

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ОПЕРАЦИЙ ИЗОТЕРМИЧЕСКОЙ ШТАМПОВКИ И СВЕРХПЛАСТИЧЕСКОЙ ФОРМОВКИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ПОЛОЙ ЛОПАТКИ ВЕНТИЛЯТОРА

Ю. М. Темис¹, А. П. Худяков²

¹tejoum@ciam.ru

¹ Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана (МГТУ)

^{1,2} ФГУП «Центральный институт авиационного моторостроения имени П. И. Баранова»
(ФГУП «ЦИАМ им. П. И. Баранова»)

Поступила в редакцию 1 июля 2015 г.

Аннотация. Рассмотрен процесс математического моделирования операций изотермической штамповки и сверхпластической формовки полой лопатки вентилятора авиационного двигателя с целью создания ее заготовки, определения режимов работы оборудования, выявления возможных дефектов.

Ключевые слова: полая лопатка вентилятора; изотермическая штамповка; сверхпластическая формовка, обратная задача проектирования.

Одним из эффективных методов снижения массы авиационного газотурбинного двигателя (ГТД) является применение полых и тонкостенных деталей, в т. ч. и лопаток вентилятора (рис. 1, а). Такие лопатки, помимо сложной формы поверхности пера, имеют внутренние полости, совмещенные с силовым набором (рис. 1, б). За счет внутреннего силового набора достигается необходимая жесткость лопатки, снижается ее масса. Для изготовления такой лопатки применяют технологический процесс, сочетающий диффузионную сварку, изотермическую штамповку и сверхпластическую формовку (рис. 2).

При диффузионной сварке предварительно подготовленные листы титана соединяют в единый блок (пакет). В зависимости от типа внутреннего силового профиля применяют трехлистные (для V-образного профиля) и четырехлистные (для X-образного профиля) пакеты (рис. 3) [1, 2]. Наружные листы, после всех формообразующих операций формируют наружные поверхности пера лопатки, а внутренние листы – силовой набор, за счет чередования сваренных и не сваренных участков, определение расположения и длин этих участков является одной из задач, которые необходимо решить при проектировании заготовки для этой детали.

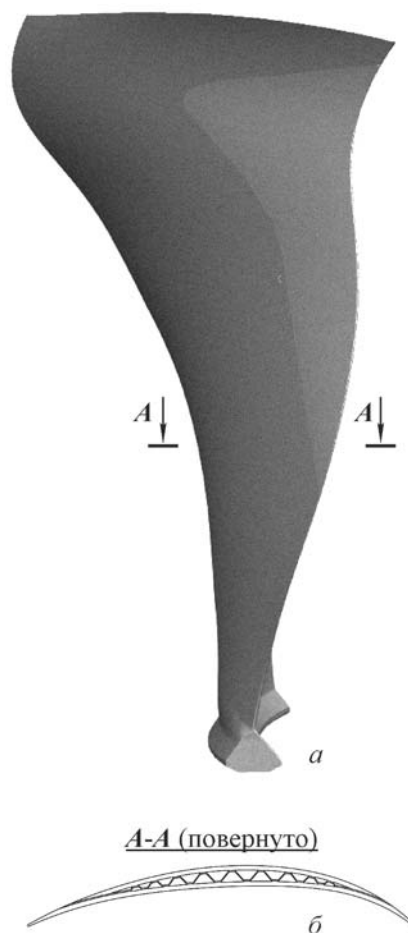


Рис. 1. Геометрическая модель лопатки вентилятора

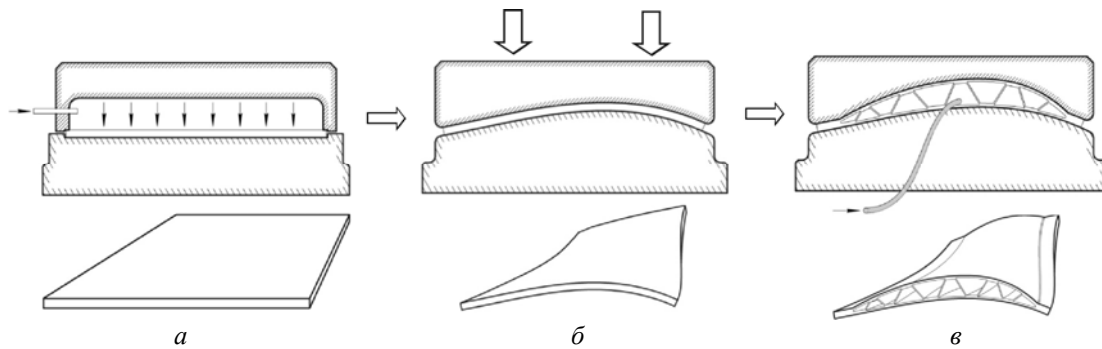


Рис. 2. Основные операции, применяемые при изготовлении полой лопатки вентилятора:
a – диффузионная сварка; *б* – изотермическая штамповка;
в – сверхпластическая формовка

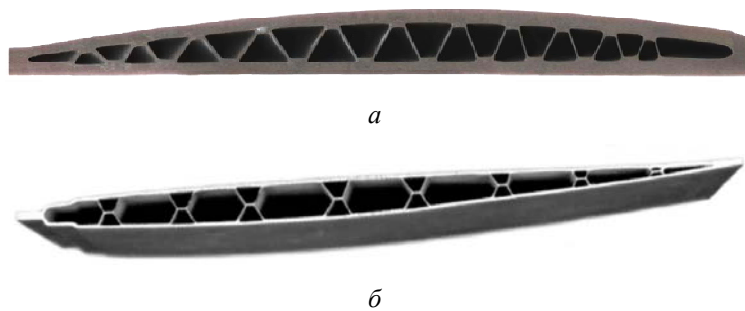


Рис. 3. Сечения полых деталей с разными типами силового набора:
a – V-образный; *б* – X-образный

Операцию изотермической штамповки (ИШ) проводят для придания перу лопатки необходимой закрутки, а также формирования поверхности корыта лопатки, которая не будет изменена на последующих операциях. Операцию изотермической штамповки проводят при температуре, соответствующей фазовому переходу в твердом теле ~ 820 °С, за счет чего происходит увеличение пластичности и требуются меньшие усилия деформирования, по сравнению со штамповкой в холодном состоянии. Операцию проводят на тихоходных гидравлических прессах. При этом важно правильно определить параметры операции и механику деформирования, чтобы избежать разрушения заготовки и отклонений оси закрутки от заданной.

