

УДК 621.7.044

А.П. МЕЛЬНИЧУК

*Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Украина***ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ГИДРОДИНАМИЧЕСКОГО ФОРМООБРАЗОВАНИЯ ТОНКОСТЕННЫХ ОСЕСИММЕТРИЧНЫХ ОБОЛОЧЕК ПРИ ОФОРМЛЕНИИ ОСНОВНОГО КОНТУРА НА ПРИМЕРЕ СФЕРИЧЕСКОГО НАКОНЕЧНИКА ТРУБОПРОВОДОВ ВОЗДУШНЫХ СИСТЕМ ЛА**

Использование особотонкостенных заготовок из титановых сплавов для изготовления наконечников трубопроводов воздушных систем самолетов привело к необходимости разработки и создания новых конструктивно-технологических решений. При создании элементов соединения «сфера-конус» с использованием методов гидродинамической штамповки необходимо решить ряд задач, существенно отличающихся друг от друга, решение которых в аналитическом виде не представляется возможным. Исследование динамического поведения тонкостенной осесимметричной оболочки на примере сферического наконечника при оформлении основного контура проведено в системе инженерного анализа ANSYS. Проведенные исследования процесса гидродинамической штамповки сферической оболочки позволили определить влияние энергетических параметров нагружающего импульса давления на процесс формообразования и установить область рациональных параметров нагружения.

гидродинамическая штамповка, соединение, сферический наконечник, тонкостенная оболочка

Наиболее широкое распространение при монтаже отдельных участков трубопроводов воздушных систем летательных аппаратов (ЛА), таких как противообледенительная и кондиционирования воздуха (ПОС и СКВ), получило соединение сфера-конус (рис. 1). В прогрессивных конструкциях высокоресурсных трубопроводов ПОС и СКВ для изготовления стыковых элементов (наконечников) использу-

ются особотонкостенные ($\delta \leq 0,02 D$) заготовки из титановых сплавов. Конструктивно сферические и конические элементы могут быть однослойными или двухслойными (усиленными, для обеспечения требуемой жесткости) (рис. 2).

Как показывает производственный опыт, наиболее приемлемым способом получения отмеченных элементов является гидродинамическая штам-

