

Исследование процесса вытяжки для получения сферообразных днищ

Проанализирован процесс вытяжки применительно к изготовлению крупногабаритных сферических днищ на производстве. Приведены этапы компьютерного моделирования в программном продукте QForm для исходной заготовки из алюминиевого сплава 1580 толщиной 1,5 мм и диаметром 426,9 мм с указанием основных параметров процесса – модели материала, механических характеристик материала заготовки, типа элементов, кинематических нагрузок, условий контактного взаимодействия элементов и т. д. Установлено распределение толщины на сферической части поверхности днища. Использован комплексный метод, включающий сравнение результатов, полученных в экспериментальном штампе и при моделировании.

Е.Г. ДЕМЬЯНЕНКО,
д-р техн. наук,
Ю.С. ОХАПКИН,
аспирант
(Самарский университет,
Самара)
yura_ohapkin.63@mail.ru

Вытяжка, сферообразное днище, QForm, моделирование, толщина, гофрообразование

Разработка высокотехнологичных ракет-носителей нового поколения различных классов (сверхлегкие, легкие, средние, тяжелые повышенной грузоподъемности, сверхтяжелые) направлена на использование экологичного топлива, перспективных материалов, многоазовых ступеней и других проектных решений. Важным конструктивным элементом являются длинномерные баки горючего и окислителя, обеспечивающие функционирование ракетносителей. Конструкция баков выполняется из оболочек различного вида – цилиндрических стенок и днищ, представляющих собой сферические, полусферические, торосферические сегменты [1, 2]. Основными используемыми материалами в аэрокосмическом производстве являются алюминиевые сплавы АМгБМ и вновь внедряемые сплавы 1570, 1580.

Из-за высокой жесткости при минимальной массе и значительных габаритах к конструкции днищ баков предъявляются повышенные требования по точности геометрического контура, минимизации разнотолщинности детали, определяемой величиной утонения, отсутствию гофрообразования и упругой отдачи. Согласно данным требованиям необходимо равномерно распределять толщины по всей сферической части днища, учитывать количество технологических операций, рациональный раскрой материала, наличие уникального и специализированного оборудования [3, 4]. Для изготовления подобных днищ необходима сложная штамповая оснастка, производство которой связано с высокой трудоемкостью и затратами, что повышает себестоимость конечного изделия.

Объектом исследования является процесс вытяжки применительно к сферообразному днищу со следующими размерами: радиус сферы – 1500 мм, толщина – 13 мм, высота – 900 мм (рис. 1).

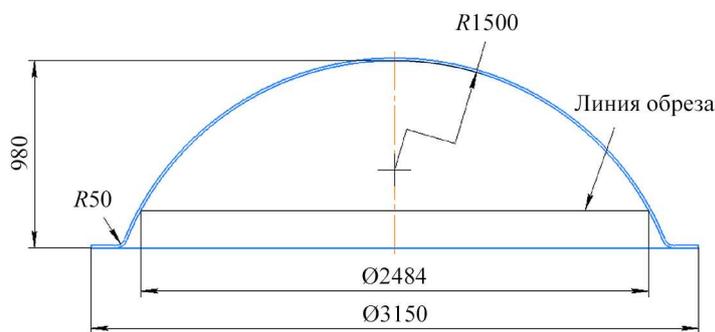


Рис. 1

При реализации технологий, основанных на процессах вытяжки, обжима, раздачи или их совмещения, деформация днищ происходит в условиях плоского разноименного напряженно-деформированного состояния, характеризующегося формированием сжимающих напряжений. Из-за сжимающих напряже-

ний, даже небольших, возможно гофрообразование. При выборе процесса вытяжки в качестве метода необходимо учитывать вероятность потери устойчивости заготовки между начальной и завершающей стадией вытяжки; вероятность появления складок, гофр, что недопустимо согласно требованиям, предъявляемым к днищам. Для изготовления и моделирования экспериментальной оснастки, определения ее габаритов был использован принцип подобия [5].

