

ШИТИКОВ АНДРЕЙ АНДРЕЕВИЧ

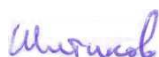
**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ПНЕВМОТЕРМИЧЕСКОЙ
ФОРМОВКИ В СОСТОЯНИИ СВЕРХПЛАСТИЧНОСТИ ДЕТАЛЕЙ
ТИПА «ПОЛУСФЕРА»**

Специальность 05.02.09 – Технологии и машины обработки давлением

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук



Москва

2016

Работа выполнена на кафедре технологий обработки давлением
ФГБОУ ВПО МГТУ им. Н.Э. Баумана.

Научный руководитель: Власов Андрей Викторович
доктор технических наук, профессор,
ФГБОУ ВПО «Московский государственный
технический университет имени Н.Э. Баумана»,
кафедра технологий обработки давлением

Официальные оппоненты: Ларин Сергей Николаевич
доктор технических наук, профессор,
ФГБОУ ВО «Тульский государственный
университет», кафедра механики пластического
формоизменения

Полькин Владислав Игоревич
кандидат технических наук, доцент
ФГАОУ «Национальный исследовательский
технологический университет «МИСиС»,
кафедра обработки металлов давлением

Ведущая организация: ФГБУН «Институт металлургии и
материаловедения им. А.А. Байкова Российской
академии наук» (ИМЕТ РАН)

Защита состоится « » _____ 2016 г. в _____ часов на заседании
диссертационного совета Д 212.141.04 при ФГБОУ ВПО МГТУ им. Н.Э. Баумана
по адресу 105005, г. Москва, ул. 2-я Бауманская, д. 5., стр. 1.

Ваш отзыв на автореферат в 2-х экземплярах, заверенных печатью, просим
направлять по указанному адресу.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВПО
МГТУ им. Н.Э. Баумана и на сайте www.bmstu.ru.

Телефон для справок 8(499) 267-09-63

Автореферат разослан « » _____ 2016 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
кандидат технических наук,
доцент



Семенов Вячеслав Иванович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Детали типа «Полусфера» являются составной частью сферических баков и баллонов, нашедших широкое применение в космической технике.

К материалу баллона предъявляются повышенные требования по коррозионной стойкости, а также прочности при криогенных температурах, по этим причинам баллоны изготавливаются из титановых сплавов или коррозионностойких сталей.

Титановые сплавы ВТ14 и ВТ6, применяемые при изготовлении полусфер, являются высокопрочными сплавами с низкой (ВТ14) и весьма низкой (ВТ6) пластичностью. Поэтому одним из методов формообразования полусфер является пневмотермическая формовка в состоянии сверхпластичности.

Пневмотермическая формовка в состоянии сверхпластичности нашла применение в авиационной, космической и автомобильной промышленности при изготовлении листовых деталей из алюминиевых и титановых сплавов в условиях мелкосерийного и серийного производства.

Преимущества процесса:

- отсутствие пружинения,
- малое количество технологических переходов и, соответственно, необходимой технологической оснастки.

Сверхпластические свойства материала проявляются в определенном интервале скоростей деформации. В этом интервале существует оптимальная скорость деформации, для которой процесс протекает наиболее устойчиво, а вероятность локального утонения заготовки минимальна. Формовка при постоянном давлении не в состоянии обеспечить нужной скорости деформации на протяжении всего процесса, поэтому давление газа должно изменяться по сложному закону, определяемому для конкретных условий протекания процесса, конфигурации детали и штамповой оснастки.

Так как формовка осуществляется только за счет утонения центральной части заготовки, то полученные детали имеют значительную разнотолщинность.

Наиболее рациональной сферой применения пневмотермической формовки является авиационная и космическая промышленность, для которой низкая производительность и сложная система управления процессом не являются критичными, так как серийность производства мала, а наибольший интерес представляет улучшение качества и снижение веса производимых деталей за счет оптимизации их толщины.

Для борьбы с разнотолщинностью применяют различные технологические приемы: формовку заготовки переменной толщины, совмещение штамповки и пневмотермической формовки, реверсивную формовку и т.д.

Одной из основных задач при проектировании технологического процесса реверсивной формовки является выбор контура штампа предварительного перехода.

Не смотря на значительное количество работ, посвященных процессу пневмотермической формовки в состоянии сверхпластичности (Еникеев Ф.У.,

Круглов А.А., Ларин С.Н., Лутфуллин Р.Я., Пашкевич А.Г., Смирнов О.М., Соболев Я.А., Цепин М.А., Чудин В.Н., Чумаченко Е.Н., Яковлев С.С., Cornfield G.C., Giuliano G., Jovane F. и др.), исследованиями реверсивной формовки занималось небольшое число отечественных (Алексеев П.А., Селедкин Е.М. и др.) и зарубежных (Luckey G., Xing H.L. и др.) исследователей.

В работах Алексеева П.А., Селедкина Е.М., Luckey G. геометрия контура предварительного перехода строится методом подбора. При этом даны рекомендации только для некоторых размеров элементов контура штампа или соотношений между ними. Методики направлены на получение равнотолщинных деталей. Предлагаемые контуры штампа предварительного перехода приведены безотносительно конкретного материала и условий трения.

Более формализованная методика предложена в работах Xing H.L. Она пригодна для случаев, когда отформованная деталь должна иметь заданное распределение толщины, однако результат ее применения будет удовлетворительным, только если трение на предварительном переходе формовки будет очень велико. Трение оказывает очень большое влияние на результат реверсивной формовки, поэтому метод не может рассматриваться как универсальный.