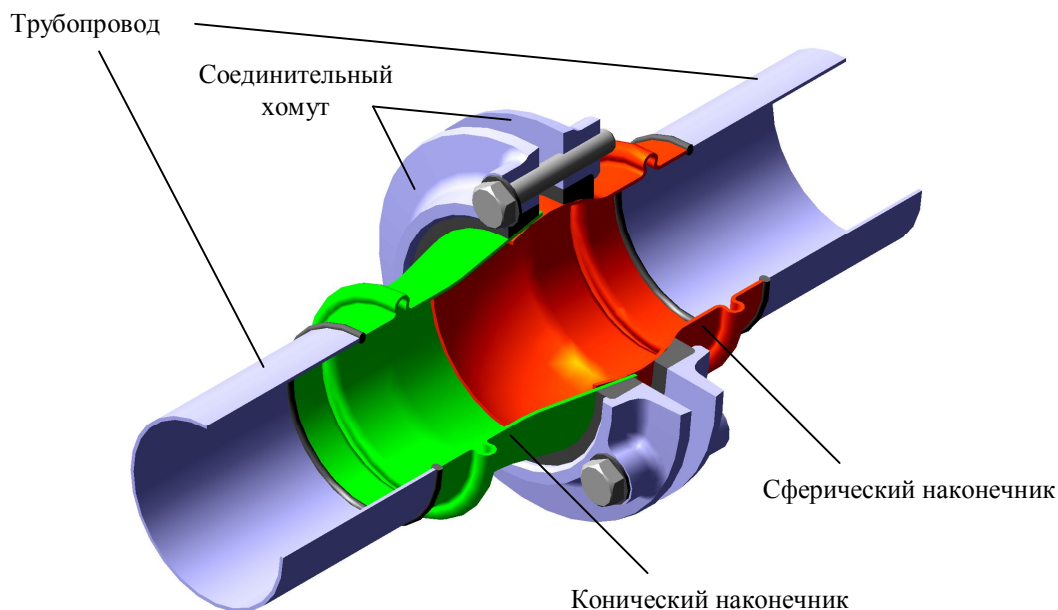


Рис. 1. Конструкция соединения сфера-конус

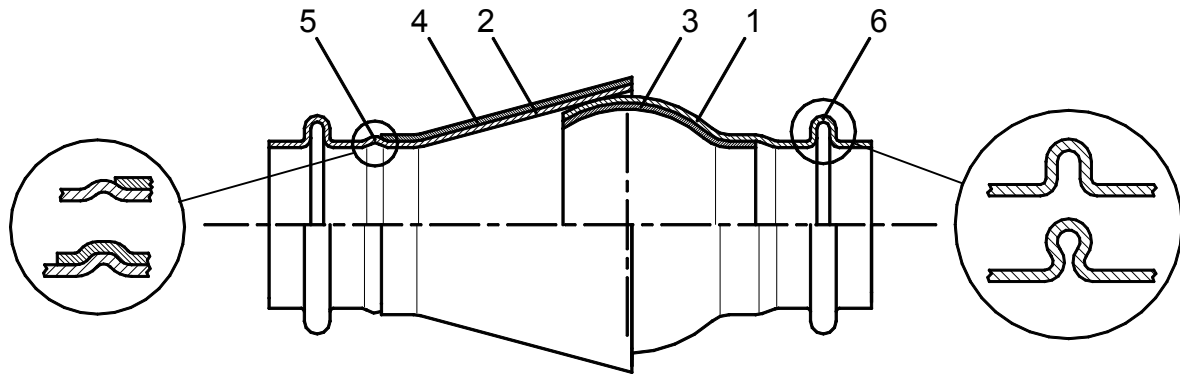


Рис. 2. Усиленное соединение сфера-конус высокоресурсного трубопровода:

- 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

повка (ГДШ). Так для самолетов Ан-22, Ан-72, Ан-74, Ан-124, Ан-225, Ан-70 и Ан-140 с помощью рассматриваемых технологий изготавливается более сотни типов различных изделий [1 – 3].

При создании соединений такого типа с использованием методов ГДШ (рис. 3) возникает необходимость решения задач, которые по постановке и методам решения существенно отличаются друг от

друга [4]:

- оформление основного контура сферических и конических оболочек;
- оформление элементов взаимной фиксации и компенсаторов;
- калибровка сферических и конических оболочек.

При штамповке деталей из тонкостенных заготовок оптимальным следует считать такое нагружение

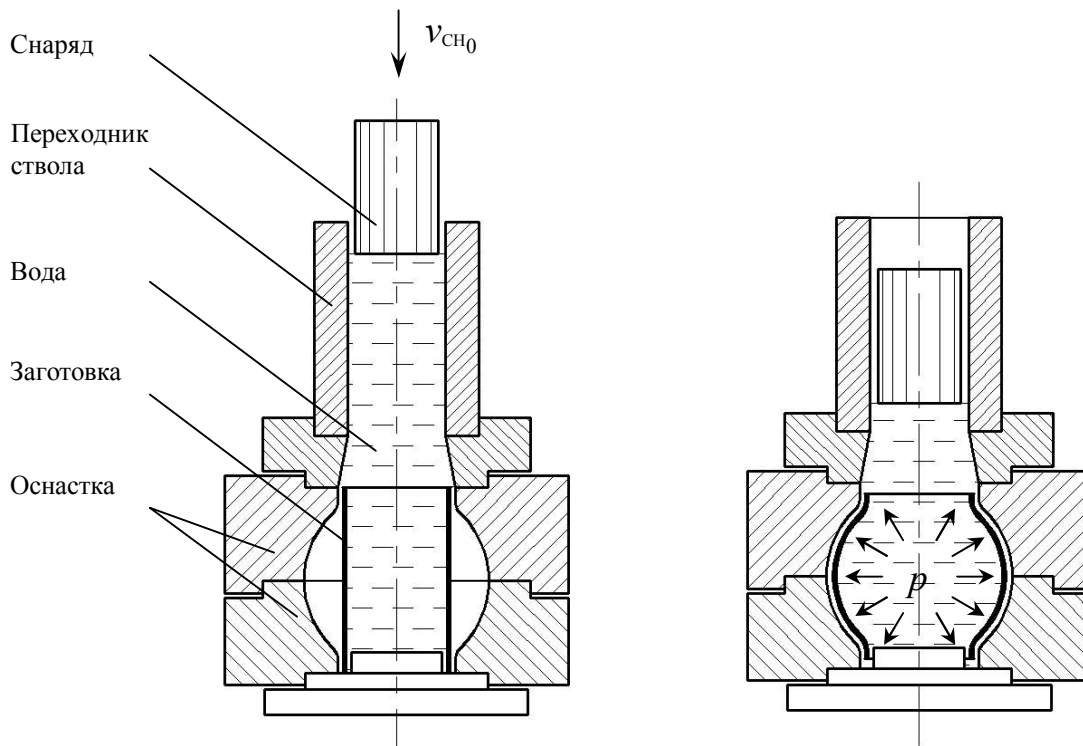


Рис. 3. Схема гидродинамической штамповки

рабочим импульсом давления, когда при оформлении основного контура детали заготовка подходит к матрице с минимальной скоростью, а затем происходит оформление элементов рельефа и калибровка давлением более высокой интенсивности. На практике создание таких условий нагружения невозможно, поэтому обычно штамповку деталей производят за несколько переходов, первые из которых являются формообразующими, а последний – калибровочным.

В подобных процессах можно считать рациональным разделение операции формообразования на переходы по характерным отличительным признакам. Так, для оформления основного (генерального) контура оболочки необходимо реализовать нагружение как можно более плавное, приближающееся к статическому. Этого можно достичь увеличением массы снаряда и снижением его скорости, что приводит к увеличению длительности нагружения и деформирования заготовки; при этом скорость ее перемещения уменьшается, что приводит к снижению влияния инерционных сил, уменьшается разнотолщинность оболочки, понижается опасность потери устойчивости. Уменьшается влияние волновых явлений в передающей среде на характер деформирования заготовки, повышается КПД процесса штамповки. Снижается скорость соударения заготовки с поверхностью матрицы, не искажается геометрия оболочки, обладающая малой жесткостью. Снижается нагрузка на оборудование, повышается стойкость оснастки [5, 8].

