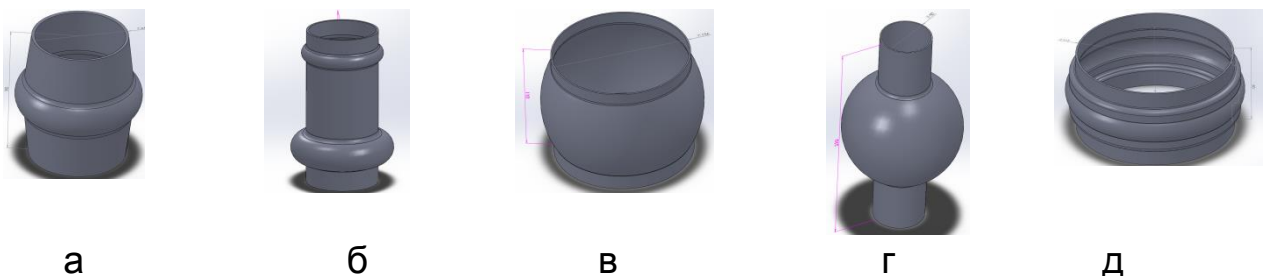


УДК 621.982:669.295

В.В. Борисевич, канд. техн. наук,  
Абухабел Мохамед Абубакер,  
А.С. Морголенко, канд. техн. наук

## ФОРМООБРАЗОВАНИЕ ПОПЕРЕЧНЫХ ГОФРОВ ПРИ ШТАМПОВКЕ ТОНКОСТЕННЫХ ДЕТАЛЕЙ ИЗ ТРУБЧАТЫХ ЗАГОТОВОК

Анализ отказов и неисправностей, выявленных при эксплуатации летательных аппаратов, показал, что их надежность в большой степени определяется ресурсом жидкостно-газовых, и в частности трубопроводных, систем [1]. Наиболее распространенными их неисправностями являются нарушение герметичности из-за дефектов соединений, механическое повреждение и коррозионное разрушение трубопровода [2]. Основными причинами разрушения трубопроводов являются высокий уровень изгибных колебаний и наличие значительных монтажных неточностей в соединениях. Значительно снизить разрушающее влияние боковых и продольных растягивающих усилий переменного характера позволяет применение унифицированных гофрированных соединительных элементов. Примеры подобных элементов приведены на рис. 1.



а

б

в

г

д

Рисунок 1 – Предлагаемая классификация деталей трубопроводов с элементами типа «гофр»: а – деталь компактной формы с локализованным гофром; б – гофр в виде локального элемента вытянутой формы; в – гофр как преобладающий элемент; г – гофр как часть сферической формы; д – гофры сложной формы с размерами близкими к толщине заготовки

Для авиастроения традиционно актуальным является уменьшение веса при одновременном повышении прочности конструкции, а также сокращение времени на капитальный ремонт воздушных судов. Эту задачу решают применением быстроразъемных соединений, реализованных посредством наконечников из высокопрочных сплавов. Преимуществами данных соединений являются быстрота, удобство и легкость при многократном монтаже трубопровода, его ремонте или частичной замене.

Надежность трубопроводных магистралей и соединяющих их элементов во многом определяется процессом их изготовления, потому что на этом этапе закладываются эксплуатационные характеристики изделия [3]. Для производства наконечников существует ряд различных способов их формообразования, имеющих как преимущества, так и недостатки применительно к ограничивающим геометрическим характеристикам деталей.

В настоящее время в заготовительно-штамповочном производстве для формообразования наконечников тонкостенного трубопровода применяют такие способы:

- штамповка взрывом;
- гидромеханический;
- электрогидравлическая штамповка;
- ударная штамповка;
- механическая формовка роликами на давальных станках;
- штамповка в состоянии сверхпластичности;
- штамповка эластичными средами с применением осевой осадки.

Штамповка эластичными средами с применением осевого сжатия при изготовлении элементов типа «гофр» из титановых сплавов имеет ряд преимуществ перед рассмотренными выше способами формообразования. Во-первых, нет необходимости в сложной и трудоемкой операции герметизации торцов заготовки. Во-вторых, эластичная среда позволяет создавать благоприятные схемы нагружения и напряженно-деформированное состояние заготовок в процессе формообразования без дополнительного оборудования, регулирующего давление. В-третьих, эластомер, используемый в качестве пуансона, создает между собой и внутренней поверхностью трубной заготовки полезное трение, способствующее затягиванию материала полуфабриката в ручей матрицы. Кроме того, формообразование производится на широкопространенных гидравлических прессах вместо пороховых пушек [4].

