

Определение оптимальных параметров заготовок и параметров операций сверхпластической формовки и изотермической штамповки при изготовлении тонкостенных деталей ГТД

д.т.н. проф. Темис Ю.М.^{1,2}, Худяков А.П.¹, к.т.н. Чередниченко А.В.²

¹Центральный институт авиационного моторостроения им. П.И. Баранова,

²Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана

tejoum@ciam.ru

Аннотация. Разработана методика математического моделирования изотермической штамповки и сверхпластической формовки для определения оптимальных параметров заготовок и параметров технологических операций. Методика применена для снижения разнотолщинности тонкостенных деталей, получаемых при сверхпластической формовке, и для проектирования заготовки полой лопатки вентилятора.

Ключевые слова: математическое моделирование, изотермическая штамповка, сверхпластическая формовка, полая лопатка

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 15-01-03073_А)

Введение

Полые и тонкостенные детали широко применяются в современных турбомашинах, позволяя уменьшить массу конструкции [1]. Однако такие детали имеют низкие показатели технологичности из-за сложной формы поверхностей, наличия внутренних полостей и использования материалов, плохо поддающиеся механической обработке.

Технологические процессы изготовления тонкостенных и полых деталей включают в себя операции диффузионной сварки и сверхпластической формовки, которые имеют ряд ограничений: износ матриц штампов, разнотолщинность стенок изделия после формообразующих операций, сложность проектирования заготовок. С конструкторско-технологической точки зрения наибольшее значение имеют дефекты, выражающиеся в виде разнотолщинности стенок детали и отклонения расположения ее конструктивных элементов, возникающие при сверхпластической формовке. Поэтому актуальными являются вопросы проектирования оптимальных заготовок и определения технологических параметров операции сверхпластической формовки.

Для снижения разнотолщинности применяют формовку в неравномерном температурном поле, реверсивную формовку, формовку с ограниченной вытяжкой, а также проводят предварительную подготовку заготовки [2].

При формовке в неравномерном температурном поле на участки заготовки, в которых должна быть уменьшена вытяжка, наносят специальное испаряющееся покрытие, которое охлаждает эти области. Для деформации «холодных» областей требуются большие напряжения течения, а, следовательно, вытяжка в этих областях уменьшается по сравнению с остальными участками заготовки.

Реверсивная формовка проводится в два этапа и применяется для предотвращения утонения в куполообразных деталях. На первом этапе инертный газ под давлением подается в одну полость формы, вызывая ее деформацию. При этом часть заготовки, в которой при обычной формовке наблюдается наибольшая вытяжка, контактирует с вкладышем. За счет сил трения вытяжка в месте контакта уменьшается, а формообразование происходит за счет вытяжки участков заготовки, не контактирующих с вкладышем. На втором этапе давление из первой части формы снимается, а газ подается в противоположную часть формы. В результате деформированный материал заготовки вытягивается в обратную сторону, что ведет к более равномерному формообразованию. При формовке с ограниченной вытяжкой используют переменную силу зажима заготовки. Вытягивание металла из-под определенных областей прижима при формовке приводит к уменьшению вытяжки в остальных частях заготовки.

Получить требуемую толщину стенок можно также путем предварительного добавления материала в зоны с чрезмерным утонением. Формообразование проводят обычным способом, а объем металла, который нужно добавить для получения равномерной толщины, определяется по результатам предварительного деформирования.

Технологический процесс изготовления тонкостенных и полых деталей, использующий операции сверхпластического формообразования

В зависимости от формы поверхности деталей, наличия полостей и внутреннего силового набора технологический процесс может состоять из различного набора технологических операций (см. рисунок 1). Так, например, технологический процесс изготовления элементов корпуса авиационного газотурбинного двигателя (ГТД) включает в себя только операцию сверхпластического формообразования (СПФ). Технологический процесс изготовления стойки корпуса компрессора включает операции диффузионной сварки и СПФ. А при изготовлении полых лопатки, технологический процесс включает в себя еще и операцию изотермической штамповки, необходимую для придания нужного угла закрутки перу лопатки перед СПФ.