Во время сверхпластической формовки (СПФ) за счет давления, создаваемого инертным газом, подаваемого внутрь полуфабриката с некоторым давлением, закон изменения которого следует установить при проектировании технологического процесса. При этом, происходит раздача конструкции и образование внутреннего силового набора и полостей. Эта операция основана на явлении сверхпластичности металлов, наблюдаемом при нагреве образцов, обладающих мелкозернистой структурой,

до температуры $0.4 \dots 0.5 T_{\text{пл}}$, при низких скоростях деформации ($\dot{\epsilon} = 10^{-5} \dots 10^{-1} \text{ с}^{-1}$).

При проектировании технологического процесса изготовления полой лопатки вентилятора необходимо решить обратную задачу проектирования, включающую:

- проектирование штамповой оснастки;
- проектирование заготовки;
- определение параметров операций.

Целью решения этих задач является проектирование таких заготовок, штамповой оснастки и параметров операций, чтобы получить деталь, минимально отклоняющуюся от конструкторского чертежа.

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ОПЕРАЦИЙ ИЗОТЕРМИЧЕСКОЙ ШТАМПОВКИ И СВЕРХПЛАСТИЧЕСКОЙ ФОРМОВКИ

Изотермическая штамповка. Изотермическая штамповка – вид обработки металлов давлением в нагретом состоянии. Различают низкотемпературную (до ~ 500 °С) и высокотемпературную (свыше 500 °С) изотермическую штамповку. Высокотемпературную

изотермическую штамповку применяют для получения поковок и формообразования труднообрабатываемых титановых сплавов, никелевых сплавов, бронз и др. Эта операция проводится при нагреве как заготовок, так и штампов до температур, близких к температурам горячей штамповки. Операция выполняется на тихоходных прессах, со скоростью движения штампов до 0,5 м/с, и обладает, по сравнению с другими видами обработки давлением, рядом преимуществ:

- равномерное распределение температуры по сечению поковки;
- меньшее значение силы деформирования;
- большая пластичность материала (по сравнению с обработкой в холодном состоянии);
- однородность деформации.

Эти преимущества положительно влияют как на процесс, так и на однородность структуры металла. Меньшие силы деформирования, по сравнению с деформированием в обычном состоянии позволяют использовать менее мощное штамповое оборудование. Недостатками данного метода обработки давлением являются: низкая производительность процесса, вызванная низкими скоростями деформирования, и сильный износ штампов, вызванный условиями их работы.

Математическая модель операции изотермической штамповки. При изотермической штамповке напряжения течения, деформации, скорость деформации при заданной температуре связаны зависимостью

$$\sigma = \sigma(T, \varepsilon, \dot{\varepsilon}). \quad (1)$$

Параметры материала поковки выбраны из справочной литературы для сплава ВТ6 или его зарубежного аналога Ti-6Al-4V.

При математическом моделировании операции упругими свойствами матриц штампов в целях ускорения вычислительных операций и снижения затрат машинного времени было решено пренебречь, материал матриц штампов рассмотрен как абсолютно твердое тело.

Учет влияния трения на процесс формообразования при изотермической штамповке между заготовкой и инструментом проведен по условию Амонтона–Кулона, при котором напряжение контактного трения при проскальзывании прямо пропорционально нормальному напряжению [3]. Этот закон можно выразить соотношением:

$$\bar{\tau}_m = k |\bar{\sigma}_N|, \quad (2)$$

где $\bar{\tau}_m$ – вектор касательного напряжения на поверхности контакта; $\bar{\sigma}_N$ – вектор нормального напряжения на поверхности контакта; k – коэффициент трения, принято $k = 0,1$.

Сверхпластическая формовка (СПФ). В основе операции СПФ лежит явление сверхпластичности материалов, заключающееся в возможности воспринимать большие деформации (до 1000 %) без разрушения, при определенных температурно-скоростных параметрах процесса и структуре материала. При мелкозернистой структуре и температурах, близких к $0,4 \dots 0,5 T_{пл}$, а также скоростях деформации $10^{-5} \dots 10^{-1} \text{ с}^{-1}$ в большей или меньшей степени такой способностью обладает множество сплавов (структурная сверхпластичность). При применении этого явления при формообразующих операциях технологического процесса необходимо, чтобы материал, на протяжении всей операции, сохранял постоянную мелкозернистую структуру, в противном случае, при росте зерна показатели сверхпластичности будут ухудшаться, что приведет к неравномерности деформации.

Использование формообразующих операций, основанных на явлении сверхпластичности, обладает рядом достоинств:

- делает возможным получение деталей сложной формы, за счет высокой деформационной способности;
- позволяет снизить напряжения течения, а за счет этого и мощность оборудования;
- позволяет повысить коэффициент использования материала (КИМ) и снизить трудоемкость обработки.

С конструкторско-технологической точки зрения основной особенностью, усложняющей применение явления сверхпластичности, наряду с низкой производительностью, является разнотолщинность стенок изделия после формообразования, вызванной механикой процесса течения металла при деформации. Силы трения, возникающие при контакте поверхностей стенок заготовки с поверхностями матриц штампов, препятствуют течению металла в местах контакта, что влечет за собой усиление течения металла в местах, еще не вступивших в контакт с матрицами штампа.

Для снижения влияния этой особенности на готовое изделие применяют следующие способы: предварительное профилирование заготовки, формовка в неравномерном температурном поле, формовка с ограниченной вытяжкой и др. При этом целесообразно применение методов математического моделирования и оптимального проектирования, объединяя в единый комплекс конечно-элементный решатель и алгоритмы оптимизации.