В то же время для получения подобных деталей были рассмотрены операции обжима трубчатых заготовок. Такие операции могут быть выполнены на ротационно-обжимной машине (редуцирование), путем обжимки полых деталей и с помощью приложения вертикального давления на механических прессах. Обжимка применяется при изготовлении толстостенных конических ступенчатых деталей из отрезков труб. Обжимка осуществляется путем давления на торец заготовки и заталкивания ее в коническое отверстие матрицы. Предельная деформация при обжимке труб ограничивается потерей устойчивости заготовки, что име-

ет место при  $t/d \leq 0,025$ , где  $d$  – средний диаметр трубы,  $t$  – толщина стенки [4].

Что касается потери устойчивости, то нами предпринята попытка использования данного явления для набора материала в месте, где предполагается формообразование элемента «типа» гофр. В работе [3] автором постулировалось незначительное подкрепляющее влияние внутреннего давления на устойчивость замкнутых цилиндрических панелей при совместном воздействии осевого нагружения и внутреннего давления. Кроме того, было исследовано влияние различных путей нагружения путем чередования осевой нагрузки и внутреннего давления, что продемонстрировало небольшую зависимость устойчивости оболочки от пути нагружения.

Из всего многообразия тонкостенных деталей, изготавливаемых из трубчатых заготовок (рис. 1), можно выделить детали (рис. 1, а), толщина которых лежит в пределах 1...2,5 мм, изготовленных из легированных сталей и титановых сплавов, имеющих достаточно компактную форму (отношение высоты к диаметру не превышает 2,5), и включающих в себя поперечный гофр, форма которого не является преобладающим элементом общей формы детали, т. е. является локальным элементом формы. Высота такого отдельного элемента не составляет более 15% от общей высоты детали, а радиус кривизны сопоставим с толщиной заготовки и лежит в пределах 3–20 $t$ .

Предполагается, что выделенный класс деталей может быть получен предлагаемым способом, а именно за счет предварительного набора материала в зоне гофра за счет локальной симметричной потери устойчивости.

В данной работе предлагается новый способ получения гофрированных изделий из трубчатых заготовок, совмещающий схемы формообразования данного элемента с помощью раздачи, при этом для набора материала используется явление симметричной локальной потери устойчивости вследствие приложения осевой нагрузки на торец заготовки при одновременном проталкивании трубчатой заготовки в отверстие матрицы. При этом основной целью являлось получение местной раздачи в форме гофра, тогда как редуцирование использовалось не как формообразующая, а как калибровочная операция. На рис. 2 изображена схема процесса, где  $P_1$  – осевое давление на торец заготовки, создаваемое жестким пуансоном;  $P_2$  – внутреннее давление, создаваемое путем сжатия полиуретановой пробки.

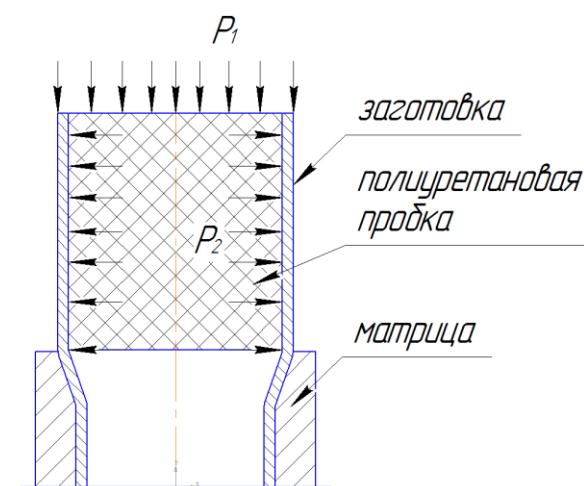


Рисунок 2 – Схема процесса комбинированного редуцирования-раздачи трубчатой заготовки

В целях проверки принятых допущений было смоделировано редуцирование трубчатой заготовки в комбинации с действием внутреннего давления. Были приняты следующие допущения

Материал принят изотропным, упруго-пластическим билинейно упрочняющимся. Заданы плотность, модуль упругости, коэффициент Пуассона, объемный модуль и модуль среза. Для модели пластичности задавались предел текучести и касательный модуль.

Материал штампа и пуансона принят жестким. Разбиение на конечные элементы (КЭ) задавалось минимальной длиной ребра элемента равной 0,5 мм с целью уточнения сетки КЭ по толщине заготовки, равной 2 мм. Высота заготовки равна 90 мм, диаметр 38 мм. На рис. 3 представлена схема разбиения модели на сетку КЭ.