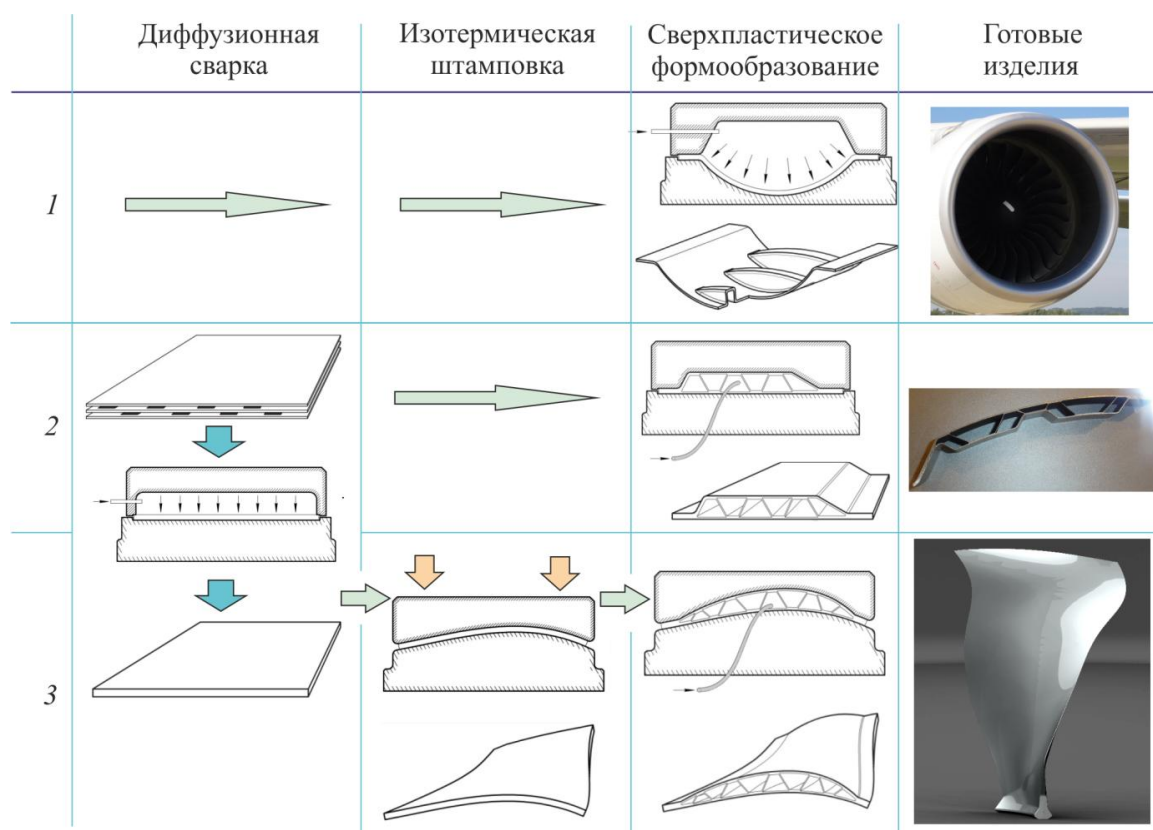


Рисунок 1. Схема применения операций диффузионной сварки, изотермической штамповки и сверхпластической формовки для различных деталей ГТД:
1 – детали оболочечного типа; 2 – детали с внутренним силовым набором;
3 – детали сложной формы с внутренним силовым набором

При разработке технологических процессов необходимо решить ряд задач: выбор штампового оборудования, проектирование заготовок и матриц штампов, определение параметров технологических операций.

Выбор оборудования осуществляется с точки зрения обеспечения необходимых рабочих усилий, скорости движения штампов и условий эксплуатации. Формы поверхностей матриц штампов на окончательных операциях повторяют формы поверхностей детали с учетом припусков на обработку и доводочные операции. Однако их конструкция влияет на механику процесса деформирования.

Проектирование заготовки нужно осуществить таким образом, чтобы после формообразующих и доводочных операций получилась деталь, максимально соответствующая заданным конструкторским требованиям. При этом, из-за сложности течения металла, необходимо использование специальных подходов к процессу проектирования заготовок, которые основаны на численном моделировании операций изотермической штамповки и сверхпластической формовки.

Математическое моделирование операций изотермической штамповки и сверхпластической формовки

Применение методов математического моделирования позволяет определить параметры операций изотермической штамповки и сверхпластического формообразования в рамках единого технологического процесса, а также решить задачу проектирования заготовок полых и тонкостенных деталей и штамповой оснастки.

При описании сверхпластического поведения материала применена следующая зависимость:

$$\sigma = K\varepsilon^n \dot{\varepsilon}^m, \quad (1)$$

где: σ – напряжение течения; ε – деформация; K – постоянная материала; m – параметр скоростной чувствительности материала; n – параметр деформационного упрочнения.

Параметр m обычно находится в диапазоне от 0,4 до 0,9, а эффект сверхпластичности наблюдается при скоростях деформации $\dot{\varepsilon}$ порядка $10^{-4} \dots 10^{-3} \text{ с}^{-1}$.

При моделировании параметр скоростной чувствительности m задавался постоянным и соответствовал оптимальной скорости деформации, при которой эффект сверхпластичности наиболее выражен. Для расчетов были приняты следующие параметры титанового сплава ВТ6: $m = 0,47$; $n = 0$; $K = 645$; оптимальная скорость деформации $\dot{\varepsilon}_{opt} = 2 \cdot 10^{-4} \text{ с}^{-1}$ [3].

При моделировании изотермической штамповки применена зависимость напряжений течения σ от деформации ε и скорости деформации $\dot{\varepsilon}$ при заданной температуре T :

$$\sigma = \sigma(T, \varepsilon, \dot{\varepsilon}). \quad (2)$$

Таким образом, математическая модель операций изотермической штамповки и сверхпластической формовки состоит из:

- модели материала (1), описывающей напряженно-деформированное состояние детали во время формовки (процесс СПФ рассматривается как изотермический);
- модели материала (2), описывающей напряженно-деформированное состояние во время изотермической штамповки;
- модели контактного взаимодействия с учетом трения, возникающего между заготовкой и штамповой оснасткой, которая рассматривается в виде набора абсолютно твердых тел;
- граничных условий, задаваемых таким образом, чтобы исключить перемещения заготовок, как жесткого целого, и отвечающих первоначальному позиционированию заготовок в штамповой оснастке;
- геометрических моделей заготовок.