Чтобы экстраполировать лабораторные закономерности и полученные данные на реальные производственные условия, необходимо соблюдать подобие реализуемых процессов. Это подразумевает пропорциональность соответствующих размеров натурной системы и модели, при этом их отношение остается постоянной величиной. При проведении эксперимента на оборудовании элементы заготовки и оснастки приходят в движение. Все точки этих элементов при наличии геометрического подобия должны перемещаться по траекториям, подобным траекториям соответствующих точек реальной системы, проходя геометрически подобные пути. В этом случае добиваются подобия начальных и граничных условий натурной системы и модели. Предполагается, что начальное состояние и состояние на границах подобны, т. е. отношения основных параметров натурной системы и модели в начале процесса, на границах постоянны, и при пластическом деформировании в геометрически подобных системах сохраняются подобные деформации. Возникающие давления деформирования также будут равными, поскольку деформирование осуществляется в одинаковых условиях (одинаковы условия трения между соприкасающимися (контактными) поверхностями деформирующего инструмента и заготовки, химический состав, микро- и макроструктуры, фазовое состояние, степени упрочнения и разупрочнения). При проведении эксперимента используемая заготовка должна сохранять выбранное для натурной системы отношение $S_{\text{заг}}/D < 0,008$ (отношение толщины заготовки к ее большему диаметру), так как ее относительная толщина определяет склонность детали к гофрообразованию, что отражено в формулах теории обработки металлов давлением. В данном случае с учетом ГОСТ 21631-2023 [6] на алюминиевый сплав 1580 толщиной $S_{\text{заг}} = 1,5$ мм коэффициент масштабирования составит 8,67 (рис. 2).

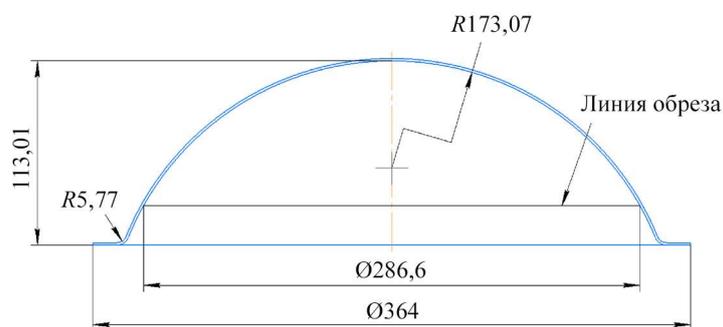


Рис. 2

Для проведения эксперимента была подготовлена цельная листовая заготовка толщиной $1,5_{-0,15}$ мм [6] без сварных швов диаметром 426,9 мм. Так как заготовка особо тонкостенная (выполнена в масштабе относительно реальных размеров), то в силу технологических трудностей провести сварку заготовки для модельного штампа практически невозможно из-за высокой вероятности образования деформаций сварных швов, пористости, шлака и трещин. В реальном производстве заготовка для крупногабаритного днища чаще всего изготавливается сваркой (сваркой трением с перемешиванием или аргонодуговой) из нескольких листовых заготовок.

Производственный эксперимент самый трудоемкий и длительный этап исследований. Благодаря использованию методов моделирования процессов формообразования в средах специализированных конечно-элементных программных комплексов (Deform, Nastran, Ls-Dyna, Solid Works Simulation, QForm, Siemens NX) возможно спрогнозировать реакцию металла на воздействие приложенных нагрузок и других допустимых условий деформирования. Моделирование значительно сокращает сроки разработки технологических процессов, время проектирования оснастки и проведения опытных работ. Пакет QForm

позволяет рассмотреть практически все процессы обработки металлов давлением – простую подгибку или осадку заготовки, сложную деформацию многослойных материалов или штамповку взрывом. При этом практически нет ограничений по размерам и формам заготовок, определяются все необходимые параметры (напряженно-деформированное состояние заготовки и инструмента в любой точке и любой момент времени, энергетические параметры процесса, величины усилий и моментов, нормальных и касательных сил, контактные параметры процесса и др.), что необходимо при разработке оптимального технологического процесса и его глубокого анализа. Это значительно расширяет области применения Qform [7–10].

Исходными данными для моделирования процесса вытяжки в программном комплексе QForm являются трехмерные геометрические модели вытяжного перехода или инструмента (пуансона и матрицы), свойства материала заготовки (модуль Юнга, коэффициент Пуассона, плотность, коэффициенты анизотропии, экспериментальная кривая деформирования), технологические параметры процесса (сила прижима заготовки, скорость движения пуансона, коэффициент трения между инструментом и заготовкой).

Геометрия основных рабочих частей (пуансон, прижим, матрица) и габариты заготовки строились с помощью САД-системы АСКОН «КОМПАС-3D» V21 (рис. 3).