Для реализации процесса формообразования компенсаторов и элементов взаимной фиксации (рифты, пуклевки и т.д.), как элементов оболочки, обладающих большей жесткостью, требуется импульс давления более высокой интенсивности.

При калибровке, где перемещения оболочки ничтожно малы, требуется жесткий остродинамичный импульс, обеспечивающий калибровочное усилие, что достигается снижением массы снаряда

и увеличением его скорости. В этом случае оболочка должна соударяться с поверхностью матрицы с предельной скоростью, для уменьшения величины пружинения.

В статье рассматривается процесс формообразования основного (генерального) контура элементов соединения сфера-конус на примере внешней оболочки сферического наконечника (рис. 4) [3].

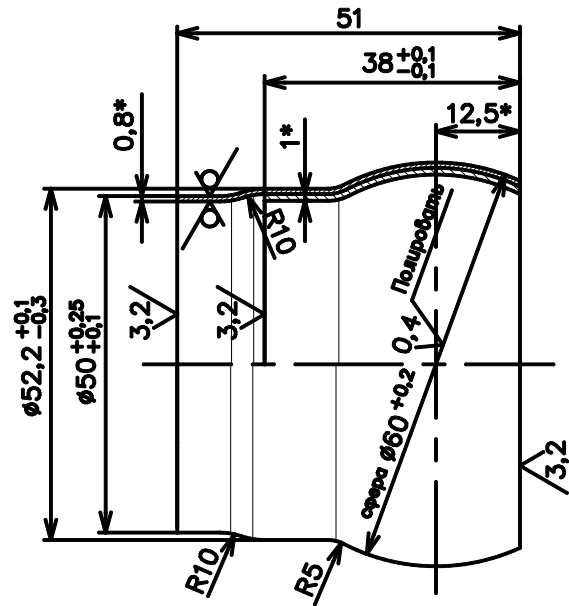


Рис. 4. Исследуемое изделие: внешняя оболочка наконечника сферического АНУ.7400.001.011 (типичная деталь)

Как показывают результаты экспериментальных исследований и опыт промышленного внедрения методов гидродинамической штамповки [5], характер нагружающего импульса давления жидкости, действующего на заготовку в формующей камере, при оформлении основного контура оболочки можно аппроксимировать функцией $p = p(t)$ и представить в виде синусоидального закона (рис. 5) [6]:

$$p = p_{max} \cdot \sin\left(\frac{\pi t}{t_{max}}\right), \quad (1)$$

где p_{max} – максимальное давление;

t_{max} – продолжительность импульса давления;

p, t – текущие значения давления и времени импульса.

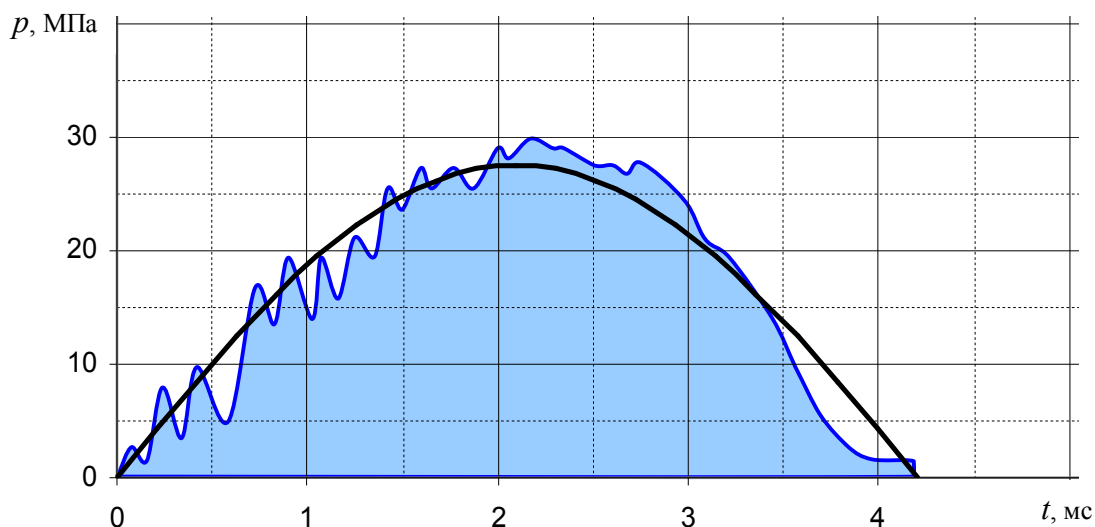


Рис. 5. Импульс давления в формующей камере и аппроксимирующая функция $p = p(t)$

Динамическое деформирование тонкостенных цилиндрических заготовок описывается геометрическими и физическими нелинейными уравнениями теории тонких оболочек с использованием теории пластического течения с изотропным упрочнением, решение которых в аналитическом виде не представляется возможным.