Уменьшение разнотолщинности при изготовлении кольца воздухозаборника

Одним из дефектов, возникающих при применении операций сверхпластического формообразования, является разнотолщинность стенок деталей. На рисунке 2 показано распределение толщин модели кольца воздухозаборника, изготовленного методом СПФ с применением ограниченной вытяжки. Заготовка имеет постоянную толщину, равную 6,5 мм. Как видно из рисунка 2, готовая деталь будет иметь резкое утонение (до 3 мм) на внутреннем диаметре.

Увеличение толщины заготовки приводит к большей выраженности этого дефекта. На рисунке 3 показаны графики изменения толщины стенки кольца воздухозаборника, изготовленного методом СПФ с применением ограниченной вытяжки, при исходной толщине

заготовки 6,5 мм и 8,5 мм.

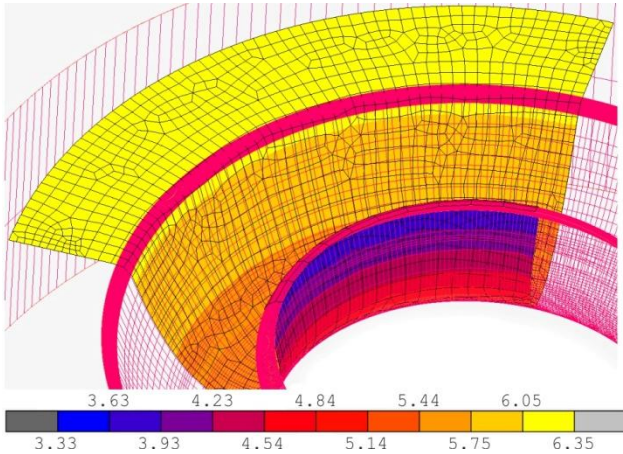


Рисунок 2. Распределение толщины (мм) стенки кольца воздухозаборника при постоянной толщине заготовки 6,5 мм

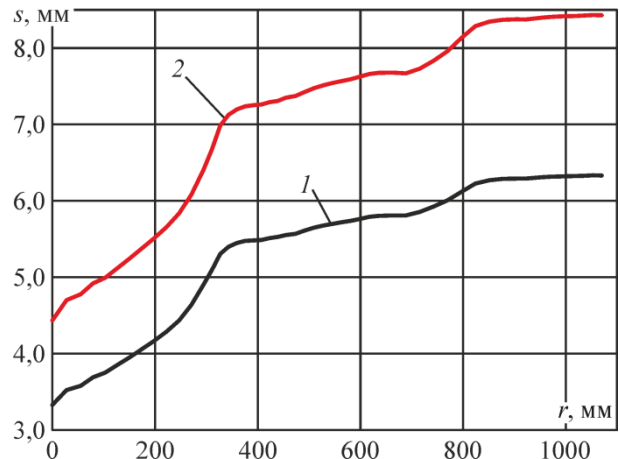


Рисунок 3. Распределение толщины стенки кольца воздухозаборника по радиусу при толщине заготовки: 1 – 6,5 мм; 2 – 8,5 мм

Видно, что метод ограниченной вытяжки дает достаточно равномерное распределение толщины на большей части полуфабриката, однако из-за особенности формы детали возникает чрезмерный перепад толщин в локальной области. Для уменьшения этого дефекта применена комбинация ограниченной вытяжки и предварительной подготовки заготовки. Для определения неравномерного распределения толщины исходной заготовки использован метод оптимального проектирования. Различные схемы параметризации модели заготовки показаны на рисунке 4, а-в. Распределения толщины стенки кольца воздухозаборника по радиусу для исходной заготовки (с постоянной толщиной) и для заготовок оптимальной формы показаны на рисунке 4, г.

