течения в динамической постановке [1 – 3].

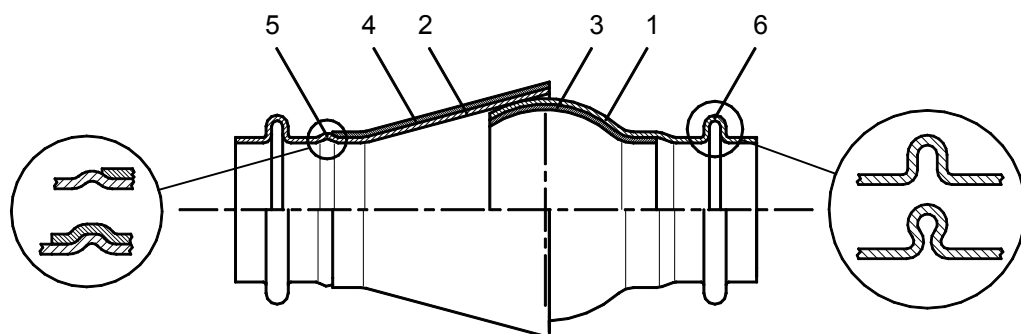


Рис. 1. Усиленное соединение сфера-конус трубопровода:
 1, 2 – основные элементы сферического и конического наконечников;
 3, 4 – усиливающие элементы сферического и конического наконечников;
 5 – элементы фиксации (рифты), обеспечивающие взаимную фиксацию
 внешней и внутренней составляющих элементов;
 6 – компенсаторы,
 обеспечивающие компенсацию угловых и линейных перемещений
 элементов под воздействием эксплуатационных нагрузок

При решении задачи описания НДС таких элементов деталей, как рифты различного направления, пуклевки и компенсаторы следует учитывать, что для построения расчетной модели нельзя использовать гипотезу Кирхгофа-Лява, поскольку радиусы кривизны отдельных элементов оболочки соизмеримы с толщиной заготовки [1 – 3].

В процессе гидродинамической калибровки осесимметричных оболочек необходимо рассматривать две стадии их радиального деформирования: движение заготовки под действием импульсного давления; соударение заготовки и матрицы с последующим их пружинением [1 – 3].

Как показывают результаты экспериментальных исследований и опыт промышленного использования методов гидродинамической штамповки [4, 5] во всех случаях вид функции давления жидкости в гидравлической камере можно условно разделить на четыре варианта аппроксимации (рис. 2), три из которых допустимо использовать в форме $p = p(t)$. Это обусловлено тем, что фазовый сдвиг по времени на два порядка меньше продолжительности импульса, таким образом, справедливо допущение, что давление равномерно распределено по высоте камеры [9]:

$$p = p_{\max} \frac{t}{n t_{\max}}; \quad (1)$$

$$p = p_{\max} \cdot \sin \left(\frac{\pi t}{t_{\max}} \right); \quad (2)$$

$$p = p_{\max} \cdot \sin \left[\pi \left(\frac{t}{t_{\max}} \right)^m \right], \quad (3)$$

где p_{\max} – максимальное давление; t_{\max} – продолжительность импульса давления; p, t – текущие значения давления и времени импульса; m – коэффициент, определяющий угол наклона синусоиды.

Для оформления основного контура оболочки необходим “мягкий” нагружающий импульс давления, что соответствует зависимостям (1) и (2). Этого можно достичь увеличением массы снаряда и снижением его скорости, вследствие чего возрастает длительность нагружения и деформирования заготовки. Из двух вариантов, приемлемых для формообразования основного контура оболочки, наиболее рациональным следует считать распределение давления по синусоидальному закону, так как при этом минимальны потери энергии через зазоры [4, 5, 8].

При оформлении элементов взаимной фиксации компенсаторов, где толщина заготовки соизмерима с радиусом изгиба, требуется более энергоемкий и жесткий импульс, характеризующийся более резким нарастанием величины давления по времени, чем при штамповке маложестких оболочек. Продолжительность импульса давления ниже, чем в двух ранее рассмотренных случаях, влияние волновых процессов на деформирование заготовки, может быть существенным и при некоторых параметрах нагружения допущение, что $p = p(t)$ уже не может быть приемлемым. Соотношение (3) рационально использовать применительно к процессам формообразования компенсаторов [5, 8].