Благодаря развитию численных методов и появлению мощной вычислительной техники в настоящее время представляется возможным решение данного класса нелинейных задач, учитывающих геометрическую и физическую нелинейности, а также контактное взаимодействие. Исследование динамического поведения рассматриваемой оболочки проведено в системе инженерного анализа ANSYS.

Объектом исследования является цилиндрическая заготовка (диаметр $d = 50$ мм, длина $l = 80$ мм, толщина $\delta = 0,8$ мм), изготовленная из титанового сплава ПТ7М, имеющего следующие физико-механические характеристики: плотность $\rho = 4500$ кг/м³, предел текучести $\sigma_T = 460$ МПа, предел прочности $\sigma_B = 580$ МПа, модуль упругости $E = 1,12 \cdot 10^{11}$ Па, коэффициент Пуассона $\mu = 0,37$, модуль упрочнения $H = 0,6 \cdot 10^9$ Па. Поскольку при формообразовании сферического наконечника имеет место процесс глубокого пластического деформирования, то для описания поведения материала

задана кривая деформирования материала. В системе ANSYS данная кривая описывается билинейной моделью с изотропным упрочнением [9].

Учитывая геометрическую и силовую симметрию решаемой задачи, для моделирования процесса

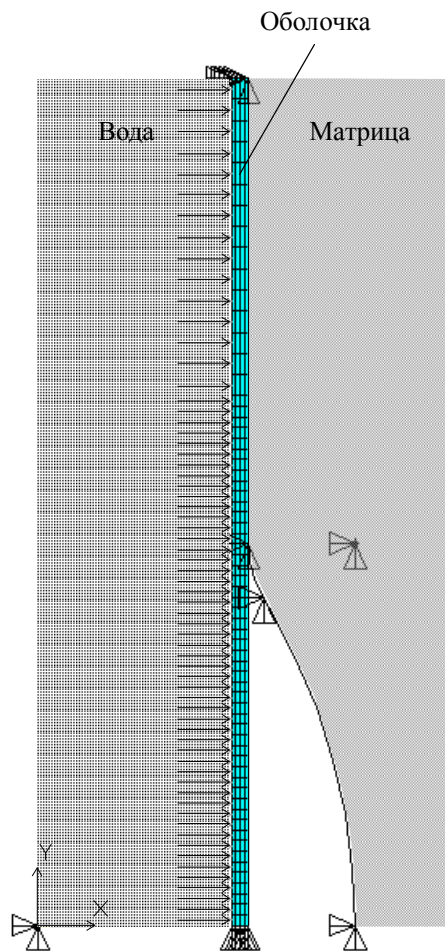


Рис. 6. Конечно-элементная модель

была выбрана осесимметричная модель (рис. 6), заданные граничные условия соответствуют процессу штамповки заготовки со свободными торцами.

Следует отметить, что технологическая схема формообразования подобных оболочек может быть: штамповка со свободными, защемленными или подпираемыми торцами заготовки. Производственный опыт показывает, что наиболее рациональным является формообразование со свободными торцами, так как утонения стенки заготовки существенно меньше, чем при деформировании с защемленными торцами; реализация процесса и штамповая оснастка значительно проще, чем при схеме, соответствующей штамповке с подпираемыми торцами.

Конечно-элементная модель состоит из 260 2-D 4-х узловых элементов твердого деформируемого тела PLANE182. Для моделирования контакта заготовки с поверхностью матрицы выбрана контактная модель “rigid-to-flexible”. Выбор данной модели объясняется тем фактом, что жесткость матрицы гораздо выше, чем жесткость деформируемой заготовки, что характерно для широкого класса технологических задач, поэтому деформацией матрицы можно пренебречь. Для описания контактного взаимодействия заготовки с матрицей использована контактная модель “поверхность в поверхность” с учетом кулоновского трения в процессе контактного взаимодействия, реализованная через элементы TARGE169 и CONTA171 в системе ANSYS [10].