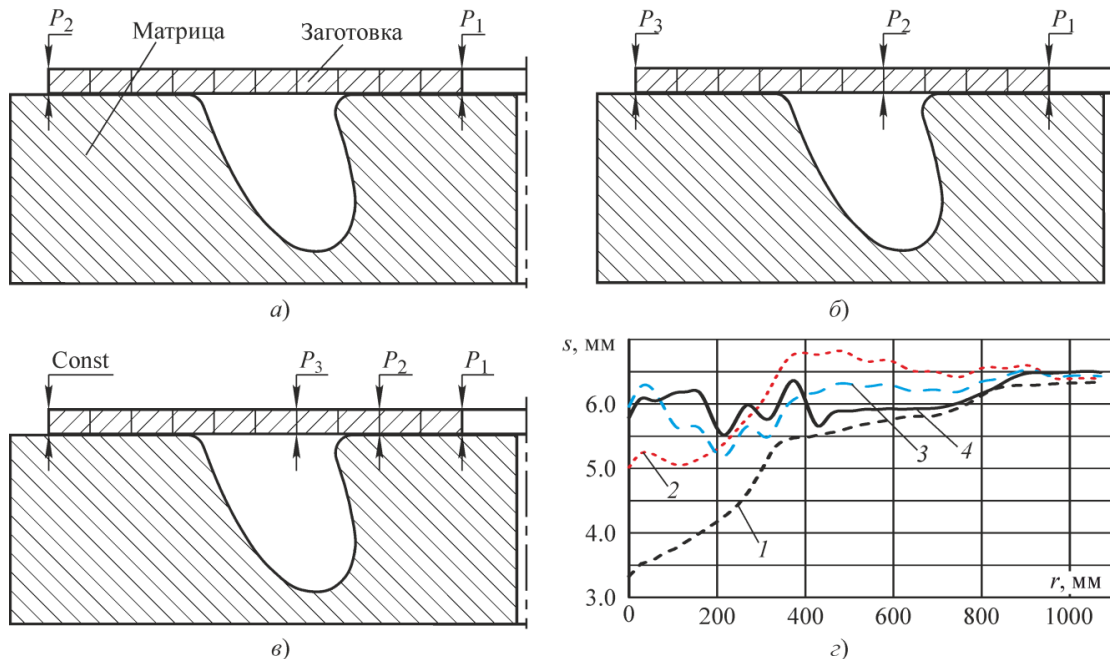


Рисунок 4. Схемы параметризации (а-в) и распределение толщины стенки кольца воздухозаборника по радиусу (г): а – два параметра; б – три параметра; в – три параметра с уточнением; 1 – постоянная толщина заготовки 6,5 мм; 2 – оптимизация толщины заготовки по двум параметрам; 3 – оптимизация толщины заготовки по трем параметрам (базовый вариант); 4 – оптимизация толщины заготовки по трем параметрам (итоговый вариант)

Как видно из рисунка 4,з, при увеличении количества параметров разнотолщинность стенки кольца воздухозаборника уменьшается. При применении схемы параметризации с тремя параметрами, которая показана на рисунке 4,б, выявлено, что параметр P_3 в процессе оптимизации изменяется в пределах 0,1 мм. Поэтому была предложена новая трехпараметрическая схема, показанная на рисунке 4,в, а значение P_3 было задано постоянным и равным 6,5 мм. Это позволило получить более точное решение задачи оптимизации заготовки (см. графики на рисунке 4,з).

При решении задачи поиска применен алгоритм оптимизации SQP, позволяющий получить оптимальное решение при меньшем количестве итераций. Целевой функцией являлось среднеквадратичное отклонение толщины стенки полуфабриката после сверхпластического формообразования от заданной толщины (6 мм). Контролируемые параметры приведены на рисунке 5.

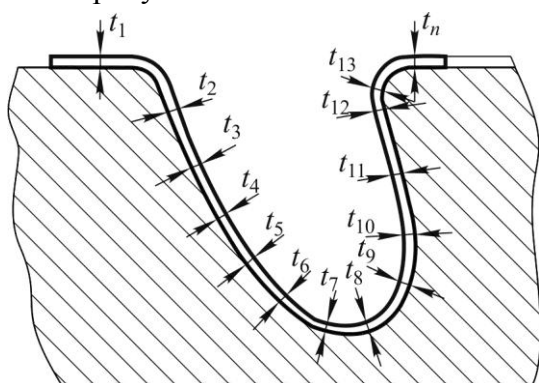


Рисунок 5. Схема расположения контролируемых параметров толщины стенки кольца воздухозаборника

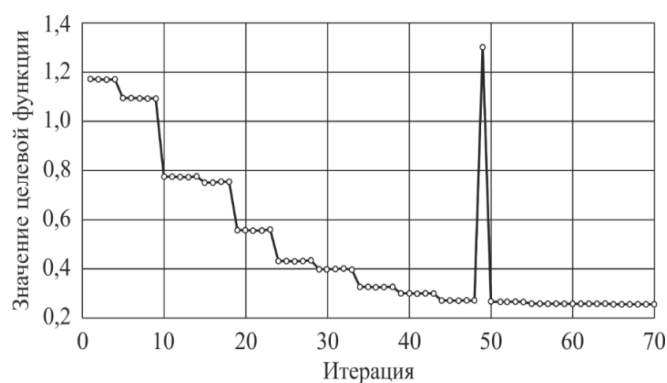


Рисунок 6. Изменение значения целевой функции при оптимизации заготовки кольца воздухозаборника по трем уточненным параметрам

График изменения значения целевой функции при оптимизации заготовки кольца воздухозаборника по трем уточненным параметрам приведен на рисунке 6. Распределение толщины стенки кольца воздухозаборника показано на рисунке 7, законы подачи давления – на рисунке 8.