Таким образом, можно утверждать, что универсальной формализованной методики расчета контура штампа предварительного перехода реверсивной пневмотермической формовки, пригодной для получения деталей с заданным распределением толщин (как равнотолщинных так и с утолщениями, например, с полюсными под приварку штуцеров или экваториальными для сварки полусфер между собой), из разных материалов и с различными технологическими смазками в технической литературе не обнаружено.

Указанная формализованная методика позволила бы расширить спектр применений реверсивной формовки, и ее разработка является актуальной задачей.

Цель работы: Разработка методики проектирования технологического процесса реверсивной пневмотермической формовки в состоянии сверхпластичности деталей типа «Полусфера» с заданным изменением толщины стенки.

Задачи работы

- Разработка математической модели процесса пневмотермической формовки с автоматическим регулированием давления, с целью поддержания скорости деформации в оптимальном интервале, для реализации условий сверхпластичности.
- Разработка методики идентификации параметров реологической модели материала в состоянии сверхпластичности для математического моделирования процесса формообразования.
- Разработка формализованной (не интуитивной) методики подбора контура штампа предварительного перехода с целью обеспечения максимальной равнотолщинности или требуемой разнотолщинности получаемой полусферы.
- Экспериментальная проверка правильности разработанных методик.
- Внедрение результатов диссертационной работы.

Научная новизна

- Комплексная методика проектирования контура штампа предварительного перехода и режимов изменения давления формующей среды для технологического процесса реверсивной пневмотермической формовки, основанная на использовании методов многопараметрической оптимизации и математического моделирования с помощью метода конечных элементов (МКЭ).
- Методика идентификации параметров реологических моделей материалов в состоянии сверхпластичности по тестовым формовкам с помощью инверсного анализа.
- Критерии оптимальности технологического процесса.
- Результаты исследования влияния точности определения параметров реологической модели на распределение толщин и график давления при формовке.

Теоретическая значимость

- Выявлено влияние основных параметров и допущений на результаты математического моделирования процесса пневмотермической формовки в состоянии сверхпластичности с помощью МКЭ.
- Изучено влияние трения на перераспределение толщин во время предварительного перехода реверсивной пневмотермической формовки.
- Определены интервалы, в которых изменяются интенсивность скоростей деформации и накопленная деформация в процессе реверсивной пневмотермической формовки.

Практическая значимость

- Разработанная программа-оболочка к программному комплексу DEFORM, позволяющая проводить подбор контура штампа для предварительного перехода пневмотермической формовки и графика изменения давления формующей среды, обеспечивающего протекания процесса в состоянии сверхпластичности, в автоматическом режиме для деталей с осесимметричным и плоским деформированным состоянием.
- Разработанная программа-оболочка к программному комплексу DEFORM, позволяющая в автоматическом режиме производить подбор параметров реологических моделей материалов в состоянии сверхпластичности по результатам тестовых формовок.
- Разработанная комплексная методика проектирования контура штампа предварительного перехода и режимов изменения давления формующей среды для технологического процесса реверсивной пневмотермической формовки использована на ФГУП «НПО «Техномаш» при проектировании оснастки и разработке технологических процессов формообразования трех типоразмеров шаробаллонов из титанового сплава ВТ6с.

Методология и методы исследования

Теоретическое исследование процесса формоизменения при пневмотермической формовке производилось с помощью метода конечных элементов (МКЭ) в программном комплексе DEFORM 2D.

Разработанные методики основаны на использовании метода многопараметрической оптимизации Нелдера-Мида.

Экспериментальные исследования проводились в лаборатории кафедры «Технологии обработки давлением» МГТУ им. Н.Э. Баумана.

В качестве материала для экспериментального исследования формовки в состоянии сверхпластичности использовался модельный сплав ПОС 61. Для формовки была спроектирована и изготовлена специальная установка с программным управлением.

Работы по построению кривых упрочнения были выполнены с использованием универсальной испытательной машины INSTRON 600DX.

Для выполнения работ и обработки результатов было написано большое число вспомогательных программ в средах разработки: Absoft Fortran, LabVIEW и Mathcad.

Положения, выносимые на защиту

- Методика проектирования контура штампа для предварительного перехода технологического процесса реверсивной пневмотермической формовки, основанная на использовании методов многопараметрической оптимизации и математического моделирования процесса формообразования с помощью МКЭ.
- Методика идентификации параметров реологических моделей материалов в состоянии сверхпластичности по тестовым формовкам с помощью инверсного анализа.
- Результаты теоретических и экспериментальных исследований.

Степень достоверности и апробация результатов

Достоверность результатов работы обеспечивается использованием в теоретических исследованиях апробированного программного комплекса DEFORM, предназначенного для математического моделирования процессов формообразования с помощью МКЭ. В экспериментальных исследованиях использовалось сертифицированное испытательное и измерительное оборудование. Сравнение результатов расчетов и экспериментального исследования показало их высокое качественное и удовлетворительное количественное совпадение.

Основные положения и материалы работы доложены и обсуждены на:

- Заседаниях научно-технического совета ФГУП «НПО «Техномаш», (Москва, 2012 г.).
- Международных форумах «Инженерные системы», (Москва, 2012-2013 г.).