Для калибровки и формования элементов рельефа (рифтов и пуклевок), где перемещения оболочки ничтожно малы, необходим жесткий остродинамичный импульс, обеспечивающий калибровочное усилие, что достигается снижением массы снаряда и увеличением его скорости. В этом случае для уменьшения величины пружинения оболочка должна соударяться с поверхностью матрицы с предельной скоростью. В этом случае функцию изменения давления во времени можно аппроксимировать экспоненциальной зависимостью (рис. 3) и изменение давления

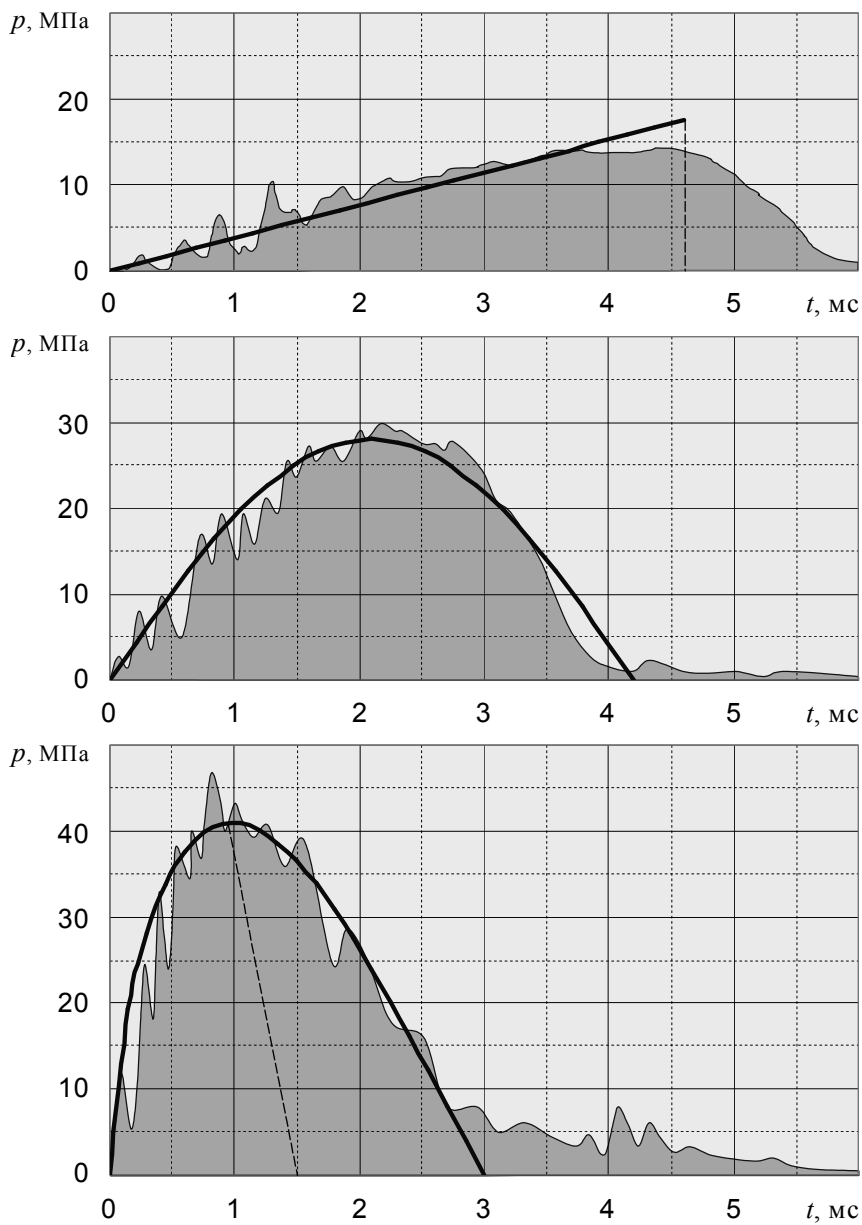


Рис. 2. Варианты аппроксимации функции $p = p(t)$ при ГДШ

по высоте камеры при этом весьма значительно [5, 8]. Поэтому функцию $p = p(z, t)$ следует определять с учетом взаимодействия снаряда с