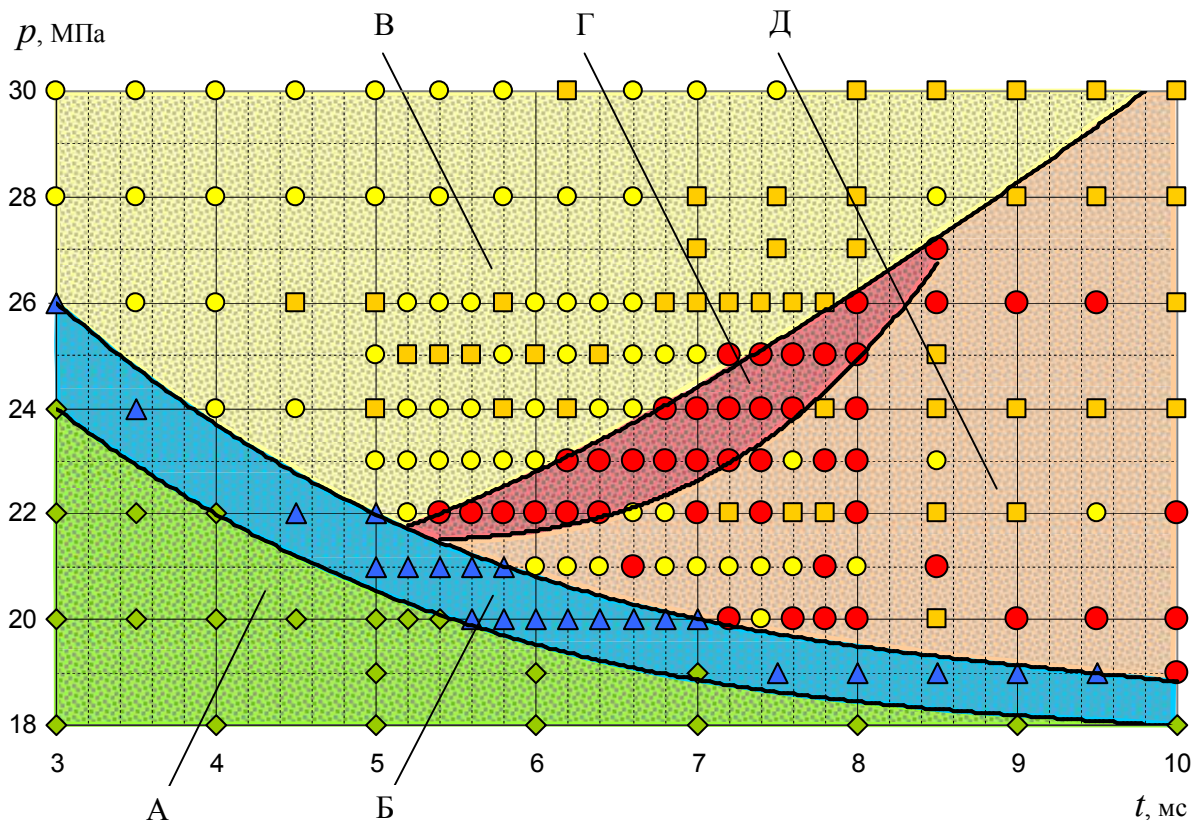


Рис. 7. Исследуемая область процесса гидродинамической штамповки при оформлении основного контура сферического наконечника:

- ◆ – нет контакта оболочки с поверхностью матрицы;
- ▲ – неполный контакт оболочки с поверхностью матрицы;
- – искажение формы оболочки от удара о поверхность матрицы и от влияния инерционных сил;
- – знакопеременные изменения деформаций оболочки (гиб, разгиб) с последующим наложением на матрицу;
- – качественная сферическая оболочка

Исследуемая область определена параметрами прикладываемого импульса давления:

- величиной максимального давления p_{\max} ;
- продолжительностью импульса t_{\max} ,

характеризующими нагружающее воздействие на заготовку согласно соотношению (1). Моделированию было подвержено порядка 200 процессов, путем варьирования значениями p_{\max} и t_{\max} , с определенным шагом (рис. 7):

$$18 \cdot 10^6 \text{ Па} \leq p_{\max} \leq 30 \cdot 10^6 \text{ Па};$$

$$3 \cdot 10^{-3} \text{ с} \leq t_{\max} \leq 10 \cdot 10^{-3} \text{ с}.$$

Указанный диапазон значений p_{\max} и t_{\max} определен на основании экспериментальных данных, согласно которым:

- избыточное давление при деформировании маложестких оболочек искажает их форму и увеличивает нагрузку на штамповую оснастку;
- недостаточное давление не приводит к требуемым пластическим деформациям материала;
- при сокращении продолжительности импульса существенное негативное влияние на процесс глубокого деформирования оказывают волновые процессы, протекающие в жидкости;
- при увеличении продолжительности импульса характер нагружения приближается к статическому, что в случае гидродинамической штамповки сопряжено с существенными энергетическими потерями через зазоры, так как утрачивается смысл гидродинамичности, обусловленный самопроизвольным запирианием случайных и конструктивных зазоров кратковременным импульсом давления жидкости высокой интенсивности.

Результаты проведенных исследований (рис. 7, 8) позволили установить, что по характеру деформирования тонкостенных осесимметричных оболочек (оформление основного контура) конечный результат можно условно разделить на пять возможных вариантов [7]:

1. Отсутствие контакта оболочки с поверхностью матрицы, ввиду низких энергетических параметров импульса давления и, как следствие, малые деформации, возможны случаи, где деформации заготовки не превышают пределов упругой области (рис. 7, область А, рис. 8, а, е);

2. Неполный контакт оболочки с поверхностью матрицы, так же по причине недостаточной энергоемкости импульса, т.е. заданные параметры давления (или продолжительности импульса) хотя и выше, чем в предыдущем случае, но все равно недостаточны для достижения требуемых деформаций по всей длине заготовки (рис. 7, область Б, рис. 8, б, ж);