Математическая модель сверхпластической формовки (СПФ). При математическом моделировании сверхпластическое поведение материала описывают следующим соотношением:

$$\sigma = K \varepsilon^n \dot{\varepsilon}^m, \quad (3)$$

где K – постоянная материала; m – параметр скоростной чувствительности; n – параметр деформационного упрочнения. Параметр скоростной чувствительности задан постоянным, найденным при оптимальной скорости деформации, при которой наиболее выражен эффект сверхпластичности. Для расчетов были приняты следующие параметры: оптимальная скорость деформации $\dot{\varepsilon}_{opt} = 2 \cdot 10^{-4} \text{ с}^{-1}$, $m = 0,47$, $n = 0$, $K = 645$, эти параметры получены при испытании образцов из сплава ВТ6 при температуре $923 \text{ }^\circ\text{C}$ [4].

Влияние трения между поверхностями матриц штампов и заготовки учитывалось также, как при моделировании операции изотермической штамповки – соотношением

(2). Упругими свойствами материала матриц штампов также было решено пренебречь, и штампы рассматривались как твердое тело.

Таким образом, математические модели операций изотермической штамповки и сверхпластической формовки состоят из:

- соотношений (1) и (3), описывающих поведения материала при обработке;
- геометрических и конечно-элементных моделей заготовок;
- геометрических моделей матриц штампов;
- граничных условий, задаваемых таким образом, чтобы исключить перемещения заготовок, как жесткого целого, и отвечающих первоначальному позиционированию заготовок. При моделировании операции сверхпластической формовки давление задавалось направленным по нормали к поверхностям конечно-элементной модели;
- модели контактного взаимодействия с учетом трения, возникающего между заготовкой штамповой оснасткой, которая рассмотрена, как набор абсолютно твердых тел.

Критерий оптимальности давления. Для обеспечения оптимальных показателей сверхпластичности материала в процессе формообразования необходимо соблюдать определенный режим подачи давления, такой, при котором соблюдается соотношение $\dot{\varepsilon}_{opt} = 2 \cdot 10^{-4} \text{ с}^{-1}$. Реальным условиям наиболее соответствует давление,

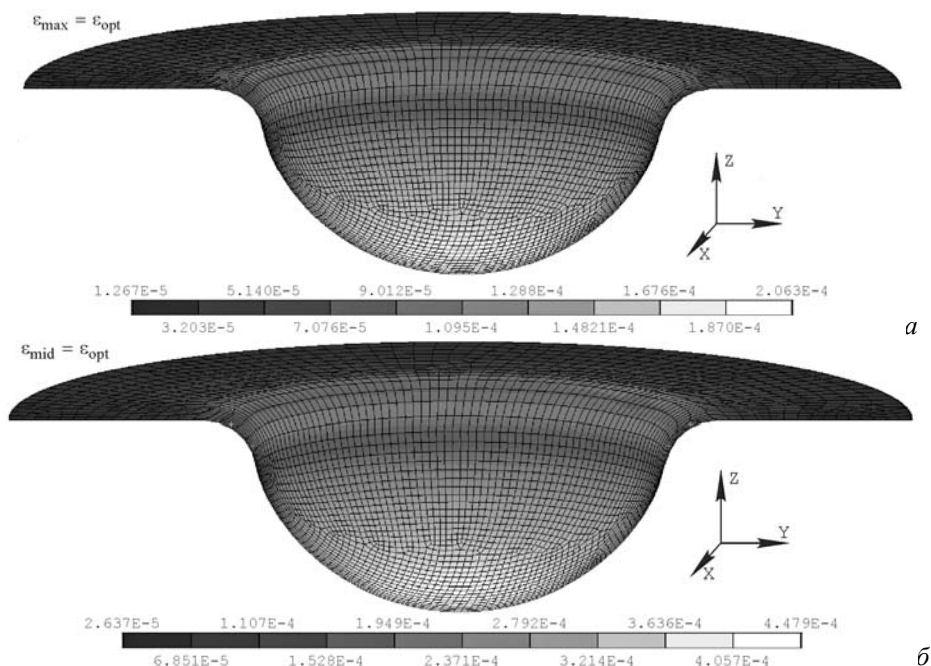


Рис. 4. Распределение эквивалентных скоростей деформаций в модели куполообразной заготовки в одинаковые моменты СПФ: *a* – условие равенства максимальной и оптимальной скоростей деформации; *б* – условие равенства средней и оптимальной скоростей деформаций

определяемое из критерия:

$$\dot{\varepsilon}_{\max} = \dot{\varepsilon}_{\text{opt}}, \quad (4)$$

где $\dot{\varepsilon}_{\max}$ – максимальная скорость деформации в заготовке. При определении оптимального давления из соотношения (4) в процессе моделирования операции СПФ требуются значительные затраты машинного времени, что особенно важно при моделировании операции в трехмерной постановке. Уменьшить затраты машинного времени можно при использовании следующего критерия, для определения оптимального давления:

$$\dot{\varepsilon}_{\text{mid}} = \dot{\varepsilon}_{\text{opt}}, \quad (5)$$

где $\dot{\varepsilon}_{\text{mid}}$ – средняя скорость деформации в заготовке. При использовании критерия (5) давление, обеспечивающее потоянную среднюю скорость деформации в заготовке, равной оптимальной скорости, подается значительно быстрее и достигает больших величин, что приводит к увеличению максимальной скорости деформации, наблюдаемой в теле заготовки, соответственно, зоны, в которых локализованы максимальные скорости деформации, в реальной операции, будут выходить из режима сверхпластичности и деформироваться по-другому. Однако срав-

нение распределения скоростей деформаций (рис. 4) в одинаковые моменты формовки для разных критериев показывает, что они распределены идентично, отличны только величины скоростей деформации. Также, идентично распределены пластические деформации (рис. 5), и толщины (рис. 6). Представленные распределения эквивалентных пластических деформаций (рис. 5), распределение толщин по радиусу (рис. 6), а также графиков подачи давления (рис. 7), на примере СПФ куполообразной заготовки в свободную форму позволяют сделать вывод о целесообразности применения критерия (5) для уменьшения необходимого количества машинного времени при моделировании операции СПФ.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОНТУРОВ ЗАГОТОВКИ И МОДЕЛЕЙ МАТРИЦ ШТАМПОВ