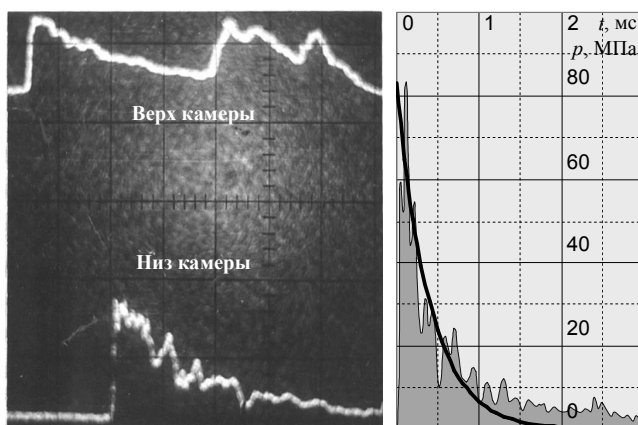


Рис. 3. Калибровочный импульс давления в камере

жидкостью. Решение этой задачи несколько упрощается с учетом относительной малости перемещений заготовки в процессе калибровки.

При оформлении гидродинамической камеры при этом весьма значительно [5, 8]. Поэтому функцию $p = p(z, t)$ следует определять с учетом взаимодействия снаряда с жидкостью. Решение этой задачи несколько упрощается с учетом относительной малости перемещений заготовки в процессе калибровки. штамповкой генерального контура сферической оболочки:

– функцию давления можно представить в форме соотношения (2) [9];

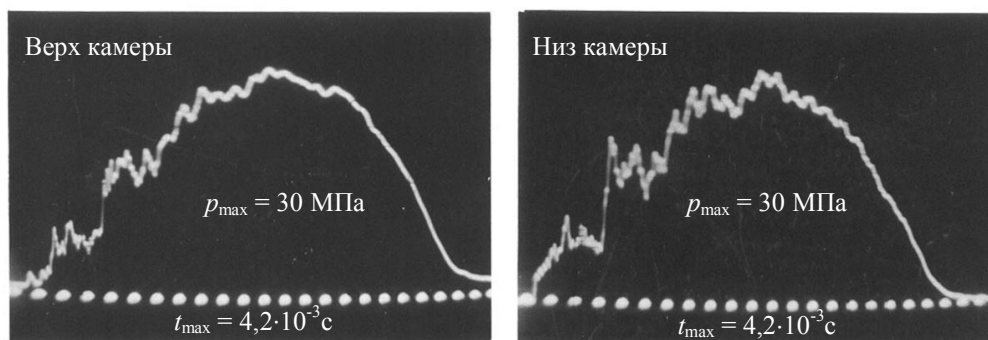


Рис. 4. Импульс давления в камере при оформлении основного контура

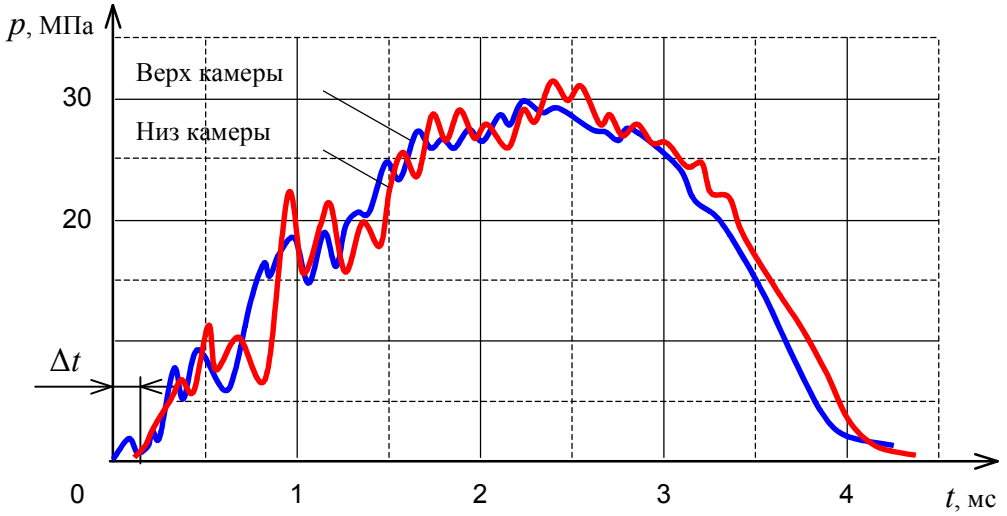


Рис. 5. Изменение импульса давления по высоте формирующей камеры при ГДШ тонкостенных оболочек

– в выражении (2) можно совершенно обоснованно не учитывать изменение давления по длине рабочей камеры (рис. 4, 5) о чем свидетельствует установленный экспериментально факт, что $\Delta t \ll t_{\max}$ [4].