- Отраслевой научно-практической конференции «Проблемы унификации конструкций и специализации производства топливных емкостей и баллонов высокого давления РКТ», НОУ ДПО «ИПК «Машприбор», (Королев, 2013 г.).
- Десятой Всероссийской конференции «Новые технологии», (Миасс, 2013 г.).
- Третьей международной научно-технической конференции «Механика пластического формоизменения. Технологии и оборудование обработки материалов давлением», ТулГУ, (Тула, 2014 г.).
- Научных семинарах кафедры «Технологии обработки давлением» МГТУ им. Н.Э. Баумана, (Москва, 2013-2015 г.).
- Восьмой Всероссийской конференции молодых ученых и специалистов «Будущее машиностроения России», (Москва, 2015 г.).
- Симпозиуме «Schuler Aerospace в университете машиностроения», (Москва, 2015 г.),

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы из 137 наименований и содержит 167 страниц машинописного текста, включая 112 рисунков и 12 таблиц.

Во введении раскрыта актуальность темы диссертационной работы, ее научная новизна, теоретическая и практическая значимость.

В первой главе отмечено, что поведение сверхпластичного материала, в первую очередь, определяется скоростью деформации. При формовке необходимо обеспечить такой режим регулирования давления формующего газа, чтобы скорость деформации поддерживалась в определенных пределах.

Описаны технологические приемы управления толщиной стенки при пневмотермической формовке, отмечено что для ряда деталей использование реверсивной формовки может обеспечить наименьшие дополнительные затраты и трудоемкость изготовления. При этом спектр применений реверсивной формовки может быть расширен, если удастся создать формализованную методику расчета контура штампа предварительного перехода, применимую для деталей различных конфигураций.

Проведен анализ методов расчета операций пневмотермической формовки. Отмечено, что аналитические решения используют большое число допущений о характере протекания процесса деформирования, что существенно отражается на точности получаемых результатов. Даже самые простые аналитические выражения необходимо решать с применением численных методов. Уменьшение количества допущений приводит к значительному повышению трудоемкости, и программы, предназначенные для выполнения подобных расчетов, сопоставимы по сложности с программами, использующими метод конечных элементов. Кроме того, аналитические решения применимы только для крайне ограниченного набора простых форм, среди которых нет типовых форм для штампов предварительных переходов реверсивной формовки. Применение метода

конечных элементов для расчета операций пневмотермической формовки позволяет использовать наименьшее число допущений о напряженно-деформированном состоянии заготовки, и, следовательно, обеспечивает наибольшую точность расчета. При использовании коммерческих программных комплексов, как правило, необходима модификация решателя комплекса с помощью пользовательских процедур для определения режима регулирования давления формовки. По итогам анализа для дальнейших теоретических исследований выбран программный комплекс DEFORM 2D, в котором используются линейные 4-х узловые осесимметричные конечные элементы, возможно задание как упруго-вязкопластической так и вязкопластической моделей материала, а также имеются широкие возможности по пользовательскому программированию граничных условий, свойств материала, дополнительных параметров и т.д.

Проведен анализ реологических моделей материалов в состоянии сверхпластичности. Установлено, что для расчета операций реверсивной формовки нет необходимости учитывать в реологической модели составляющие, отражающие влияние температуры, микроструктуры и порообразования. Поэтому достаточной точности можно добиться используя простую степенную модель (1).

$$\sigma_s = K \cdot \dot{\epsilon}^m \cdot \epsilon^n + \sigma_0 \quad (1)$$

Проведен анализ способов проектирования штампов предварительных переходов. Отмечено, что наиболее подходящими для реверсивной формовки являются методы многопараметрической оптимизации, так как их можно использовать при минимальной доработке существующих коммерческих программных комплексов. Наиболее просто, с программной точки зрения, реализовать методы оптимизации нулевого порядка, не использующие градиент целевой функции.

Сформулированы цель и задачи диссертационной работы.

Во второй главе выполнен комплексный анализ факторов, влияющих на результаты расчета процессов пневмотермической формовки. По результатам анализа разработана математическая модель процесса реверсивной пневмотермической формовки. Модель позволяет для любого момента времени рассчитать необходимое для формовки в состоянии сверхпластичности давление, а также оценить напряженное и деформированное состояние заготовки. Основные допущения модели:

- Напряженно-деформированное состояние – осесимметричное;
- Модель материала – упруго-вязкопластическая;
- Анизотропия, изменение микроструктуры и порообразование – не учитываются;
- По толщине заготовки должно располагаться не менее 5 конечных элементов;
- Трение учитывается с помощью смешанной модели Кулона-Зибеля (2)

$$\tau_k = \begin{cases} \mu \cdot \sigma_N & \mu \cdot \sigma_N \leq m \cdot k \\ m \cdot k & \mu \cdot \sigma_N > m \cdot k \end{cases} \quad (2)$$

где μ – коэффициент трения в модели кулона;

σ_N – нормальные напряжения на контактной поверхности;

m – фактор трения в модели Зибеля;

k – постоянная пластичности.