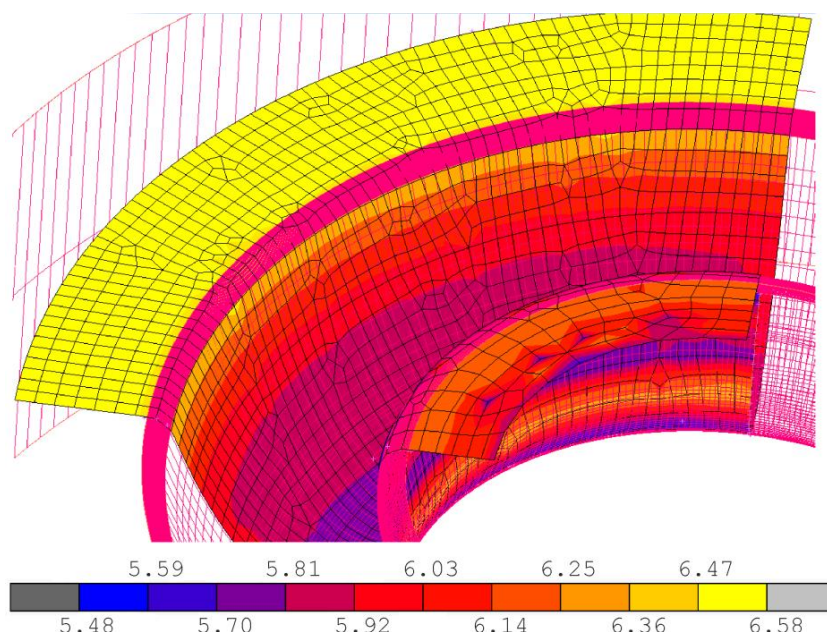


Рисунок 7. Распределение толщины (мм) стенки кольца воздухозаборника при оптимизации заготовки по трем уточненным параметрам

При сверхпластической формовке для поддержания состояния металла, при котором сверхпластичность наиболее выражена, необходимо соблюдать постоянную скорость деформации, зависящую от материала заготовки. Для титанового сплава ВТ-6 $\dot{\epsilon} \sim 0,0002$. Поддержание постоянной скорости деформации осуществляют за счет изменения величины давления инертного газа, подаваемого в рабочую зону матриц штампов или во внутренние полости пакета. На скорость деформации также влияет толщина стенок заготовки и их контакт с поверхностями матриц штампов.

На рисунке 8 представлены графики законов подачи давления инертного газа при формовке разных заготовок. Как видно из представленных данных, формовка заготовки, оптимизированной по трем уточненным параметрам, занимает больше времени, однако величина давления меньше, чем при формовке заготовки постоянной толщины 8,5 мм. Это обусловлено более равномерным распределением деформаций по радиусу заготовки.

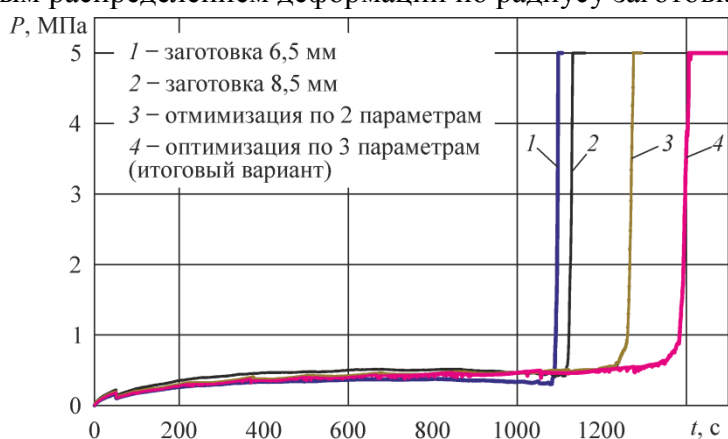


Рисунок 8. Законы приложения давления при сверхпластической формовке для разных вариантов заготовок

Проектирование заготовки для полый лопатки вентилятора

При разработке технологического процесса изготовления полый лопатки вентилятора необходимо решить несколько задач: проектирование заготовки, проектирование штамповой оснастки, назначение режимов работы оборудования. Решение этих задач представляет собой решение обратной задачи проектирования. Задачи следует рассматривать в комплексе, так как они оказывают влияние друг на друга. Алгоритм решения обратной задачи можно представить в виде схемы, показанной на рисунке 9. Основным критерием решения обратной задачи считалось совпадение с заданной точностью формы внешних поверхностей и внутреннего силового набора исходной (заданной конструкторскими чертежами) и изготовленной деталей.



Рисунок 9. Схема решения обратной задачи проектирования

Технологический процесс изготовления полой лопатки вентилятора содержит следующие ключевые операции: диффузионная сварка листов, закрутка пера лопатки, раздача в условиях сверхпластичности.

Перед диффузионной сваркой листы, образующие заготовку полой лопатки, предварительно обрабатывают, придавая им необходимую толщину как в продольном, так и поперечном направлении. Поэтому одним из этапов создания технологического процесса изготовления полой лопатки вентилятора является определение толщин листов исходной заготовки.

Закрутку пера лопатки осуществляют с помощью операции изотермической штамповки. При этом необходимо спроектировать штамповую оснастку, которая позволит получить необходимую закрутку пера без уводов и смещений оси закрутки, без разрушения заготовки и переформовки.

При раздаче в условиях сверхпластичности происходит формирование внутреннего силового набора и окончательное формообразование наружных поверхностей пера лопатки перед доводочными операциями. Внешний вид внутреннего силового набора показан на рисунке 10.