3. Параметры нагружения, обеспечивающие необходимое, а также плавное деформирование и “мягкий” контакт (малая скорость соударения) оболочки с поверхностью матрицы, т.е. параметры, которые, как отмечалось ранее, при оформлении основного контура оболочки являются рациональными (рис. 7, область Г, рис. 8, в, з);

4. Нагружающее воздействие, приводящее к высокой скорости соударения заготовки с рабочей поверхностью матрицы с последующим ее отскоком, что приводит к искажению формы оболочки; существенны негативные влияния инерционных сил на процесс формообразования (рис. 8, г, и);

5. Импульсное воздействие, как и в предыдущем случае, приводит к высоким скоростям деформирования, удару, отскоку, искажению формы оболочки, но избыточное нагружающее усилие позволяет повторно наложить оболочку на матрицу; перемещение заготовки сопровождается образованием зон, где оболочка подвергается знакопеременным изгибным деформациям (гиб, разгиб), это отрицательно сказывается на ресурсных характеристиках готового изделия, что немаловажно, так как речь идет об изделии как элементе высокоресурсного трубопровода (рис. 8, д, к).

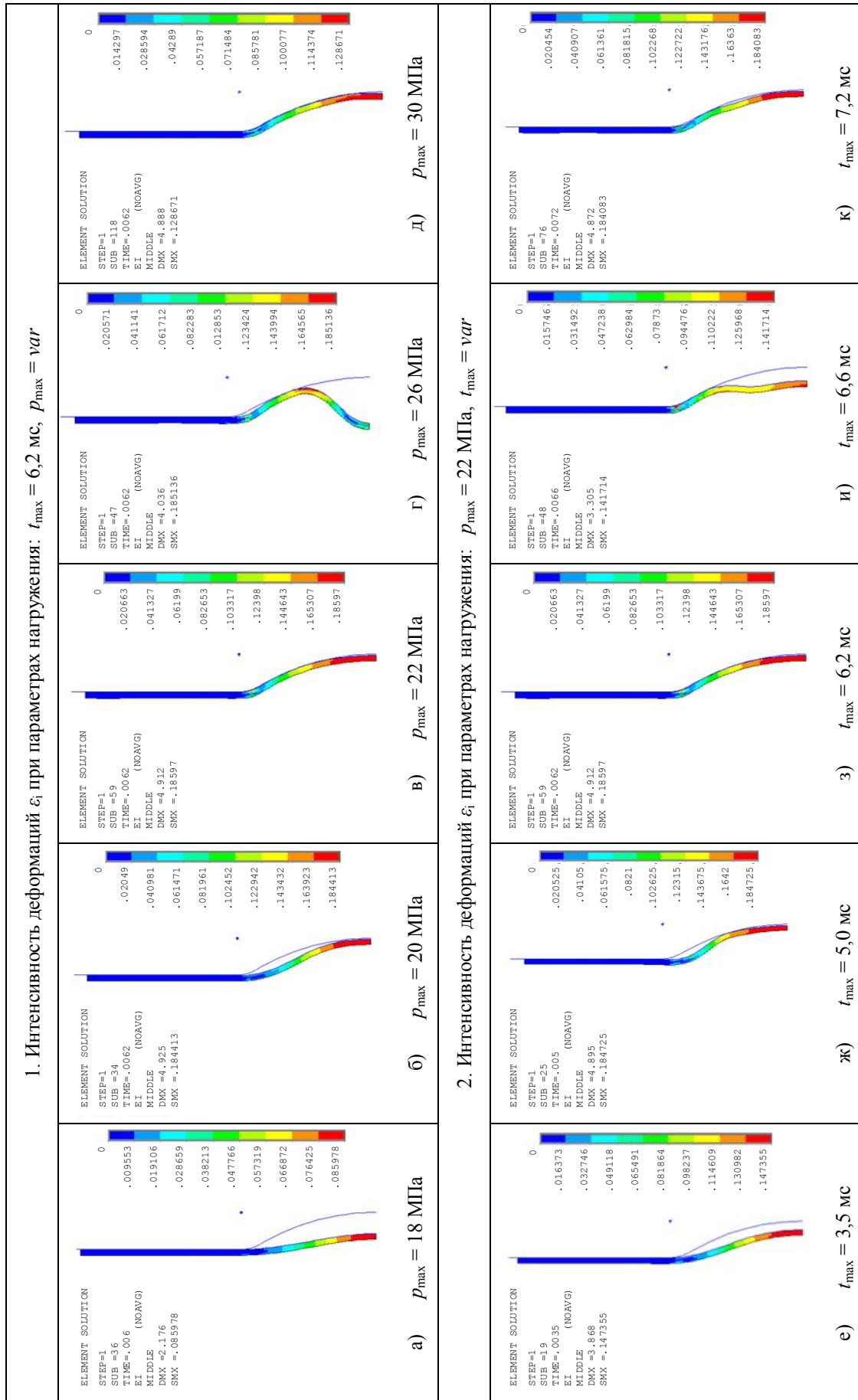


Рис. 8. Возможные варианты конечного результата формообразования (интенсивность деформаций ϵ) при импульсном нагружении тонкостенной осесимметричной оболочки на этапе оформления основного контура