Динамическое деформирование тонкостенных цилиндрических заготовок описывается геометрическими и физическими нелинейными уравнениями теории тонких оболочек с использованием теории пластического течения с учетом изотропного упрочнения и уравнения движения элемента оболочки имеют вид [1 – 3]:

$$r h \rho \frac{d^2 r}{dt^2} = p r \sin \alpha + \frac{\partial}{\partial S} (N_s r \cos \alpha) - \frac{\partial}{\partial S} (Q r \sin \alpha) - N_\theta; \quad (4)$$

$$r h \rho \frac{d^2 z}{dt^2} = p r \cos \alpha - \frac{\partial}{\partial S} (N_s r \sin \alpha) - \frac{\partial}{\partial S} (Q r \cos \alpha); \quad (5)$$

$$\frac{\partial}{\partial S} (M_s r) - M_\theta \cos \alpha - Q r = 0, \quad (6)$$

Аналогичным образом строят теорию определения НДС многослойных оболочек:

$$r \left(\sum_{i=1}^n h_i \rho_i \right) \frac{d^2 r}{dt^2} = p r \sin \alpha + \frac{\partial}{\partial S} \left(\left(\sum_{i=1}^n N_{s_i} \right) r \cos \alpha \right) - \frac{\partial}{\partial S} \left(\left(\sum_{i=1}^n Q_i \right) r \sin \alpha \right) - \sum_{i=1}^n N_{\theta_i};$$

$$r \left(\sum_{i=1}^n h_i \rho_i \right) \frac{d^2 z}{dt^2} = p r \cos \alpha - \frac{\partial}{\partial S} \left(\left(\sum_{i=1}^n N_{s_i} \right) r \sin \alpha \right) - \frac{\partial}{\partial S} \left(\left(\sum_{i=1}^n Q_i \right) r \cos \alpha \right); \quad (8)$$

$$\frac{\partial}{\partial S} \left(\sum_{i=1}^n M_{s_i} \right) r - \left(\sum_{i=1}^n M_{\theta_i} \right) \cos \alpha - \left(\sum_{i=1}^n Q_i \right) r = 0, \quad (9)$$

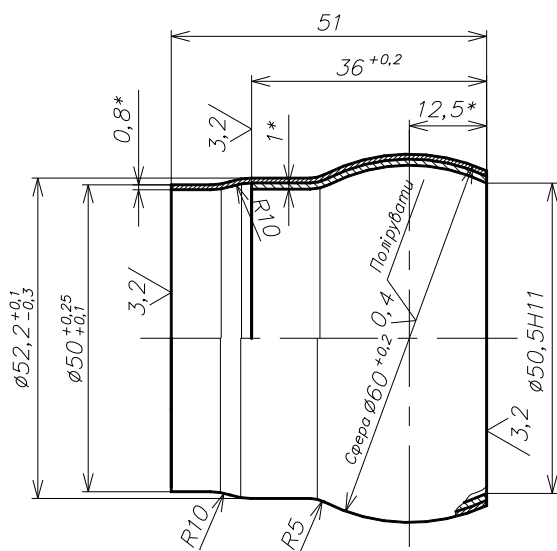


Рис. 6. Наконечник сферический

Выполнено моделирование и исследование процесса формообразования основного (генерального) контура элементов соединения сфера-конус на примере внешней оболочки сферического наконечника (рис. 6), выполненного из титанового сплава ПТ-7М [9]. Обоснование и построение математической модели ГДШ тонкостенных осесимметричных оболочек базируется на результатах экспериментальных исследований [6, 7].

Проведено численное исследование с использованием систем САЕ НДС сферического элемента при гидродинамической штамповке на этапе оформления основного контура, определено влияние параметров нагружающего воздействия на процесс формообразования (рис. 7). Установлена область рациональных параметров импульса давления, обозначенная на рис. 7 как область Г, которая характеризуется минимальными значениями промежуточных изгибных деформаций и минимальными энергозатратами на деформирование заготовки [9].