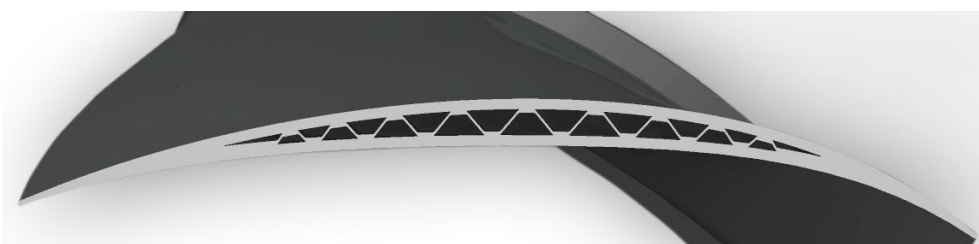
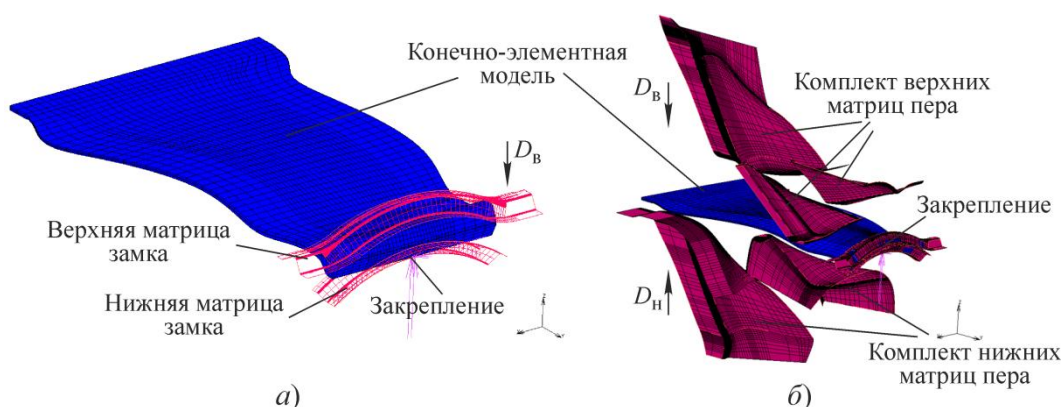


Рисунок 10. Сечение полой лопатки с внутренним силовым набором

Определение толщин листов, контуров заготовки и создание моделей штамповой оснастки выполнено в трехмерной постановке, что позволило изучить механику процесса деформирования и наиболее точно подобрать заготовку, форму матриц штампа и параметры операций.

Изотермическую штамповку проводят в два этапа: формообразование замка и гибка-закрутка пера лопатки. Такой подход позволяет проводить закрепление (базирование) полуфабриката на последующих операциях формообразования. Гибку-закрутку пера проводят постепенно удаляясь от замка, что позволяет избежать «увода» заготовки. Расчетные схемы приведены на рисунке 11, где D_B и D_H – направления движения верхнего и нижнего штампов, соответственно.



**Рисунок 11. Расчетная схема моделирования операции изотермической штамповки:
а – формовка замка; б – формовка пера**

На рисунке 12 показаны конструкция матриц штампов и контуры различных вариантов заготовок.

Определение расположения зон сварки и защитного покрытия выполнено по сечениям в двухмерной постановке, что позволило снизить затраты машинного времени при сохране-

нии достаточной точности. Расчетная схема приведена на рисунке 13 (h_t и h_b – величина хода верхнего и нижнего штампа, D_t и D_b – направление движения верхнего и нижнего штампа, соответственно).

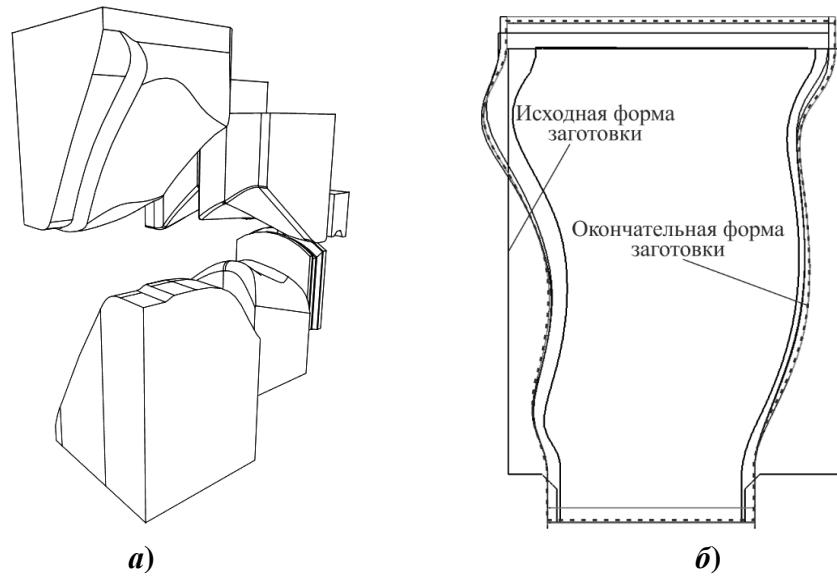


Рисунок 12. Модель штамповой оснастки (а) и контуры вариантов заготовок (б)