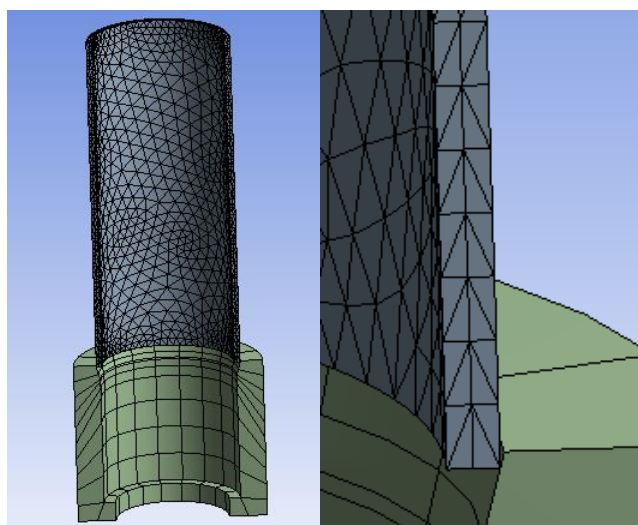


Рисунок 3 – Схема разбиения заготовки на конечные элементы

На рис. 4 представлены результаты моделирования потери устойчивости при воздействии продольной нагрузки. Потеря устойчивости происходит локально в виде несимметричного выпучивания.

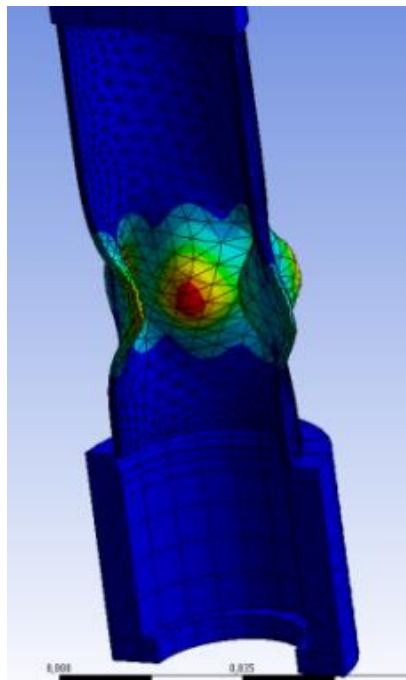


Рисунок 4 – Потеря устойчивости по типу несимметричного выпучивания

На рис. 5 представлена потеря устойчивости при воздействии продольной нагрузки, на рис. 6 – при совместном воздействии продольной и внутренней переменной нагрузок.

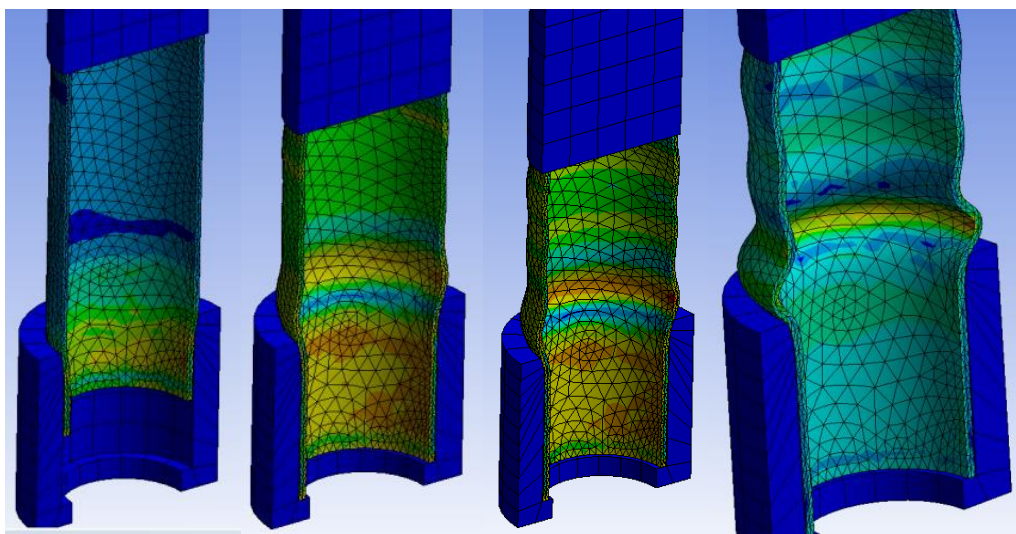


Рисунок 5 – Потеря устойчивости по типу симметричного выпучивания при воздействии продольной нагрузки