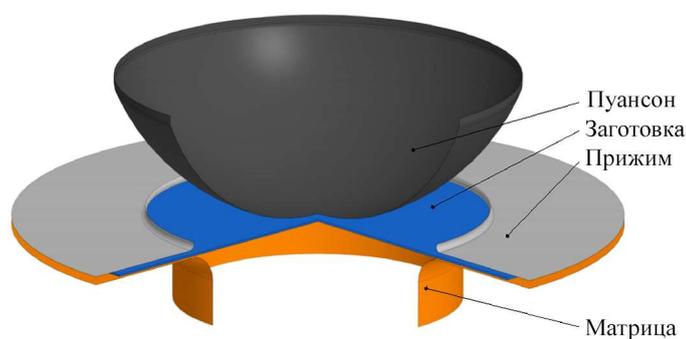


Рис. 3

Далее разработанную геометрию экспортировали, сохраняя в формате *.step. На рис. 4 представлена импортированная геометрия в препроцессор для QForm с созданием сетки.

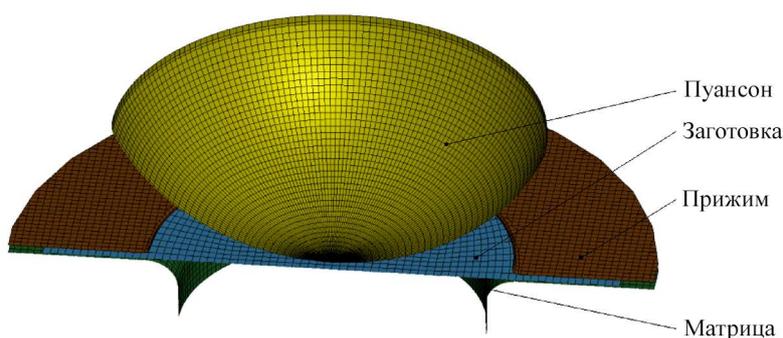


Рис. 4

Препроцессор автоматически разбивает STEP-модель на solid, shell и planar face тела. Матрице, прижиму и пуансону присвоены shell-элементы, solid-тела отсутствуют. Заготовка – это отдельная поверхность Planar face. Позиционирование объектов по оси OZ не требуется, так как изначально импортированная геометрия была спозиционирована в КОМПАС-3D V21. Через команду Mesh была сгенерирована четырехугольная сетка конечных элементов со средней длиной ребра 3 мм (заготовка) и 5 мм (матрица, прижим, пуансон). В качестве модели материала матрицы была выбрана жесткая модель

MAT-RIGID и ограничены все степени свободы. Для пуансона и прижима была выбрана жесткая модель MAT-RIGID и оставлена только одна степень свободы – перемещение по оси OZ , для заготовки – поперечно-анизотропная модель MAT_TRANSVERSELY_ANISOTROPIC_ELASTIC_PLASTIC без ограничения степеней свободы [10]. Между пуансоном, матрицей, прижимом и заготовкой заданы граничные условия с помощью карты FORMING_SURFACE_TO_SURFACE, коэффициент трения между элементами матрицы и деталью, а также прижимом и матрицей равен 0,05, коэффициент трения между элементами пуансона и детали – 0,3.

Свойства материала заготовки задавались с использованием экспериментальной кривой упрочнения сплава 1580, полученной при испытании на растяжение по ГОСТ 1497-84 [11] (рис. 5).