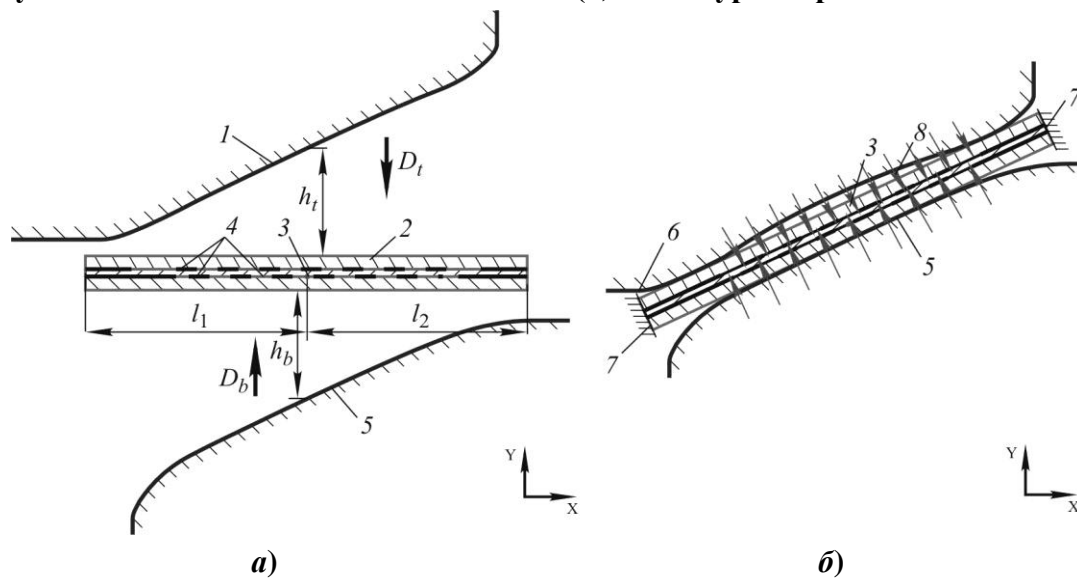


Рисунок 13. Расчетная схема моделирования операций изотермической штамповки (а) и сверхпластической формовки (б) для полый лопатки вентилятора в 2D постановке: 1 – верхняя матрица; 2 – заготовка; 3 – точка вращения; 4 – зоны сварки; 5 – нижняя матрица; 6 – верхняя матрица для СПФ; 7 – заделка; 8 – внутреннее давление

Так как нижний лист заготовки контактирует с нижней матрицей штампа, положение зон сварки нижнего и среднего листов остается неизменным. Поэтому их с достаточной точностью можно определить поворотом сечения модели вокруг точки, через которую проходит ось закрутки пера.

Расположение зон сварки верхнего и среднего листов в первом приближении можно определить исходя из принципа сохранения объема при формообразовании. Для двухмерной задачи площади защищенных зон и зон сварки верхнего и среднего листа на заготовке и после деформации будут равны. Параметризация модели приведена на рисунке 15. Большое количество параметров (18) не позволяет напрямую применить алгоритмы оптимизации, из-за больших затрат машинного времени. Поэтому было проведено параметрическое исследование и определено расположение зон сварки и защитного покрытия, позволяющее получить

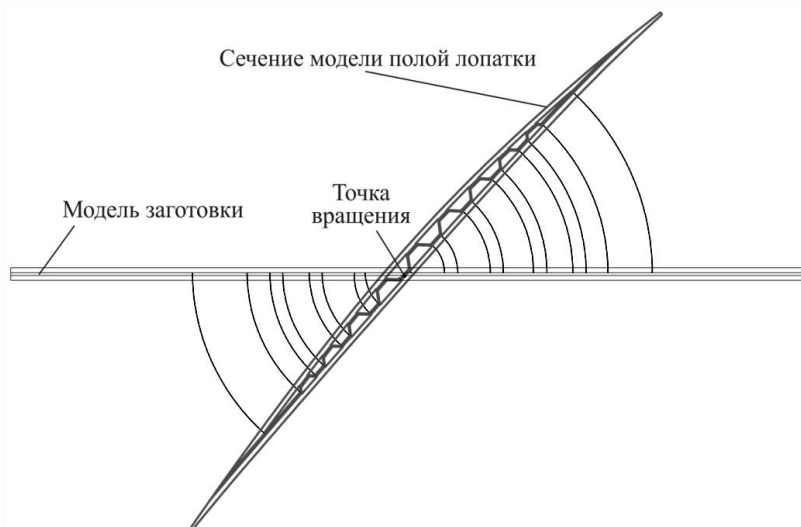


Рисунок 14. Схема для определения расположения зон сварки нижнего и среднего листа заготовки полый лопатки вентилятора

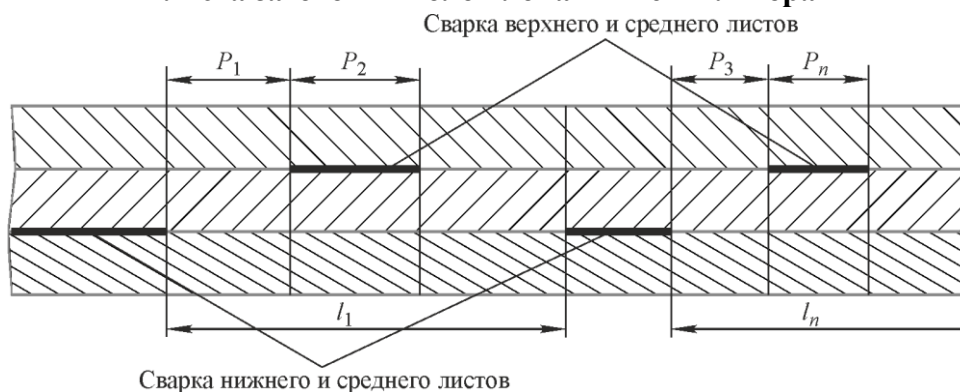


Рисунок 15. Схема параметризации на фрагменте сечения заготовки полый лопатки для нахождения зон сварки верхнего и среднего листов:

$P_1, P_2, P_3 \dots P_n$ – изменяемые параметры; l_1, l_n – неизменяемые параметры

Целевой функцией являлось среднее квадратичное отклонение положений зон сварки среднего и верхнего листов от положения, полученного из геометрической модели полый лопатки. Как видно из рисунка 16, расположение полученного внутреннего силового набора достаточно точно соответствует требуемому. Среднее квадратичное отклонение расположения зон сварки верхнего и среднего листов составило 0,43 мм.