При изготовлении полый лопатки на операции изотермической штамповки происходит гибка-закрутка пера лопатки. При этом, на механизм формообразования будет влиять множество факторов, таких как форма и количество матриц штампов, толщины листов заготовки, порядок воздействия матриц на заготовку. Таким образом, при математи-

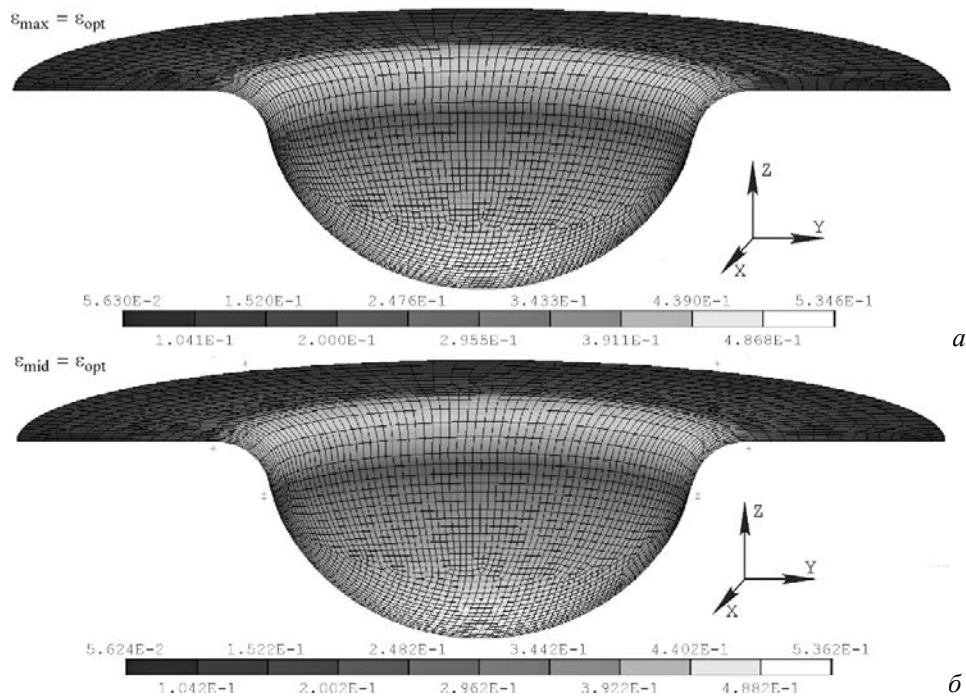


Рис. 5. Распределение эквивалентных деформаций в модели куполообразной заготовки в одинаковые моменты СПФ: *a* – условие равенства максимальной и оптимальной скоростей деформации; *б* – условие равенства средней и оптимальной скоростей деформаций

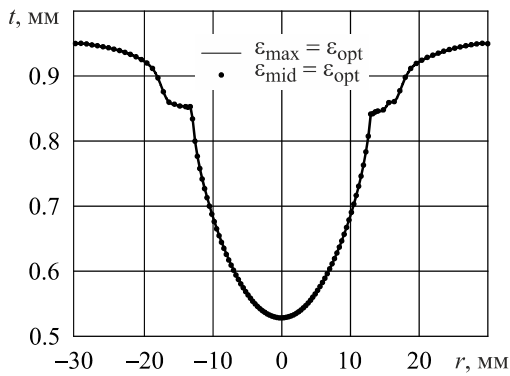


Рис. 6. Сравнение толщин элементов по радиусу поковки куполообразной формы при разных критериях подбора оптимального давления

ческом моделировании изотермической штамповки необходимо одновременно решить следующие основные задачи: спроектировать матрицы штампа, спроектировать заготовку.

При проектировании матриц штампа рассмотрены их варианты (рис. 8). После серии численных экспериментов, с целью уменьшения отклонений поверхности корыта и оси закрутки от заданных, выбран вариант с последовательной формовкой от замка к концу пера лопатки (рис. 8, в). Расчетная схема, используемая при численном эксперименте приведена на рис. 9; 1 – конечно-элементная модель заготовки лопатки; 2 – закрепление; 3 – нижняя матрица замкового штампа; 4 – верхняя матрица замкового штампа; 5 – комплект верхней матриц верхней части пера лопатки; 6 – комплект нижних матриц пера лопатки; D_v – направление движения верхнего штампа; D_n – направление движения нижнего штампа.

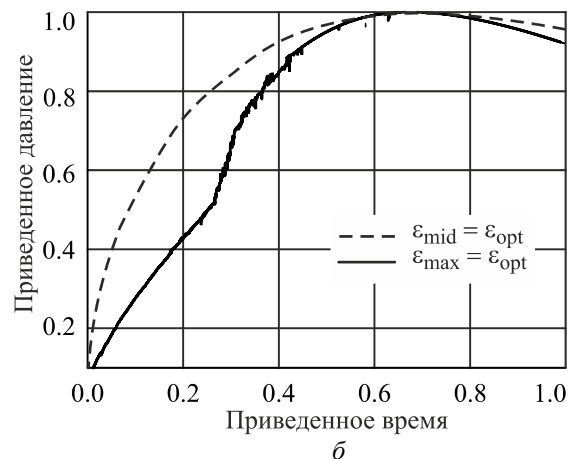
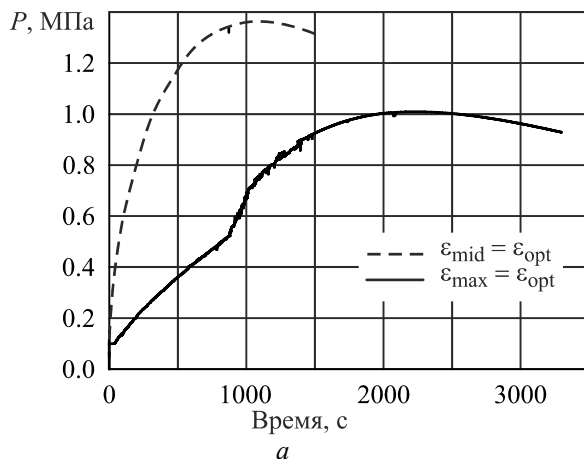