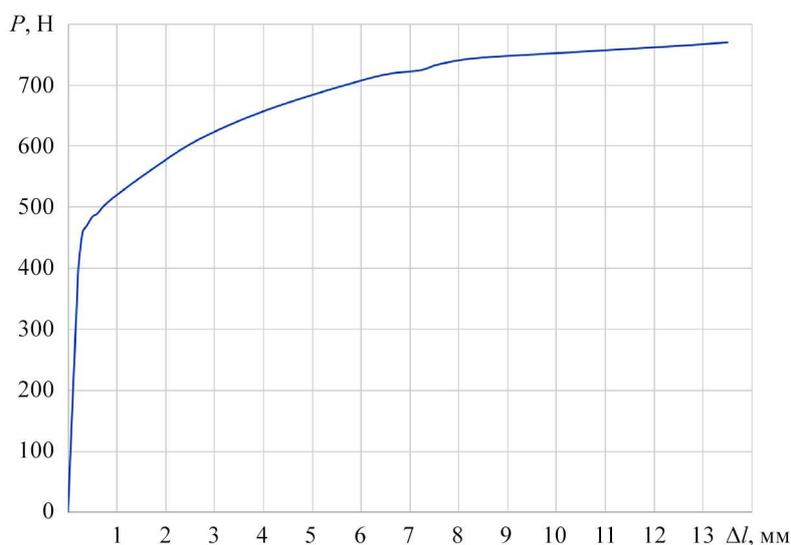


Рис. 5

Экспериментальная кривая была аппроксимирована в кривую зависимости истинных напряжений от деформации [12–14] (рис. 6).

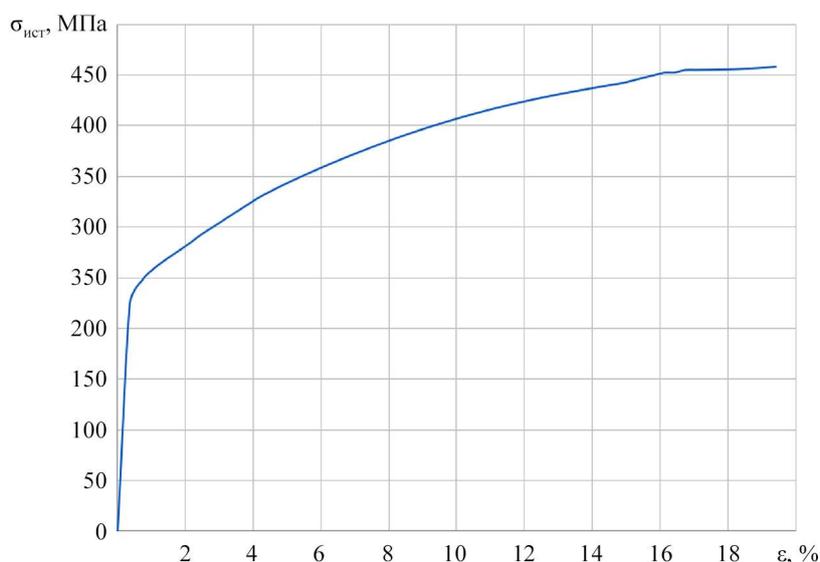


Рис. 6

Для описания свойств материала заготовки толщиной $S = 1,44$ мм из алюминиевого сплава 1580 были введены следующие параметры: плотность алюминиевого сплава – 2710 кг/мм^3 , модуль упругости –

69 ГПа; коэффициент Пуассона – 0,28; коэффициент, учитывающий анизотропию трансверсально-изотропной заготовки, – 0,43.

Штамп содержит пуансон сферический, цилиндрическую матрицу и прижим. Плоскую заготовку располагают на поверхности матрицы и зажимают ее прижимом на верхней плоскости матрицы для удержания фланца и предотвращения гофрообразования. При движении пуансона вниз заготовка вытягивается в полость матрицы по радиусной части.

Приведем результаты моделирования.

На рис. 7 представлено распределение интенсивности напряжений, на рис. 8 – распределение толщин по сечению детали.