- Давление на каждом шаге расчета определяется по формуле пропорционального регулятора (3)

$$p_{i+1} = k(\dot{\epsilon}_i, [\dot{\epsilon}]) \cdot p_i \quad (3)$$

где p_i и p_{i+1} – давление на текущем и следующем шаге расчета соответственно;

$k(\dot{\epsilon}_i, [\dot{\epsilon}])$ – коэффициент, коэффициент, вычисляемый из соотношения (4) между скоростью деформации на текущем шаге $\dot{\epsilon}_i$ и заданной скоростью деформации $[\dot{\epsilon}]$.

$$k(\dot{\epsilon}_i, [\dot{\epsilon}]) = \begin{cases} 1 + \frac{|\dot{\epsilon}_i - [\dot{\epsilon}]|}{[\dot{\epsilon}]}, & \dot{\epsilon}_i - [\dot{\epsilon}] \leq 0 \\ \frac{1}{1 + \frac{|\dot{\epsilon}_i - [\dot{\epsilon}]|}{[\dot{\epsilon}]}} \end{cases} \quad (4)$$

Скорость деформации на текущем шаге $\dot{\epsilon}_i$ определяется как средняя по толщине заготовки, в сечении, проходящем через элемент с максимальной скоростью деформации (см. Рисунок 1).

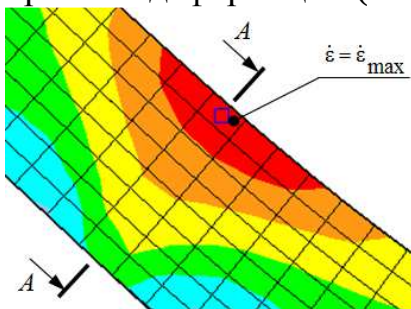


Рисунок 1.

Расчетная схема для вычисления $\dot{\epsilon}_i$

С помощью созданной модели установлено, что трение оказывает существенное влияние на характер формоизменения заготовки на предварительном переходе формовки. Ошибка в определении параметров модели трения может привести к ошибке в определении толщины заготовки после формовки до 30%.

Также выполнена оценка влияния точности определения параметров реологической модели (1) на результаты формовки. Увеличение параметров m и n способствует более равномерному распределению толщин отформованной полусферы. Наибольшее влияние на распределение толщин и график давления оказывает параметр m . Методика идентификации параметров реологической модели должна обеспечивать его определение с максимальной точностью. Погрешность $\pm 25\%$ при экспериментальном определении параметров n и σ_0 является вполне допустимой, и существенно не отражается ни на распределении толщин, ни на графике давления. Параметр K пропорционально влияет на необходимое для формовки

давление, но практически не влияет на толщины отформованной полусферы. То есть, контур штампа предварительного перехода в процессе оптимизации может быть найден, даже если параметр K определен с ошибкой.

Выполнено моделирование процессов реверсивной формовки для ряда конфигураций штампа предварительного перехода, рекомендованных в технической литературе. Отмечено, что для рассмотренных контуров скорость деформации изменяется в пределах $0 \leq \dot{\epsilon} < 10 \cdot [\dot{\epsilon}]$, а накопленная деформация не превышает 1,5.

В третьей главе для экспериментального исследования процессов формовки в состоянии сверхпластичности выбран в качестве модельного сплав ПОС 61. Данный сплав широко использовался отечественными и зарубежными исследователями процессов формовки в состоянии сверхпластичности.

С помощью испытаний на растяжение по стандарту ASTM E 2448 определены кривые упрочнения модельного сплава.

Разработана и изготовлена экспериментальная установка для двухпереходной формовки с программным управлением (см. Рисунок 2).

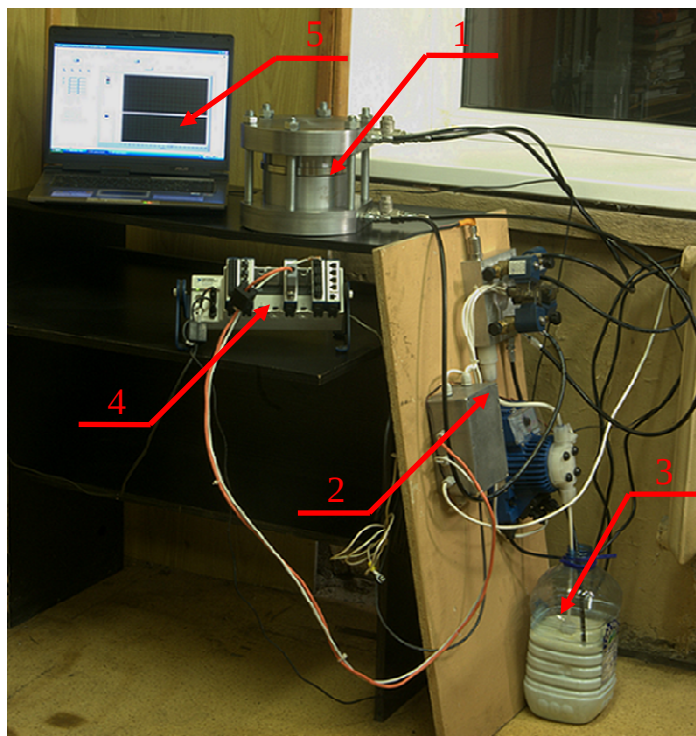


Рисунок 2.

Общий вид экспериментальной установки:

- 1 – формоблок; 2 – гидростанция; 3 – бак; 4 – система сбора данных и управления;
5 – персональный компьютер

При сопоставлении результатов экспериментального исследования однопереходной формовки и результатов математического моделирования обнаружено их качественное несовпадение. Вероятная причина – ошибка определения реологической модели, вызванная локализацией деформации при растяжении образцов (из-за несовершенства технологии изготовления), а также течением материала в зоне закрепления. Сделан вывод о недопустимости

использования испытаний на растяжение для определения параметров реологической модели, в случае если не удастся избежать локализации деформации на рабочей длине образца.