Рис. 7. Сравнение законов подачи давлений при разных критериях скорости деформации: а – в реальной масштабе; б – в приведенном масштабе по времени и давлению

При численном эксперименте применена конечно-элементная модель с регулярной сеткой элементов. Численный эксперимент выполнен в трехмерной постановке. Из-за большой требовательности эксперимента к вычислительным ресурсам выбран один элемент на толщину каждого листа. Предположено проведение операции в два этапа: 1 – формовка замка; 2 – формовка пера лопатки. На первом этапе заготовка закреплена от перемещений во всех направлениях в узлах, образующих замковую часть, вдоль оси вращения. После формообразования замка, на втором этапе, заготовка закреплена по всем узлам, образующим замковую часть детали.

Моделирование изотермической штамповки (рис. 10) позволяет изучить механику процесса формообразования. Решение задачи в трехмерной постановке позволяет оценить величины и направления течения металла (рис. 11), что в последующем позволит проводить моделирование в двумерной постановке.

На рис. 11 приведены значения перемещений узлов вдоль оси заготовки. Как видно из представленных графиков величина перемещений увеличивается по мере удаления от замка вдоль пера лопатки.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАСПОЛОЖЕНИЯ ЗОН СВАРКИ И ЗАЩИТНОГО ПОКРЫТИЯ (STOP-OFF)

Моделирование сверхпластической формовки позволяет определить расположение зон сварки и нанесения защитного покрытия в заготовке, а также выявить и предупредить возникновение дефектов.

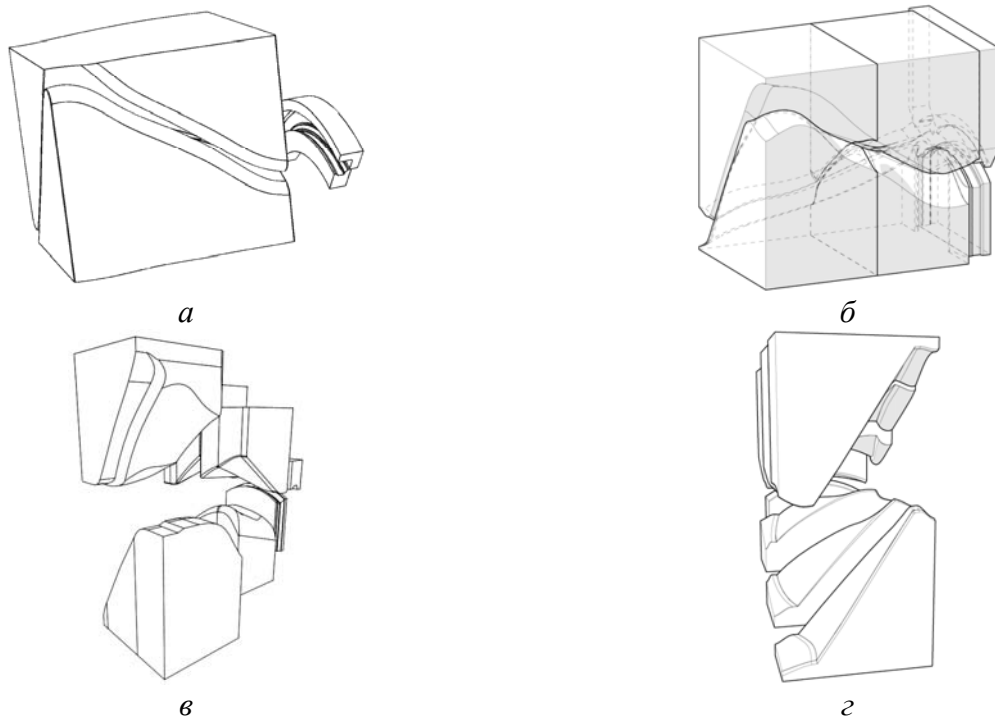


Рис. 8. Рассмотренные варианты матриц штампа для операции изотермической штамповки:
а – две матрицы; *б* – четыре матрицы; *в* – пять матриц; *г* – шесть матриц

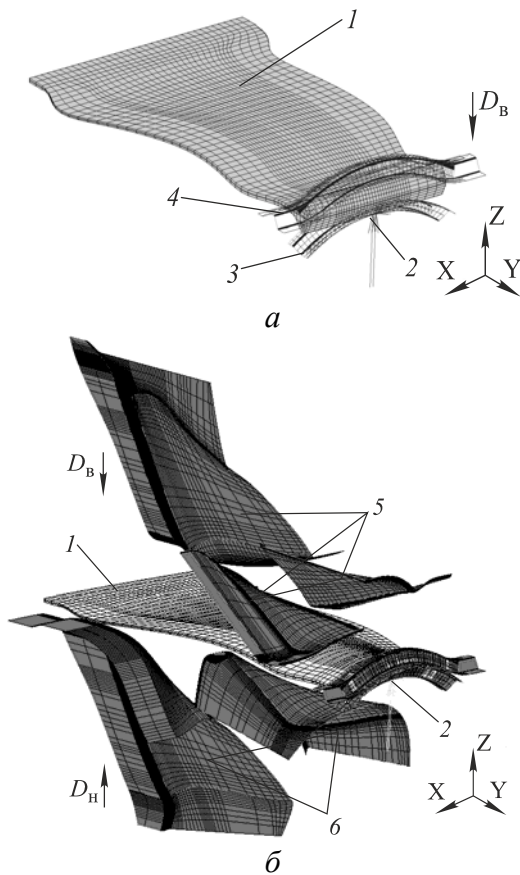


Рис. 9. Расчетная схема моделирования изотермической штамповки в трехмерной постановке:
а – формовка замка;
б – формовка пера лопатки