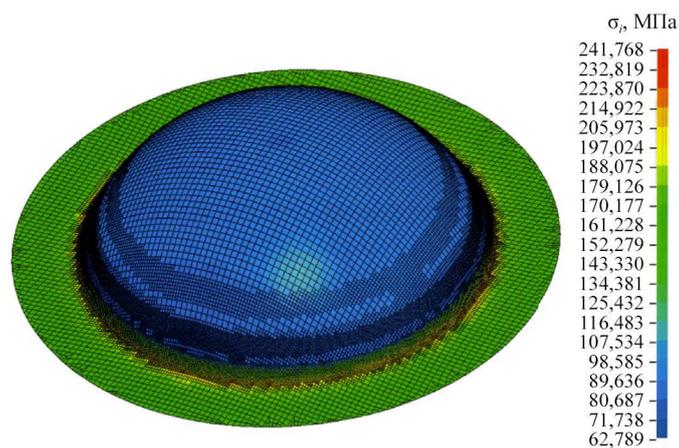


Рис. 7

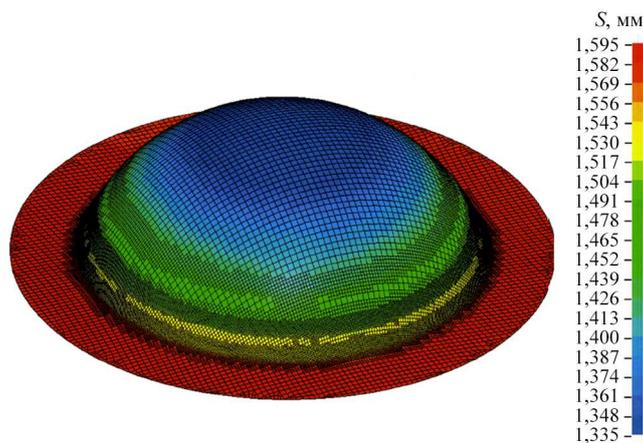


Рис. 8

Согласно полученным результатам моделирования интенсивность напряжений максимальна в радиусной зоне перехода сферической поверхности детали и ее фланцем и составляет не более 242 МПа. Разрушения детали не происходит, так как временное сопротивление разрыву материала 1580 составляет 360 МПа [6].

Минимальная толщина детали (1,335 мм) по результатам моделирования наблюдается около ее донной части. По полученным значениям толщин по сечениям детали можно сделать вывод о равномерном распределении толщины. Возникшее утолщение на фланце составило 1,569–1,595 мм.

Были проведены для четырех переходов замеры толщин в пяти точках (рис. 9) сечения днища, полученного в экспериментальном штампе.

Значения толщин математического моделирования и опытной штамповки в экспериментальном штампе первого, второго, третьего и четвертого переходов вытяжки представлены в таблице.

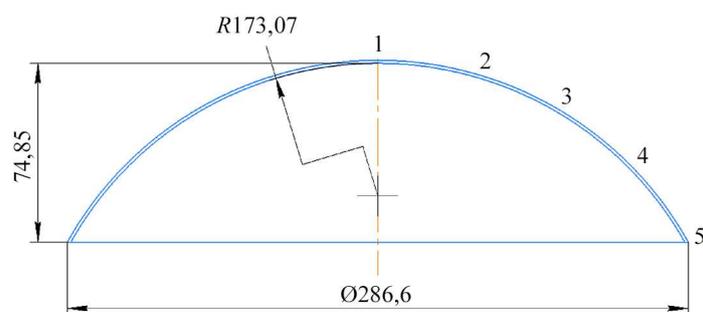


Рис. 9

| Процесс с утонением | Толщина днища в точках, мм | | | | | Диаметр фланца, мм |
|---------------------------|----------------------------|-------------|------------|------------|------------|--------------------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | |
| | Первый переход | | | | | |
| Моделирование/утонение, % | 1,34/6,94 | 1,36/5,56 | 1,38/4,17 | 1,41/2,08 | 1,43/0,69 | 415 |
| Эксперимент/утонение, % | 1,36/5,56 | 1,355/6,25 | 1,365/5,21 | 1,38/4,17 | 1,41/2,08 | 420 |
| Погрешность, % | 1,39 | 0,69 | 1,04 | 2,08 | 1,39 | 1,19 |
| | Второй переход | | | | | |
| Моделирование/утонение, % | 1,34/6,94 | 1,36/5,56 | 1,37/4,86 | 1,41/2,08 | 1,44/0 | 397,4 |
| Эксперимент/утонение, % | 1,34/6,94 | 1,33/7,64 | 1,35/6,25 | 1,38/4,17 | 1,43/0,69 | 400 |
| Погрешность, % | 0 | 2,08 | 1,39 | 2,08 | 0,69 | 0,83 |
| | Третий переход | | | | | |
| Моделирование/утонение, % | 1,33/7,64 | 1,33/7,64 | 1,35/6,25 | 1,38/4,17 | 1,44/0,00 | 377,5 |
| Эксперимент/утонение, % | 1,32/8,33 | 1,305/9,38 | 1,325/7,99 | 1,345/6,60 | 1,39/3,47 | 390 |
| Погрешность, % | 0,69 | 1,74 | 1,74 | 2,43 | 3,47 | 2,56% |
| | Четвертый переход | | | | | |
| Моделирование/утонение, % | 1,33/7,64 | 1,33/7,64 | 1,37/4,86 | 1,41/2,08 | 1,45/-0,69 | 361,8 |
| Эксперимент/утонение, % | 1,32/8,33 | 1,295/10,07 | 1,325/7,99 | 1,37/4,86 | 1,395/3,13 | 370 |
| Погрешность, % | 0,69 | 2,43 | 3,13 | 2,78 | 3,82 | 1,08 |

Значения сравнили с результатами моделирования в программном продукте.