При сравнении численного решения задачи определения параметров НДС детали с результатами, полученными ранее экспериментально, использована интегральная оценка правильности решения. На рис. 8 показано сравнение компонентов деформированного состояния (рис. 8, а) и интенсивности деформаций (рис. 8, б), определенных теоретически (численно) и экспериментально.

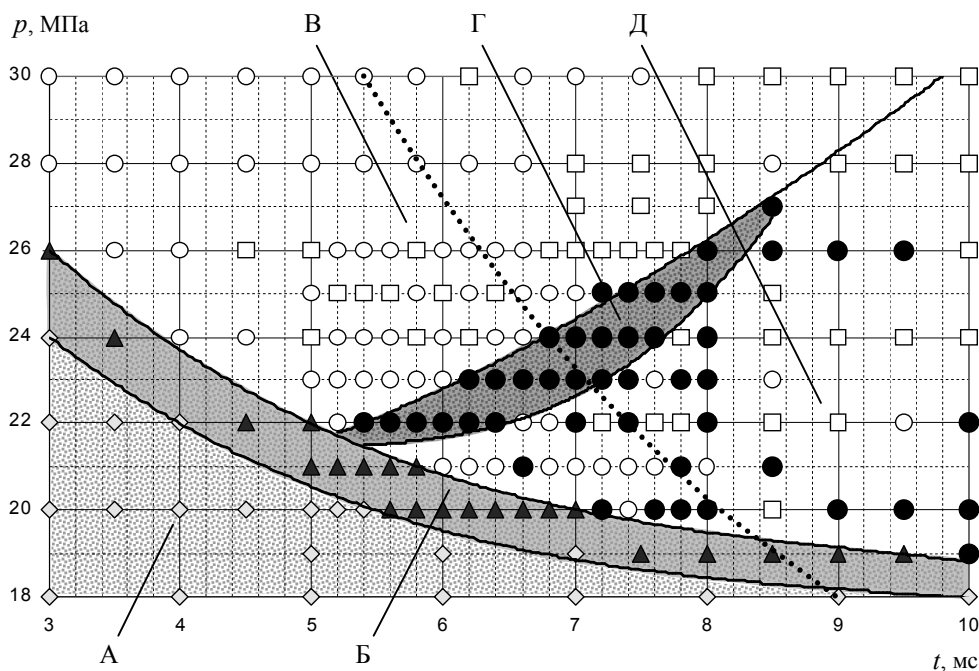


Рис. 7. Исследуемая область процесса гидродинамической штамповки при оформлении основного контура сферического наконечника:

- ◆ – нет контакта оболочки с поверхностью матрицы;
- ▲ – неполный контакт оболочки с поверхностью матрицы;
- – искажение формы оболочки от удара о поверхность матрицы;
- – удар оболочки, отскок с последующим наложением на матрицу; формообразование, сопровождающееся промежуточными изгибными деформациями;
- – качественная сферическая оболочка

Как видно, отклонение результатов численного решения от результатов эксперимента существенно только в зонах, близких к протяжному ребру матрицы, т.е. в зонах, где деформации имеют относительно малое значение [6, 7, 9].

На основе сопоставления результатов, полученных численно и экспериментально, можно утверждать, что предложенная математическая модель гидродинамической штамповки тонкостенных сферических оболочек при определении параметров напряженно-деформированного состояния детали на этапе оформления основного контура дает приемлемый результат [6, 7, 9].