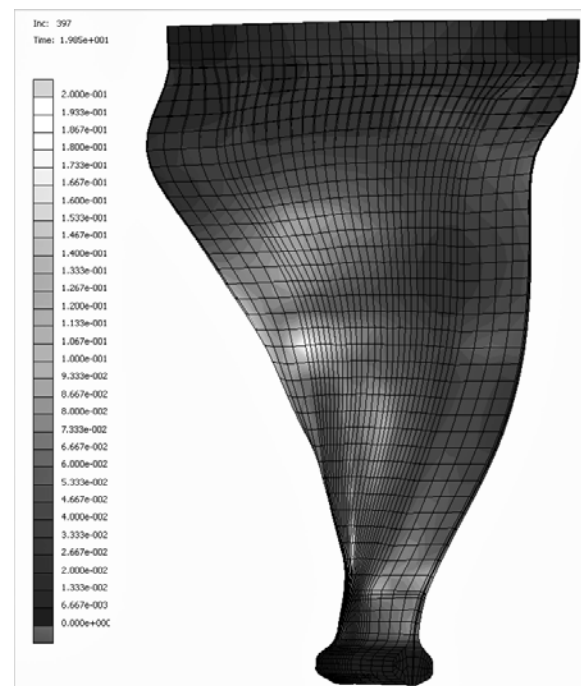


Рис. 10. Распределение эквивалентных пластических деформаций при моделировании операции изотермической штамповки

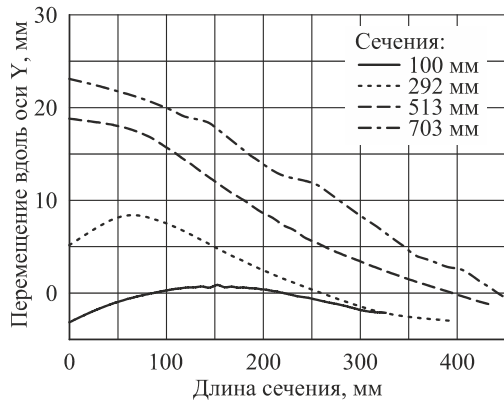


Рис. 11. Перемещения в узлах элементов по длине сечения после моделирования изотермической штамповки для нескольких сечений, выбранных вдоль пера лопатки

Для определения расположения зон сварки исходная модель детали была разбита на сечения (рис. 12). Так как после операции изотермической штамповки поверхность корыта полностью контактирует с нижней матрицей, можно предположить, что перемещения сечения вдоль оси X будут незначительными и ими можно пренебречь, следовательно, распределение зон сварки и stop-off между средним и нижним листом по длине сечения останется неизменным. Это предположение позволяет перенести распределение зон сварки между нижним и средним листом из сечения модели лопатки на сечение модели ее заготовки.

Определение расположения зон сварки между верхним и средним листами заготовки выполнено исходя из допущения о сохранении площадей элементов сечений на заготовке и полуфабрикате. То есть площади элемента,

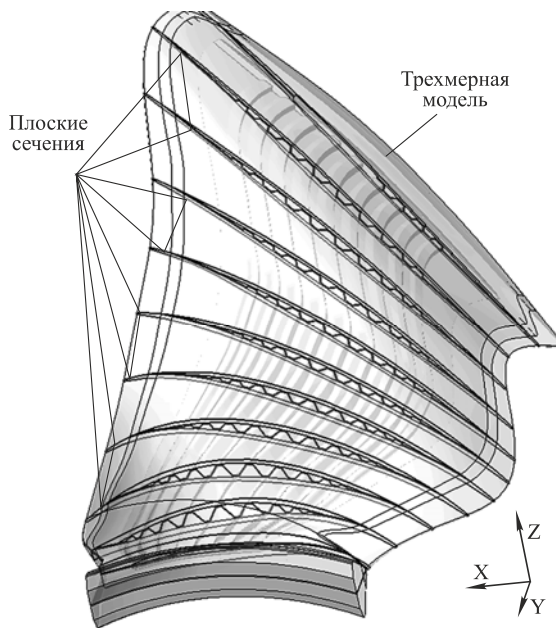


Рис. 12. Сечения полый лопатки

образующего внутренний силовой набор до операции и после операции СПФ, будут равны. Это позволяет предположить расположение зон сварки верхнего и среднего листов заготовки.

Для уточнения расположения зон сварки среднего и верхнего листов заготовки проведено параметрическое исследование. Фрагмент параметризованной модели представлен на рис. 13.

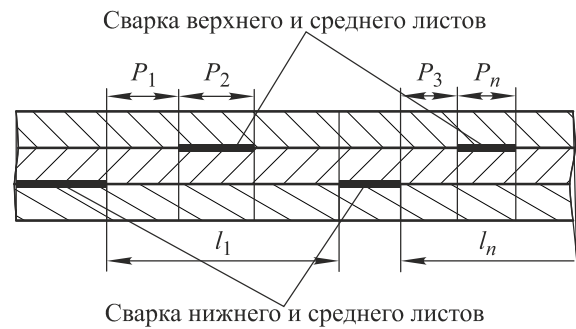


Рис. 13. Схема параметризации на фрагменте модели сечения заготовки полый лопатки для нахождения зон сварки верхнего и среднего листов: $P_1, P_2, P_3, \dots, P_n$ – изменяемые параметры; l_1, l_n – неизменяемые параметры