Графики распределения толщин по сечению детали на основании экспериментальных данных и данных, полученных в программном продукте QForm, по первому переходу вытяжки представлены на рис. 10, второму переходу – на рис. 11, третьему переходу – на рис. 12, четвертому переходу – на рис. 13.

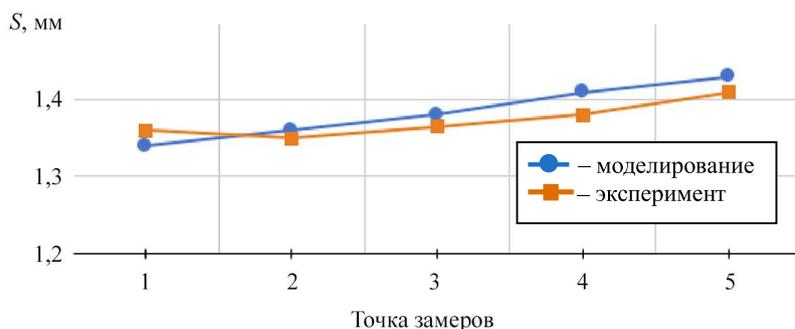


Рис. 10

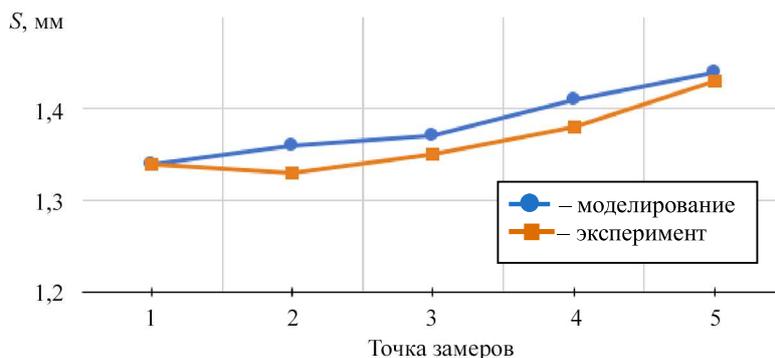


Рис. 11

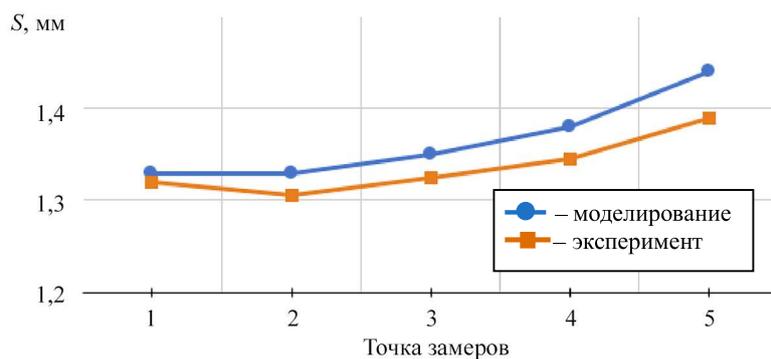


Рис. 12

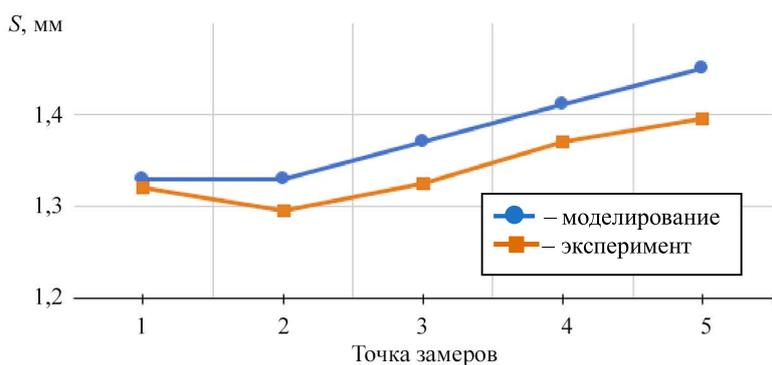


Рис. 13

Основное отличие математической модели, полученной в программном продукте, от детали, полученной экспериментально, заключается в распределении толщин на фланце. Разница утолщения фланцевой части заготовки в сферическую увеличивалась и составила 5,55 % на третьем переходе вытяжки. Утонение в максимальной точке на донной поверхности составило не более 10,1 % от изначальной толщины заготовки, однако разнотолщинность по сферической части днища не превышает 5,37 %. Рассмотренный механизм и анализ напряженно-деформированного состояния заготовки в процессе формообразования позволяют реализовать процесс вытяжки для производства сферообразных днищ.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда, проект № 21-19-00454.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Мошин Е.Н. Технология штамповки крупногабаритных деталей. М.: Машиностроение, 1973. 240 с.
2. Замираева Ю.В. Гофрообразование при листовой штамповке тонкостенного стакана // Уральская школа молодых металлургов: Сб. материалов и докладов 19-й Междунар. науч.-техн. Уральской школы-семинара металлургов молодых ученых, г. Екатеринбург, 19–23 нояб. 2018. Екатеринбург: Уральский федеральный ун-т, 2018. С. 522–525.

3. Малащенко А.Ю. Исследование технологических возможностей процесса формообразования длинномерных обшивок сочетанием гибки-прокатки и дробеударной обработки // Изв. вузов. Авиационная техника. 2016. № 2. С. 92–96.
4. Гречников Ф.В. Деформирование анизотропных материалов. М.: Машиностроение, 1998. 448 с.
5. Крамаренко Н.В. Методы подобия в механике. Анализ уравнений: Новосибирск: НГТУ, 2018. 124 с.
6. ГОСТ 21631-2023. Листы из алюминия и алюминиевых сплавов. Технические условия. М.: Российский институт стандартизации, 2023. 42 с.