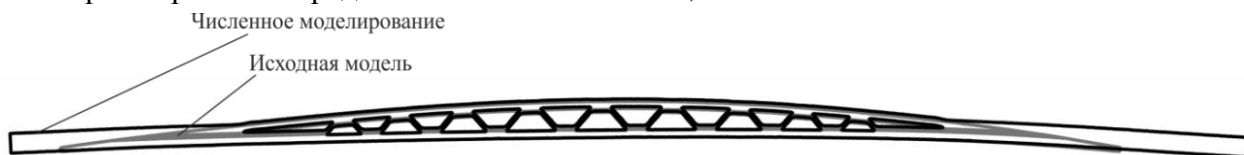


Рисунок 16. Сравнение сечений геометрической и расчетной моделей полый лопатки

При переносе найденных геометрических размеров зон сварки листов (в двухмерных сечениях) на заготовку, следует учитывать возможное течение металла в продольном направлении (рисунок 17), которое будет оказывать влияние на реальное расположение силового набора в детали или полуфабрикате. Как видно из представленных графиков течение металла вдоль пера лопатки усиливается по мере удаления от замка.

Схема нанесения точек сварки среднего листа полый лопатки показана на рисунке 18. Определенные в результате двухмерного численного моделирования точки начала и конца зон сварки по сечениям с учетом перемещений (рисунок 17), переносятся на модель заготов-

ки полый лопатки, контуры и остальные параметры которой были определены в ходе моделирования операции изотермической штамповки.

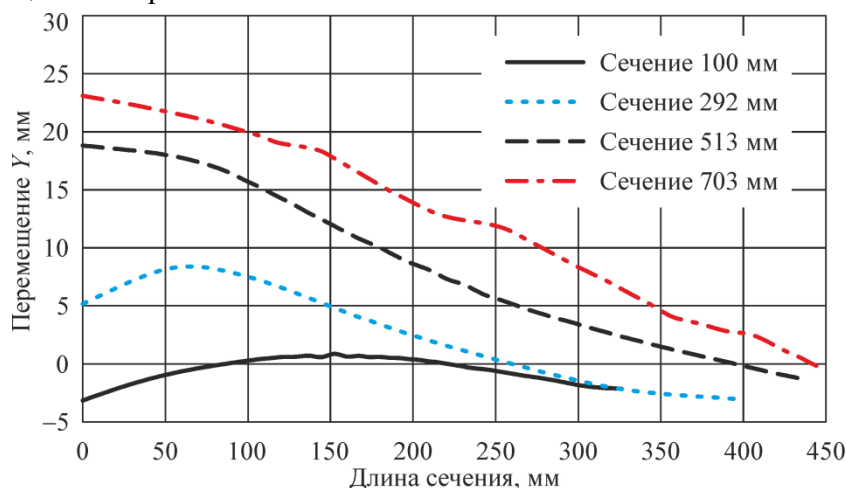


Рисунок 17. Перемещения узлов элементов по длине сечения после моделирования изотермической штамповки пера

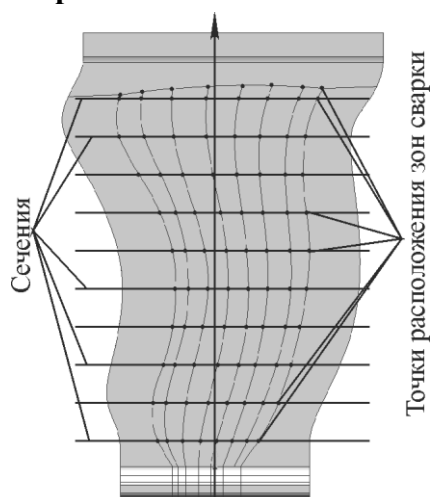


Рисунок 18. Схема нанесения внутреннего силового набора на модель заготовки полый лопатки

Выводы

Предложенная методика математического моделирования операций сверхпластической формовки позволяет проектировать заготовки для тонкостенных деталей оболочечного типа. Оптимизация формы заготовки позволила изготовить деталь с малым показателем разнотолщинности.

Применение методов математического моделирования при решении обратной задачи проектирования заготовок для полых деталей с внутренним силовым набором позволило определить их параметры с требуемой точностью.

Литература

1. Serra D. Superplastic forming applications on aero engines. A review of ITP manufacturing processes. 6th EUROSPF Conference, Carcassonne, France, 3–5 September, 2008.
2. Чумаченко Е.Н., Смирнов О.М., Цепин М.А. Сверхпластичность: материалы, теория, технологии. Изд. 2-е, М.: Книжный дом «ЛИБРОКОМ», 2009. – 320 с.
3. Васин Р.А., Еникеев Ф.У. Введение в механику сверхпластичности: В 2 ч. Ч. II. – Уфа: Гилем, 1999. – 626 с.