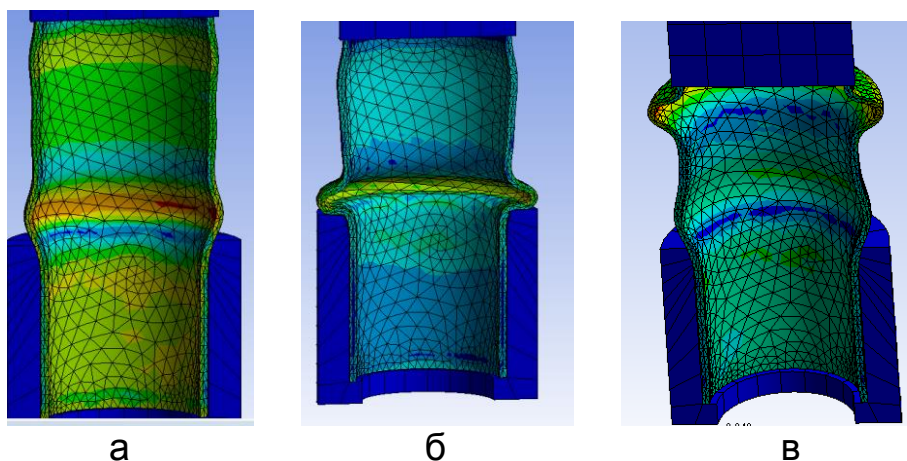


Рисунок 6 – Потеря устойчивости при различном внутреннем давлении: а – 2 МПа; б – 5 МПа; в – 10 МПа

Для подтверждения результатов моделирования были проведены экспериментальные исследования нагружения заготовки аналогичных размеров. Заготовку устанавливали на матрицу и подвергали продольной нагрузке. На рис. 7 показан результат редуцирования цилиндрического образца диаметром 38 мм и толщиной 2 мм из стали 30ХГСА.



Рисунок 7 – Результат экспериментальной проверки редуцирования цилиндрического образца

### Выводы

1. Комбинированная операция редуцирования-раздачи с помощью одновременного приложения осевой нагрузки и внутреннего давления смоделирована с помощью системы конечно-элементного анализа. В данной симуляции использован последовательный анализ пластического деформирования с последующим использованием результатов для моделирования потери устойчивости за пределами упругости.

2. В результате моделирования процесса потери устойчивости цилиндрической оболочки за пределами упругости обнаружена значимая зависимость образования симметричного выпучивания от приложенного внутреннего давления. Влияет как величина давления, так и порядок его приложения.

3. Данная особенность влияния внутреннего давления, как на величину гофра, так и на его локализацию позволяет предположить о возможности использования данного явления для регулирования параметров процесса.

4. Проведены пробные эксперименты, дающие основания полагать возможность получения элемента трубчатой детали типа «гофр» с помощью комбинированной операции редуцирования трубчатой заготовки и потери устойчивости с формообразованием симметричного выпучивания, что может быть использовано для предварительного набора материала. Сравнивая численный и натурный эксперименты, можно сделать вывод о приемлемом качественном и количественном совпадении результатов экспериментов.

Полученный результат позволяет спланировать дальнейшие опыты, которые позволят сформулировать более конкретные рекомендации для получения рациональных параметров технологического процесса формообразования гофрированных осесимметричных деталей.

### **Список использованных источников**

1. Болотин, В. В. Ресурс машин и конструкций [Текст]: моногр. / В. В. Болотин. - М.: Машиностроение. 1990. – 447 с.
2. Смирнов, Н.Н. Надежность и эксплуатационная технологичность летательных аппаратов [Текст]: моногр. / Н.Н. Смирнов, А.А. Ицкович, Ю.М. Чинючин, В.С. Космынин.– М.: Моск. ин-т инж. гражд. авиации. 1989. – 168 с.
3. Тарасов, Ю. Л. Надежность элементов конструкций летательных аппаратов [Текст]: моногр. / Ю. Л. Тарасов, Э. И. Миноранский, В. М. Дуплякин. – М.: Машиностроение. 1992. – 223 с.
4. Исаченков, Е. И. Штамповка резиной и жидкостью [Текст]: моногр./ Е. И. Исаченков. – М.: Машиностроение, 1967. – 367 с.
5. Романовский, В.П. Справочник по холодной штамповке [Текст]: / В.П. Романовский. – Л.: Машиностроение, 1979. – 520 с.
6. Вольмир, А. С. Устойчивость деформируемых систем [Текст]: моногр. / А. С. Вольмир. – М.: Наука, 1967. – 984 с.

*Поступила в редакцию 12.02.2016.*

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