7. Ло Сянь, Евсюков С.А., Юй Чжунци. Исследования процесса вытяжки в коническую матрицу // Изв. Тульского государственного университета. Технические науки. 2019. № 9. С. 513–520.
8. Демьяненко Е.Г. Исследование процесса формовки тонкостенных деталей из плоской заготовки с минимальной разнотолщинностью // Изв. вузов. Авиационная техника. 2019. № 3. С. 127–134.
9. Басов К.А. ANSYS: Справочник пользователя. М.: ДМК, 2005. 639 с.
10. Ильюшин А.А. Пластичность. Упруго-пластические деформации. М.: URSS, 2017. 376 с.
11. ГОСТ 1497-84. Металлы. Методы испытаний на растяжение: Межгосударственный стандарт. М.: Стандартиформ, 2008. 24 с.
12. Menezes L.F., Teodosiu C. Three-Dimensional Numerical Simulation of the Deep Drawing Process Using Solid Finite Elements // Journal of Materials Processing Technologies. 2000. Vol. 97. Iss. 1-3. P. 100–106.
13. Дмитриев А.М., Воронцов А.Л. Аппроксимация кривых упрочнения металлов // Кузнечно-штамповочное производство обработки металлов давлением. 2002. № 6. С. 16–22.
14. Непершин Р.И. Моделирование глубокой вытяжки тонкостенных осесимметричных оболочек // Теоретическая и прикладная механика: Международ. науч.-техн. сб. 2016. № 31. С. 11–16.

Поступила в редакцию 15.12.24

После доработки 12.01.25

Принята к публикации 12.01.25

Investigation of the Drawing Process for Obtaining the Spherical Bottoms

E.G. DEM'YANENKO AND YU.S. OKHAPKIN

Samara National Research University, Samara

The paper analyzes the drawing process in the context of the manufacture of large-sized spherical bottoms in production. The stages of computer modeling in the QForm software product for the initial workpiece made of aluminum alloy 1580 with a thickness of 1.5mm and a diameter of 426.9 mm are given, indicating the main process parameters, such as the material model, mechanical characteristics of the workpiece material, type of elements, kinematic loads, conditions of contact interaction of elements among themselves, etc. The thickness distribution on the spherical part of the bottom surface has been established. A complex method is used in the work including a comparison of the results obtained in an experimental press tool and in modeling.

Deep drawing, spherical bottom, QForm, modeling, thickness, corrugation