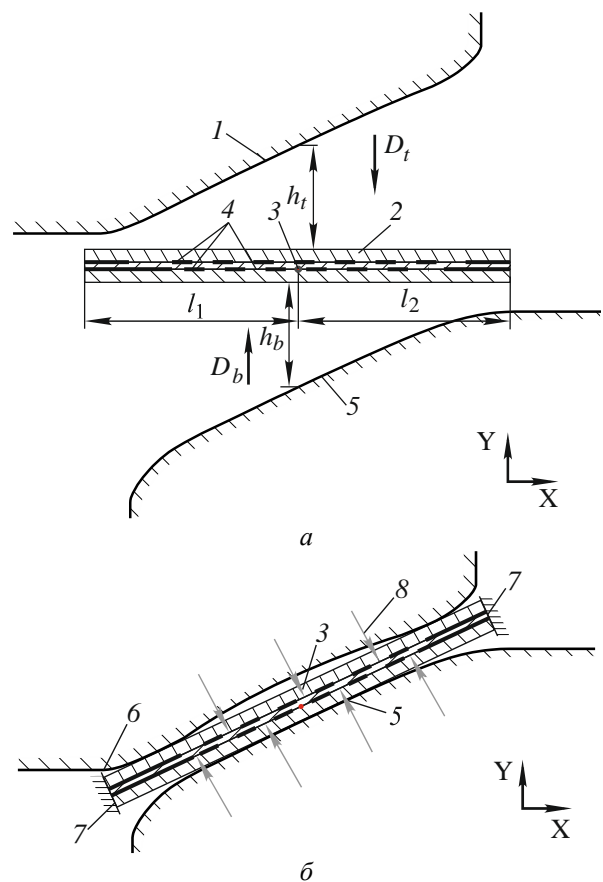


Рис. 14. Расчетная схема моделирования операций изотермической штамповки (а) и сверхпластической формовки (б) для полый лопатки вентилятора в 2D постановке

В целевую функцию было включено среднеквадратичное отклонение расположения опорных точек каждого элемента, образующего внутренний силовой набор, что позволило определять параметры расположения зон сварки на сечении заготовки таким образом, что среднеквадратичное отклонение расположения внутреннего силового набора после моделирования операции СПФ находилось в диапазоне 0,1...0,54 мм.

Моделирование проведено в двумерной постановке на четырехугольных элементах второго порядка. Для корректного определения изменения толщин листов заготовки было выбрано три элемента по толщине на каждый лист. На рис. 14 приведена расчетная схема задачи. На схеме: 1 – верхняя матрица; 2 – заготовка; 3 – точка вращения; 4 – зоны сварки; 5 – нижняя матрица; 6 – верхняя матрица для СПФ; 7 – заделка; 8 – внутреннее давление; h_t – величина хода верхнего штампа, h_b – величина хода нижнего штампа; D_t , D_b – направления движения верхнего и нижнего штампов соответственно.

Моделирование в плоской постановке происходит в два этапа: на первом этапе моделируется операция изотермической штамповки, а на втором – сверхпластическая формовка. При изотермической штамповке модель закреплена от всех перемещений

в узле, соответствующему точке, через которую проходит ось закрутки пера лопатки. При моделировании операции сверхпластической формовки заготовка закреплена от всех перемещений в узлах по краям модели. На рис. 11 приведено сравнение сечений исходной модели полый лопатки и результат математического моделирования операций изотермической штамповки и сверхпластической формовки.

ДЕФЕКТЫ, ВОЗНИКАЮЩИЕ ПРИ ОПЕРАЦИИ СПФ

Поэтапное моделирование, помимо определения параметров заготовки, режимов работы оборудования и форм поверхностей матриц штампов, позволило выявить такие параметры операций и заготовки, которые могут привести к возникновению неустранимых дефектов во время операции изотермической штамповки и сверхпластической формовки.

На рис. 15 приведены сечения полый лопатки с дефектами, полученными в результате численного моделирования операций изотермической штамповки и сверхпластической формовки. Возникновение представленных дефектов связано с неправильным определением зон сварки и нанесения защитного (stop-off) покрытия при проектировании заготовки (рис. 15, а–в). Если

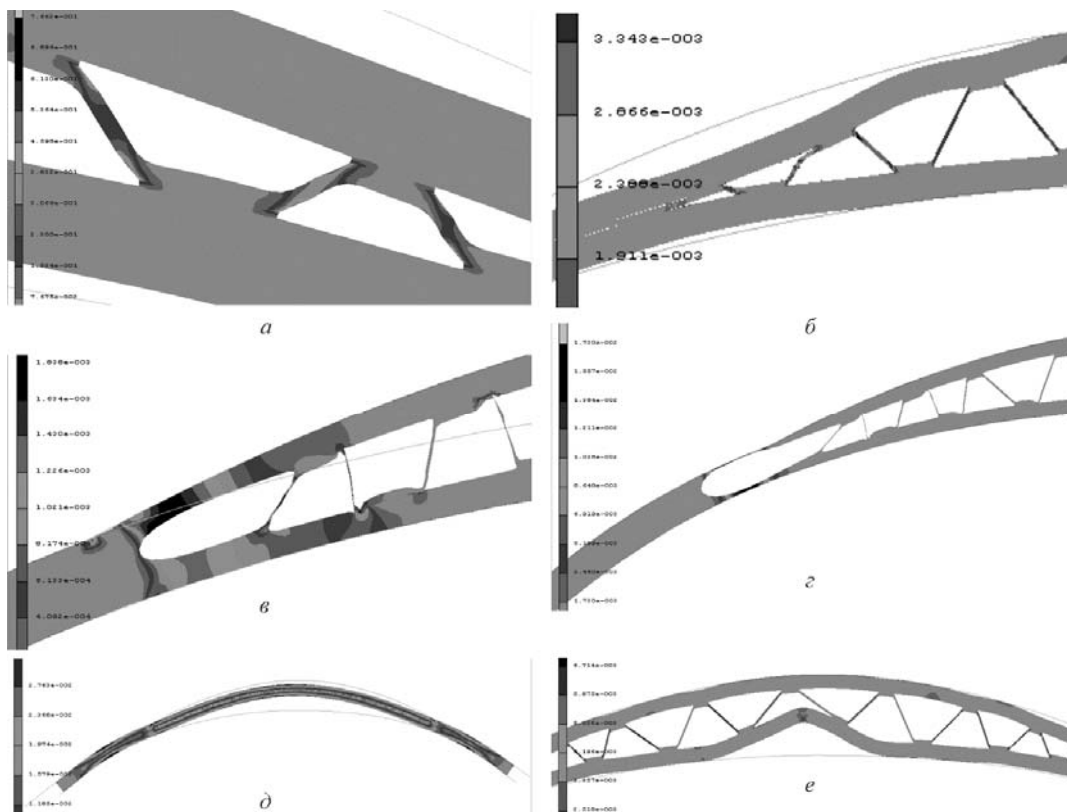


Рис. 15. Сечения полый лопатки с возникшими дефектами

в результате нанесения защитного (stop-off) покрытия при диффузионной сварке, на этапе сверхпластического формообразования получается слишком большой размер внутреннего силового набора, можно наблюдать его недоформовку (рис. 15, а). Если протяженность зон нанесения защитного (stop-off) покрытия слишком мала, то в результате, при сверхпластическом формообразовании длина ребер внутреннего силового набора будет недостаточной для полного заполнения пространства между матрицами штампов (рис. 15, б), что потребует увеличения давления инертного газа для формообразования. Расстояние между наружными листами будет увеличено, что повлечет за собой утонение стенок внутреннего силового набора (рис. 15, в).