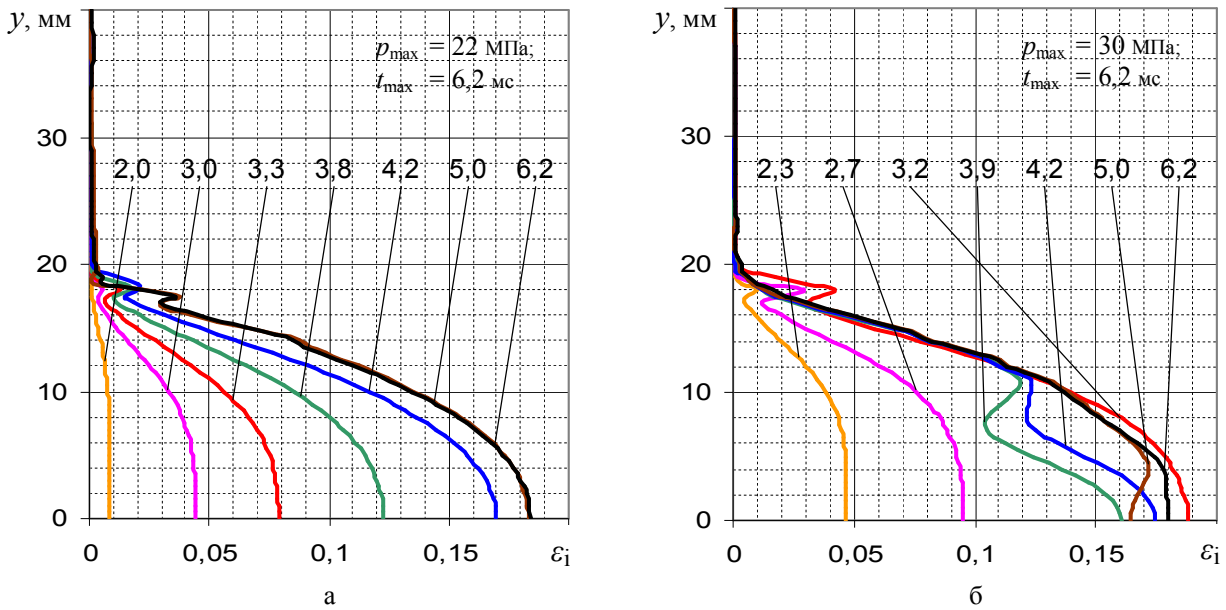


Рис. 9. Интенсивность деформаций ε_i оболочки в различные моменты времени (10^{-3} с):
а – при рациональных; б – нерациональных параметрах нагружения

Из рис. 7 видно, что область В соответствует параметрам нагружения, где вообще не достигается приемлемое решение по причине либо существенных инерционных сил, либо избыточной энергии импульса. Область Д является зоной доверительных решений, как положительных, так и отрицательных, носящих случайный (непредсказуемый) характер.

Следует отметить, что при 3 и 5-м варианте нагружения (рис. 8, в,з и рис. 8, д, к соответственно) конечный результат одинаков: оболочка по-

вторяет форму рабочей поверхности матрицы, однако сам процесс достижения конечного результата (история формообразования) различен. На рис. 9 отчетливо видно, что при 3-м (рациональном) варианте нагружения (рис. 9, а) заготовка деформируется плавно, после контакта с матрицей ее движение прекращается. При характере нагружения, соответствующему 5-му варианту (рис. 9, б), процесс формообразования сопровождается избыточными (излишними) энергозатратами, что и приводит к перемещению заготовки