В четвертой главе, в разделе 4.1 приведен обзор альтернативных методик определения параметров реологической модели материала в состоянии сверхпластичности.

Предложена следующая методика идентификации параметров реологической модели материала в состоянии сверхпластичности в промышленных условиях:

- а) Провести тестовую формовку полусферы в штампе окончательного перехода на промышленной установке при линейно нарастающем давлении;
- б) В процессе формовки построить зависимость объема газа в полости штампа от времени формовки;
- в) После формовки выполнить измерения толщин полусферы в возможно большем числе точек, равномерно распределенных вдоль ее образующей.
- г) С помощью инверсного анализа выполнить подбор параметров реологической модели требуемой структуры, добиваясь при этом минимизации ошибки между толщинами и характером изменения объема полости штампа в эксперименте и моделировании.

Пункт г) указанной методики базируется на использовании программного комплекса DEFORM. Для реализации инверсного анализа в среде LabVIEW создана программа-оболочка, позволяющая производить подбор параметров реологической модели в автоматическом режиме с использованием метода Нелдера-Мида.

Разработанная методика была апробирована на сплаве ПОС 61 и показала высокое качественное и удовлетворительное количественное совпадение результатов эксперимента и моделирования. Погрешность определения максимального времени формовки не превышает 4% (см. Рисунок 3). Максимальная погрешность определения толщины не превышает 30%, средняя по профилю полусферы – 8,2% (см. Рисунок 4).



Рисунок 3.

Графики изменения объема полусферы, полученные с помощью эксперимента и моделирования

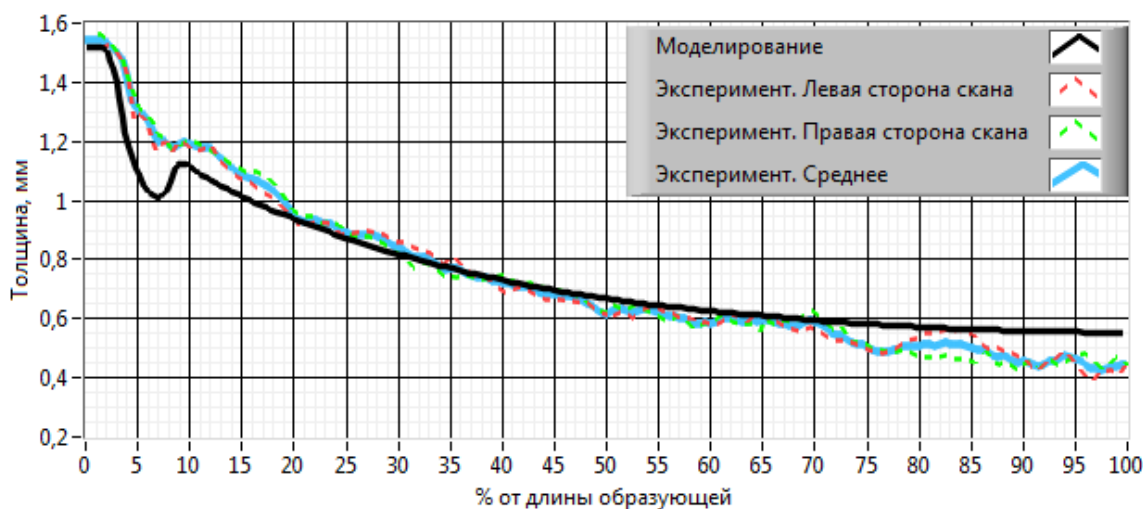


Рисунок 4.

Толщины заготовки после однопереходной формовки, полученные в результате эксперимента и моделирования

В разделе 4.2 разработана методика подбора контура штампа предварительного перехода, укрупненная блок-схема алгоритма которой представлена на Рисунке 5.



Рисунок 5.

Укрупненная блок-схема алгоритма подбора контура предварительного перехода

Контур штампа 1-го перехода определяется сплайном, проходящим через $n+1$ равномерно размещенных ($\Delta R = R_{\max}/n$) реперных точек (см. Рисунок 6). Варьируемыми параметрами являются координаты Z_i ($i=1...n$) реперных точек. Последняя точка сплайна имеет координаты ($R_{\max}; 0$).

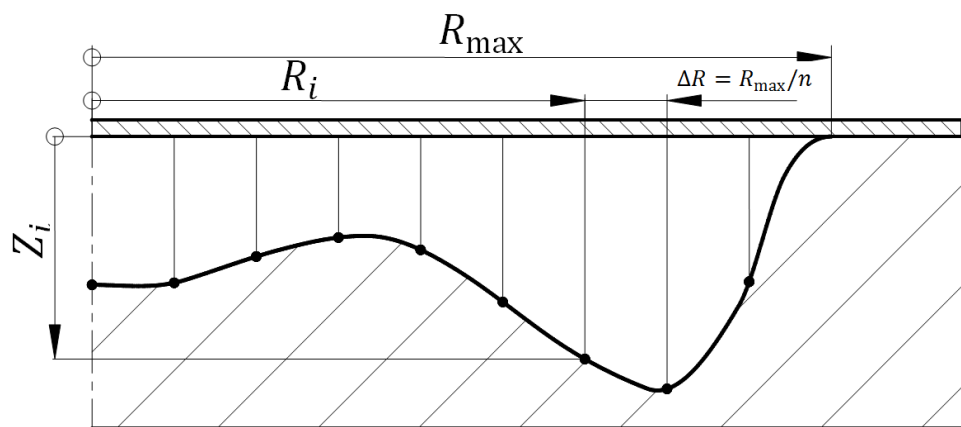


Рисунок 6.
Варьируемые параметры

Целевая функция рассчитывается путем сравнения контура отформованной заготовки (в конце моделирования) с контуром чистовой детали. Расчетная схема приведена на Рисунке 7.