Дефекты, связанные с неправильным проектированием матриц штампов и подходами к формообразованию на этапе изотермической штамповки, представлены на рис. 15, г–е. Так, при неполном контакте матриц штампа и наружных поверхностей заготовки возможно возникновение чрезмерного утонения (рис. 15, г), вызванного перемещением края заготовки в матрицах штампов при сверхпластическом формообразовании. При отклонении позиционирования при изотермической штамповке, возможно недостаточное заполнение матриц штампов заготовкой в области оси закрутки (рис. 15, д), что при сверхпластическом формообразовании приведет к образованию гофра (рис. 15, е). Это связано с тем, что края заготовки контактируют с матрицами штампов, что препятствует их перемещению вдоль сечения. Возникновение этого дефекта наблюдалось при гибке-закрутке пера лопатки двумя матрицами (см. рис. 4, а).

Таким образом, применение математического моделирования при проектировании и отладке операций изотермической штамповки и пластической формовки технологического процесса изготовления полых лопатки вентилятора и тонкостенных деталей позволяет избежать и предупредить возникновение неустраняемых дефектов и брака.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Методика математического моделирования методом конечных элементов операций изотермической штамповки и сверхпластической формовки, применяемая при написании статьи, позволяет сократить время,

требуемое для вычислительных операций за счет уменьшения точности решения, по сравнению с трехмерной постановкой задачи, но требует дальнейшего развития и уточнения.

Развитие методики, помимо отладки по экспериментальным данным, связано с созданием комплекса оптимального проектирования заготовок для полых и тонкостенных деталей. Такой комплекс будет способствовать упрощению применения описанных методов инженерами-технологами на машиностроительных предприятиях.

Применение математических моделей операций изотермической штамповки и сверхпластической формовки позволяет не только упростить отладку и внедрение этих операций в технологические процессы изготовления полых и тонкостенных деталей, но и выявить параметры, приводящие к образованию неустраняемых дефектов, таким образом, тем самыми уменьшив количество брака и удешевив их стоимость.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **United States Patent** № 5.484.660 17 декабря 1996 г. [**United States Patent** № 5.484.660 17 december 1996 year.]
2. **United States Patent** №5.711.068 27 января 1998 г. [**United States Patent** №5.711.068 27 January 1998 year.]
3. **Чумаченко Е. Н., Смирнов О. М., Цепин М. А.** Сверхпластичность: материалы, теория, технологии. Изд. 2-е, М.: Книжный дом «ЛИБРОКОМ», 2009. – 320 с. [E. N. Chumachenko, O. M. Smirnov, M. A. Tsepin. Superplasticity: theory, materials, technologys. Moskow, Knijnyi dom "Librokom", 2009.]
4. **Васин Р. А., Еникеев Ф. У.** Введение в механику сверхпластичности: В 2 ч. Ч. II. – Уфа: Гилем. 1999. 626 с. [R. A. Vasin, F. U. Enikeev. Introduction in superplasticity mechanics. Ufa: Gilem, 1999.]

ОБ АВТОРАХ

Темис Юрий Моисеевич, проф. каф. Прикладная математика МГТУ им. Н. Э. Баумана, нач. отдела «Математическое моделирование и САПР ГТД». Дипл. инж. спец. Динамика и прочность машин, приборов и аппаратуры. (Моск. высшее техн. училище, 1971), д-р. техн. наук. по мат. мод. пластичности и ползучести констр. мат-лов деталей ГТД.

Худяков Артем Павлович, инженер отдела «Математическое моделирование и САПР ГТД» ЦИАМ им. П. И. Баранова. Дипл. инж. спец. «технология машиностроения» (Московский государственный университет приборостроения и информатики, 2011). Готовит дисс. о мат. моделировании операций сверхпластического формообразования.

METADATA

Title: Mathematical modeling of isothermal punching and superplasticity forming of hollow fan blade.

Authors: J. M. Temis¹, A. P. Khudyakov²

Affiliation:

¹ Bauman Moscow State Technical University (BMSTU),
Russia.

^{1,2} Central Institute of Aviation Motors(CIAM), Russia.

Email: ¹ tejour@ciam.ru.

Language: Russian.

Source: Vestnik UGATU (scientific journal of Ufa State Aviation Technical University), vol. 19, no. 3(69), pp. 50-60, 2015. ISSN 2225-2789 (Online), ISSN 1992-6502 (Print).

Abstract: Process of mathematical modelling of operations of isothermal punching and superplasticity forming a hollow blade of the fan of the aviation engine for the purpose of creation of its preparation, definition of operating modes of the equipment, revealing of possible defects is considered.

Key words: superplasticity forming, isothermal punching.

About authors

Temis Yury Moiseevich, a Dr.Sci.Tech., the professor, the corresponding member of the Russian Academy of Natural Sciences, the chief of department "Mathematical modeling and CAD gas-turbine engine", CIAM, the professor of chair «Applied mathematics», BMSTU of D.C. Bauman

Khudyakov Artyom Pavlovich, the engineer of department "Mathematical modeling and SAPR GTD" CIAM of P. I. Baranov. Dipl. eng. special "technology of mechanical engineering" (Moscow State University of instrument making and informatics, 2011). Prepares a yew. about a mat. modeling of operations of a superplastic shaping.