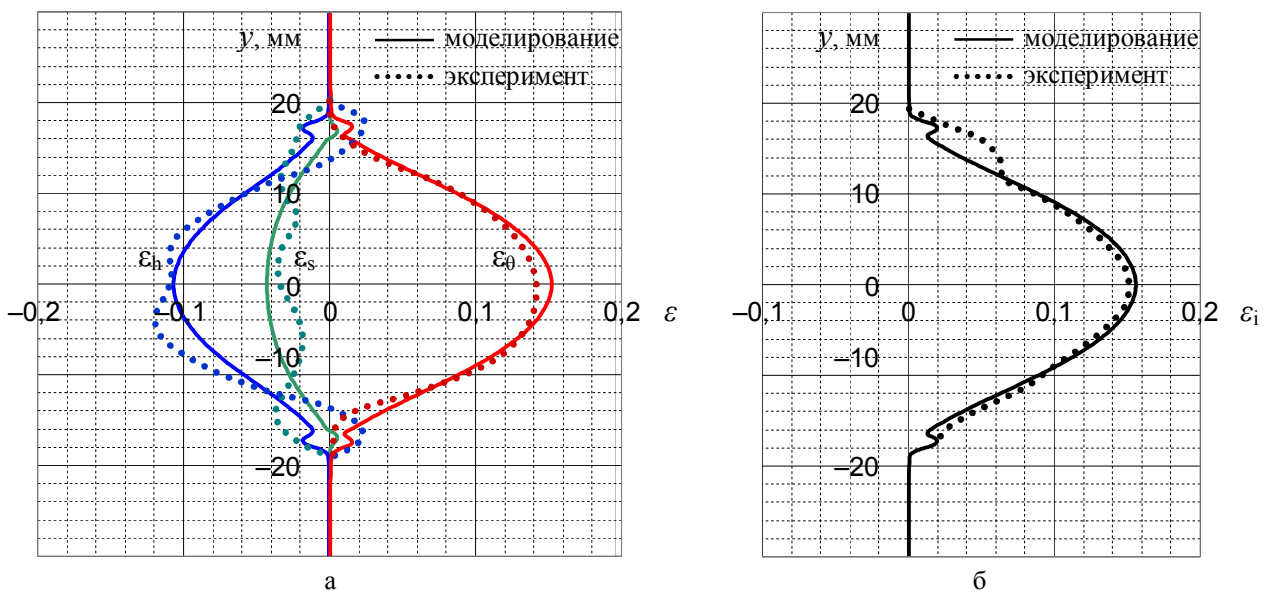


Рис. 10. Значения деформаций сферической оболочки при моделировании и эксперименте:
а – компоненты деформаций; б – интенсивность деформаций

“к матрице-от матрицы-к матрице”, т.е. вариант 5 не является рациональным, как по критерию качества готового изделия, так и по критерию минимума энергозатрат, минимума нагрузки на штамповую оснастку и т.д.

Соотношение результатов моделирования исследуемых в системе ANSYS процессов с экспериментальными данными [1] представлены на рис. 10, где видно, что отклонения результатов численного решения от эксперимента по величинам ε_0 и ε_1 незначительны. Различия в значениях по компонентам деформаций ε_s и ε_n при моделировании и эксперименте объясняются тем, что в расчетной модели не учтены силы трения оболочки при контакте с поверхностью матрицы.

Проведенные исследования процесса гидродинамической штамповки сферического наконечника на этапе оформления основного (генерального) контура позволили определить влияние энергетических параметров нагружающего импульса на процесс формообразования оболочки, установить характерные области возможных результатов (рис. 7), определить область рациональных (рекомендуемых) параметров нагружения p_{\max} и t_{\max} (рис. 7, область Г), обеспечивающих технологю получение качественного изделия. Расчетную модель численного определения НДС тонкостенных осесимметричных оболочек в данной постановке можно считать приемлемой для решения подобных технологических задач.

Литература

1. Мильченко Е.И. Исследование, разработка и внедрение технологических процессов изготовления высокоресурсного осеботонкостенного титанового трубопровода воздушных систем ЛА: Дис. ... канд. техн. наук. – Х.: ХАИ, 1981. – 149 с.
2. Кривцов В.С., Брагин А.П., Мельничук А.П. Анализ некоторых результатов научных и производственных исследований процессов гидродинамической штамповки элементов трубопроводов воздушных систем самолетов // *Авиационно-космическая техника и технология*. – Х.: НАКУ “ХАИ”. – 2003. – Вып. 38. – С. 6–13.
3. Разработка и внедрение технологии формообразования деталей сложной конфигурации на пресс-пушке: ПП11М. Научно-технический отчет о НИР / № 56750. – Х.: ХАИ, 1984. – 23 с.
4. Кривцов В.С., Мельничук А.П. Особенности описания деформирования тонкостенных цилиндрических деталей при гидродинамической штамповке // *Авиационно-космическая техника и технология*. – Х.: НАКУ “ХАИ”. – 2001. – Вып. 25. – С. 28–34.
5. Мацукин Ю.Г. Исследование гидродинамической штамповки на пресс-пушке: Дис. ... канд. техн. наук. – Х.: ХАИ, 1966. – 223 с.
6. Мельничук А.П. Определение параметров импульса давления при гидродинамической штамповке осесимметричных тонкостенных оболочек // *Вопросы проектирования и производства конструкций летательных аппаратов*. – Х.: НАКУ “ХАИ”. – 2004. – Вып. 36. – С. 108–114.
7. Мельничук А.П., Светличный С. П. Исследование процессов гидродинамической штамповки тонкостенных осесимметричных элементов высокоресурсного трубопровода воздушных систем летательных аппаратов // *Сборник трудов 4-й конференции пользователей программного обеспечения CAD-FEM GmbH (Москва, 21–22 апреля 2004 г.)*. – М.: Полигон-пресс. – 2004. – С. 144–150.
8. Родько С.Я. Исследование, разработка и внедрение процессов гидродинамического формообразования тонколистовых деталей летательных аппаратов: Дис. ... канд. техн. наук. – Х.: ХАИ, 1985. – 238 с.
9. ANSYS 5.7.1 Online Documentation. Structural Analysis Guide. Chapter 8. Nonlinear Structural Analysis. 8.3. Modeling Material Nonlinearities.
10. ANSYS 5.7.1 Online Documentation. Element Reference. Element Library.

Поступила в редакцию 05.04.2004

Рецензент: канд. техн. наук, доцент, С.А. Полтарушников, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского “ХАИ”, Харьков.