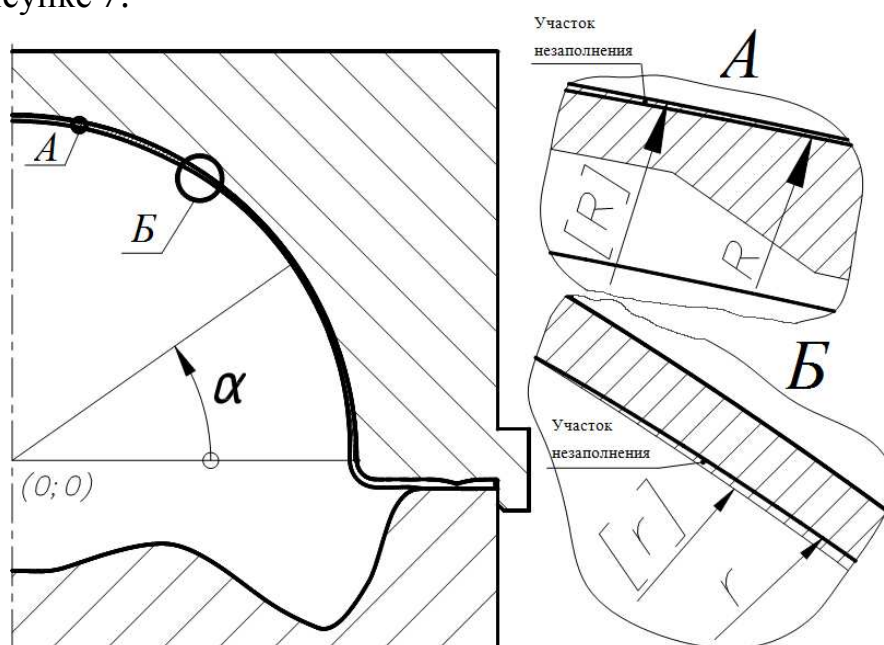


Рисунок 7.
Расчетная схема для определения целевой функции

Из чертежа детали известны координаты точек на наружной $[R]=f(\alpha)$ и внутренней $[r]=f(\alpha)$ поверхности чистовой детали (с учетом теплового расширения).

В результате моделирования вычисляются координаты точек, лежащих на следующих кривых:

- $r=f(\alpha)$ – кривая внутренней поверхности штампованной заготовки в конце моделирования;
- $R=f(\alpha)$ – кривая наружной поверхности

Готовая деталь может быть получена из отформованной заготовки в случае выполнения условий (5)

$$\begin{cases} R(\alpha) \geq [R(\alpha)] \\ r(\alpha) \leq [r(\alpha)] \end{cases} \quad \forall \alpha \in [0...90^\circ] \quad (5)$$

Не выполнение первой части условия (5) наглядно показано на местном виде А, а второй – на местном виде Б на Рисунке 7.

Разобьем целевую функцию F_Σ на две составляющих. Первая ее часть F_1 , представляет собой средний «недостающий припуск» на единицу длины образующей на обеих поверхностях отформованной полусферы (6).

$$F_1 = \frac{2}{\pi \cdot l_{\text{обр}}} \cdot \int_0^{\frac{\pi}{2}} [\Delta r(\alpha) + \Delta R(\alpha)] d\alpha \quad (6)$$

где $l_{\text{обр}}$ - длина образующей внутренней полусферической поверхности,

$\Delta r(\alpha)$ - «недостающий» припуск на внутренней поверхности, определяемый по формуле (7)

$$\Delta r(\alpha) = \begin{cases} r(\alpha) - [r(\alpha)], & r(\alpha) - [r(\alpha)] > 0 \\ 0 & \end{cases} \quad (7)$$

$\Delta R(\alpha)$ - «недостающий» припуск на наружной поверхности, определяемый по формуле (8)

$$\Delta R(\alpha) = \begin{cases} [R(\alpha)] - R(\alpha), & [R(\alpha)] - R(\alpha) > 0 \\ 0 & \end{cases} \quad (8)$$

При $F_1=0$ готовая деталь полностью помещается в отштампованной заготовке и может быть получена из нее путем механической обработки.

Дополнительно можно улучшить качество решения, добиваясь максимально равномерного припуска на внутренней поверхности полусферы. Неравномерность припуска можно определить по формуле (9)

$$F_2 = \frac{1}{\bar{\delta}} \cdot \sqrt{\frac{2}{\pi} \cdot \int_0^{\frac{\pi}{2}} [\delta(\alpha) - \bar{\delta}]^2 d\alpha} \quad (9)$$

где $\delta(\alpha)$ - припуск на внутренней поверхности (10)

$$\delta(\alpha) = [r(\alpha)] - r(\alpha) \quad (10)$$

$\bar{\delta}$ - средний припуск на внутренней поверхности (11)

$$\bar{\delta} = \frac{2}{\pi} \cdot \int_0^{\frac{\pi}{2}} \delta(\alpha) d\alpha \quad (11)$$

Обобщенная целевая функция вычисляется по формуле (12)

$$F_\Sigma = k_{\text{ш}} \cdot F_1 + F_2 \quad (12)$$

где $k_{\text{ш}}$ – весовой коэффициент, учитывающий большую значимость компоненты F_1 . По результатам тестовых расчетов принято значение $k_{\text{ш}}=10$.