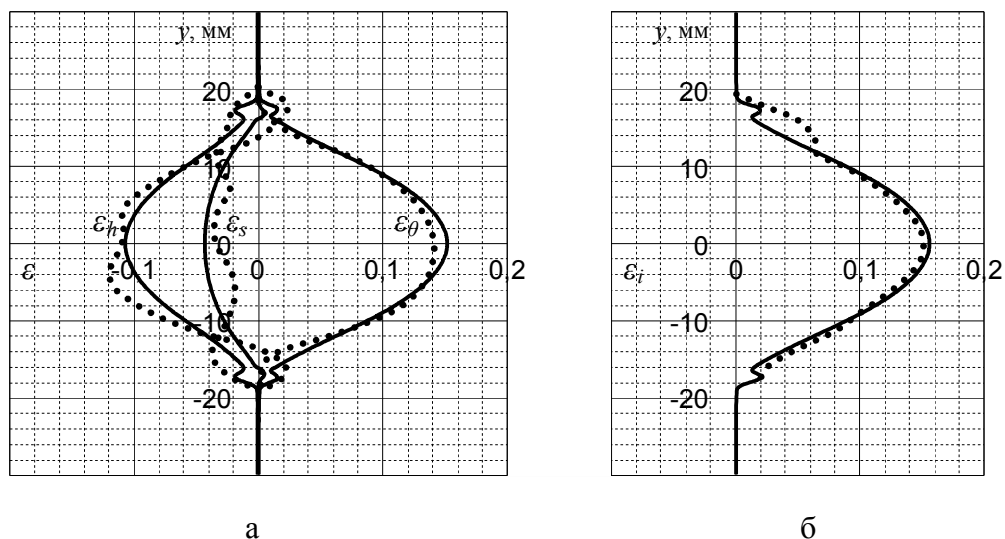


Рис. 8. Значения деформаций оболочки при моделировании и эксперименте:
 а – компоненты деформаций, б – интенсивность деформаций;
 — – моделирование; – эксперимент

Таким образом, можно рекомендовать для практического использования предложенные подход и методику определения рациональных параметров импульса нагружения, действующего на заготовку, и определения компонентов НДС тонкостенных сферических оболочек при реализации первого перехода – оформление методом гидродинамической штамповки (ГДШ) генерального контура оболочки.

Совершенно очевидна необходимость продолжения работы в этом направлении, т.е. необходимо провести:

- теоретическое и экспериментальное исследование процесса создания элементов рельефа оболочек, результаты которого соизмеримы с толщиной заготовки (рифты, пуклевки и т.п.);
- теоретическое и экспериментальное изучение процесса калибровки детали, т.е. необходимо рассмотреть совместную работу детали и матрицы.

Только после решения всех трех задач можно сформулировать полную методику теоретического определения энергосиловых параметров процессов ГДШ и компонентов НДС детали.

Литература

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

2. Большие динамические деформации балок, колец, пластин и оболочек / Уитмер, Балмер, Лич, Пиан // Ракетная техника и космонавтика. – 1963. – № 8. – С. 111-123.

3. Морино, Лич, Уитмер. Уточненный метод численного расчета нестационарных процессов в упругопластических тонких оболочках при больших деформациях // Прикладная механика, – 1971. – № 2. – С. 131-134.

4. Мацукин Ю.Г., Касьян В.Г., Лимберг Э.Р. Давление в ограниченном объеме жидкости при ее ударном нагружении // Импульсные методы обработки материалов: Сб. научн. тр. – М-ск: Наука и техника, 1977. – С. 106-110.

5. Родько С.Я., Муравьев С.Д., Брагин А.П. О влиянии геометрических параметров формующих камер пресс-пушек на импульс давления в жидкости // Импульсная обработка металлов давлением: Сб. научн. тр. – Х.: Харьк. авиац. ин-т, 1984. – Вып. 12. – С. 111-115.

6. Полтарушников С.А., Брагин А.П., Мильченко Е.И. Деформированное состояние деталей типа сферических и конических законцовок трубопроводов // Импульсная обработка металлов давлением: Сб. научн. тр. – Х.: Харьк. авиац. ин-т, 1984. – Вып. 12. – С. 21-26.

7. Родько С.Я., Брагин А.П. Экспериментальное исследование процесса свободного деформирования тонкостенных труб при гидродинамической штамповке // Импульсная обработка металлов давлением: Сб. научн. тр. – Х.: Харьк. авиац. ин-т, 1987. – С. 52-57.

8. Кривцов В.С., Мельничук А.П. Особенности описания деформирования тонкостенных цилиндрических деталей при гидродинамической штамповке // Авиационно-космическая техника и технология: Труды Нац. аэрокосм. ун-та “ХАИ”. – Х.: Нац. аэрокосм. ун-т “ХАИ”, 2001. – Вып. 25. – С. 28-34.

9. Мельничук А.П. Моделирование технологических процессов гидродинамической штамповки законцовок трубопроводов воздушных систем летательных аппаратов: Дис. ... канд. техн. наук: 05.07.04. – Х.: Нац. аэрокосм. ун-т “ХАИ”, 2006. – 207 с.

Поступила в редакцию 23.05.2007

Рецензент: д-р техн. наук, проф. В.К. Лобанов, завод им. Малышева, Харьков.