Для реализации методики в среде LabVIEW создана программа-оболочка, позволяющая производить подбор контура предварительного перехода в автоматическом режиме с использованием метода Нелдера-Мида. Так же автоматически определяется оптимальный режим регулирования давления газа в процессе формовки.

Большинство исследователей использовали реверсивную формовку для получения равнотолщинных деталей. Чтобы доказать применимость предлагаемой методики к проектированию технологических процессов реверсивной формовки деталей с заданным распределением толщины, для апробации выбрана деталь с утолщением 60% в околополюсной части (см. Рисунок 8). Исходная толщина заготовки 1,45 мм.

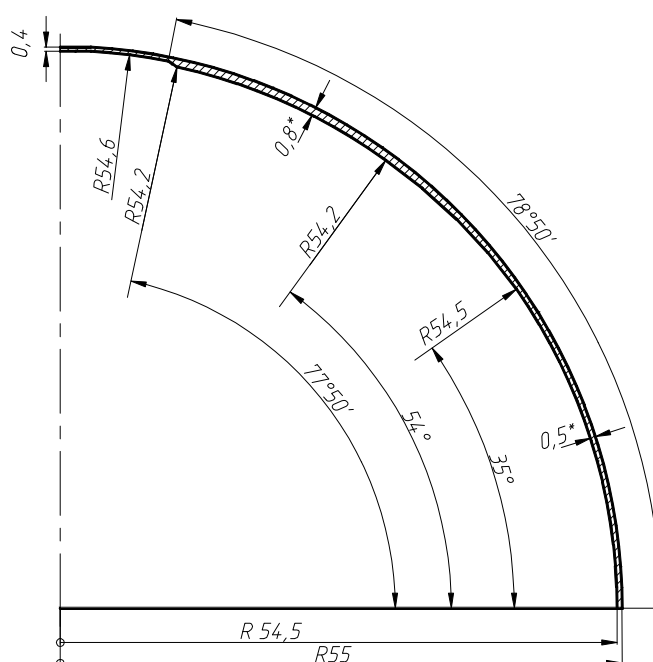


Рисунок 8.

Пример детали типа «Полусфера» с утолщением

После 50 итераций процесса оптимизации получен контур штампа предварительного перехода, изображенный на Рисунке 9.

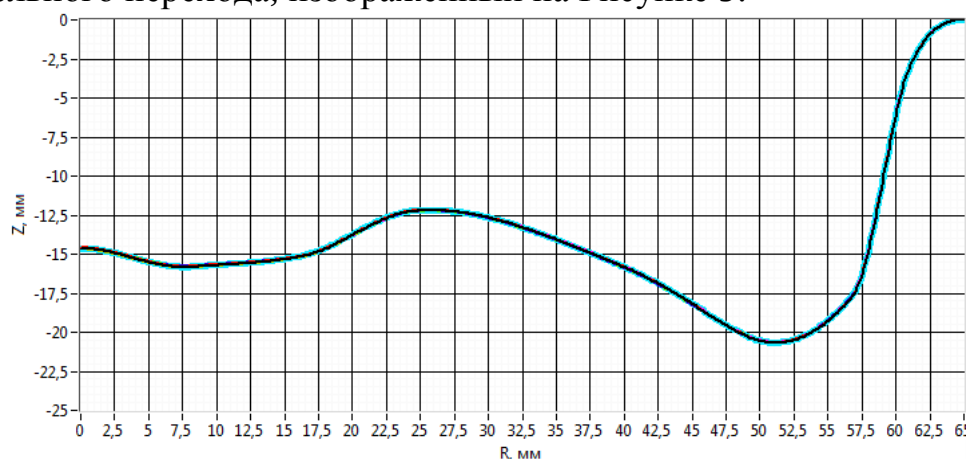


Рисунок 9.

Найденный контур штампа предварительного перехода

Для экспериментальной проверки найденного контура штампа была изготовлена матрица предварительного перехода. Экспериментальное исследование проводилось на сплаве ПОС 61. Максимальная погрешность определения толщин с помощью моделирования составила 16,4%, а средняя по профилю полусферы – 4,8% (см. Рисунок 10).



Рисунок 10.

Толщины заготовки после реверсивной формовки, полученные в результате эксперимента и моделирования

Так как в результате эксперимента получена полусфера с большей толщиной, по сравнению с результатами моделирования, то изготовить из нее требуемую деталь возможно и разработанная методика подбора контура штампа предварительного перехода также работает удовлетворительно.

Методика проектирования технологического процесса реверсивной пневмотермической формовки использована на ФГУП «НПО «Техномаш» при проектировании оснастки и разработке технологических процессов формообразования трех типоразмеров шаробаллонов из титанового сплава ВТ6с.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

- а) Комплексный анализ факторов (тип модели материала, размеры сетки КЭ, алгоритмы регулирования давления), влияющих на результаты моделирования с помощью МКЭ, позволил обосновать основные допущения и разработать математическую модель процесса пневмотермической формовки применительно к программному комплексу DEFORM 2D. Модель позволяет для любого момента времени рассчитать необходимое для формовки в состоянии сверхпластичности давление, а также оценить напряженное и деформированное состояние заготовки.
- б) Установлено, что трение оказывает существенное влияние на характер формоизменения заготовки на предварительном переходе формовки. Ошибка в определении параметров модели трения может привести к ошибке в определении толщины заготовки после формовки до 30%.

- в) Установлено, что при использовании степенной реологической модели наибольшее влияние на распределение толщин и график давления оказывает параметр скоростного упрочнения (m). Методика идентификации параметров реологической модели должна обеспечивать его определение с максимальной точностью. Погрешность $\pm 25\%$ при экспериментальном определении параметра деформационного упрочнения (n) и начального предела текучести (σ_0) является вполне допустимой, и существенно не отражается ни на распределении толщин, ни на графике давления. Масштабный коэффициент (K) пропорционально влияет на необходимое для формовки давление, но практически не влияет на толщины отформованной полусферы.
- г) Установлено, что реологическая модель материала для расчета процессов реверсивной формовки при различных возможных конфигурациях контура штампа предварительного перехода должна быть определена в интервале скоростей деформаций $0 \leq \dot{\epsilon} < 10 \cdot [\dot{\epsilon}]$ и накопленных деформации $0 \leq \epsilon < 1,5$.
- д) Разработанная методика идентификации параметров реологических моделей по тестовым однопереходным формовкам полусфер с помощью инверсного анализа пригодна для реализации на промышленной установке и может быть использована для подбора параметров реологических моделей всех типов, кроме моделей, учитывающих изменение структуры материала и порообразование.
- е) Разработанная методика проектирования технологического процесса реверсивной пневмотермической формовки позволяет определить контур штампа предварительного перехода, а также режим изменения давления формующей среды, обеспечивающий формообразование в условиях сверхпластичности. Методика позволяет получать детали с требуемым (в определенных пределах) распределением толщины. Методика может использоваться не только для деталей типа «Полусфера», но, при соответствующем изменении вида целевых функций, и для других конфигураций.
- ж) В результате экспериментальной проверки разработанных методик на модельном сплаве ПОС 61 установлено, что для однопереходной формовки максимальная погрешность определения времени формовки не превышает 4%, максимальная погрешность определения толщины не превышает 30%, а средняя (по всему профилю полусферы) погрешность определения толщины не превышает 8,2%. Для двухпереходной формовки максимальная погрешность определения толщины составила 16,4%, средняя – 4,8%.
- з) Комплексная методика проектирования контура штампа предварительного перехода и режимов изменения давления формующей среды для технологического процесса реверсивной пневмотермической формовки использована на ФГУП «НПО «Техномаш» при проектировании оснастки и разработке технологических процессов формообразования трех типоразмеров шаробаллонов из титанового сплава ВТ6с.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ АВТОРОМ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. **Шитиков А.А.** Моделирование предварительного перехода при пневмоформовке в состоянии сверхпластичности // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. 2014. N 2. С. 34-40. (0,74 печ. л. / 0,74 печ. л.).
2. **Шитиков А.А.** Некоторые аспекты конечно-элементного моделирования технологического процесса пневмоформовки в состоянии сверхпластичности // Изв. Тульского гос. ун-та. Технические науки. 2014. N 10-1. С. 133-138. (0,29 печ. л. / 0,29 печ. л.).
3. **Шитиков А.А.** Моделирование процесса двухпереходной изотермической газовой формовки детали типа «Полусфера» в программном комплексе DEFORM 2D // Инженерные системы-2012 : Труды международного форума. М.: МАКС Пресс, 2012. С. 219-222. (0,25 печ. л. / 0,25 печ. л.).
4. **Шитиков А.А.** О возможности использования программного комплекса DEFORM 2D для автоматической оптимизации параметров процесса реверсивной пневмотермической формовки // Инженерные системы-2013 : Труды международного форума. М.: МАКС Пресс, 2013. С. 205-208. (0,25 печ. л. / 0,25 печ. л.).
5. Разработка технологии газовой формовки титановых полусфер шаробаллонов в режимах сверхпластичности / А.В. Бараев, С.М. Вайцехович, Г.Г. Кривенко, А.В. Мишуков, М.А. Прусаков, В.Е. Харсеев, **А.А. Шитиков** // Новые технологии : материалы X Всероссийской конференции. М.: РАН, 2013. С. 81-92. (0,66 печ. л. / 0,12 печ. л.).
6. Создание типового технологического процесса и оборудования для газовой формовки полусфер титановых шаробаллонов в защитной среде с использованием эффекта сверхпластичности / Г.Г. Кривенко, С.М. Вайцехович, В.Е. Харсеев, **А.А. Шитиков** // Проблемы унификации конструкции и специализации производства топливных емкостей и баллонов высокого давления РКТ. Разработка предложений по унификации, отраслевой специализации и рациональному размещению производства : Материалы отраслевой научно-практической конференции. Королев. 2013. С. 100-104. (0,58 печ. л. / 0,15 печ. л.).
7. **Шитиков А.А.**, Власов А.В. Использование инверсного анализа для определения параметров реологической модели материала для расчета процессов сверхпластической формовки // Восьмая Всероссийская конференция молодых ученых и специалистов «Будущее машиностроения России» : сборник докладов. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2015. С. 202-205. (0,16 печ. л. / 0,1 печ. л.).