

На правах рукописи



КНЯЗЕВ ЯРОСЛАВ ОЛЕГОВИЧ

РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ ШТАМПОВКИ ПОКОВОК
КОМПРЕССОРНЫХ ЛОПАТОК АВИАЦИОННЫХ ГАЗОТУРБИННЫХ
ДВИГАТЕЛЕЙ ИЗ ТИТАНОВОГО СПЛАВА

05.02.09 – Технологии и машины обработки давлением

Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата
технических наук

Орёл – 2014

Работа выполнена в ФГОУ ВПО
«Московский государственный университет приборостроения
и информатики»

Научный руководитель **Осадчий Владимир Яковлевич**
доктор технических наук, профессор,
профессор ФГОУ ВПО «МГУПИ»

Официальные оппоненты: **Сосенушкин Евгений Николаевич**
доктор технических наук, профессор,
профессор ФГОУ ВПО МГТУ «СТАНКИН»

Булычев Владимир Александрович
Кандидат технических наук, доцент
Ведущий специалист ОАО «ЦКБА» г. Тула

Ведущая организация ФГАО ВПО Национальный исследовательский
технологический университет «МИСиС

Защита состоится «30» сентября 2014 г. в 14.00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.182.03 созданного на базе ФГБОУ ВПО «Госуниверситет-УНПК» по адресу: 302020, г. Орел, Наугорское шоссе, д. 29, ауд. 212.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке на сайте ФГБОУ ВПО «Госуниверситет - УНПК» по адресу: <http://gu-unpk.ru>.

Автореферат разослан « ___ » _____ 20__ г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Борзенков Михаил Иванович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Компрессорная лопатка авиационного двигателя является одной из наиболее важных и массовых деталей в авиационном машиностроении. Лопатки компрессора высокого давления имеют значительные перепады площадей поперечного сечения на участке замок-перо. Особенно это заметно на лопатках последних ступеней компрессора. В данных случаях использование стандартных заготовительных переходов затруднено.

Традиционно такие лопатки изготавливают по одной из следующих схем: формирование пера лопатки при помощи высокоскоростного фрезерования или холодным вальцеванием. В первом случае заготовку для механической обработки получают с помощью штамповки с предварительной осадкой, а во втором либо с помощью штамповки с предварительным выдавливанием, либо штамповкой с многопереходной высадкой. Штамповка с предварительной осадкой и последующим высокоскоростным фрезерованием имеет крайне низкий коэффициент использования металла (КИМ), а так же некачественную структуру металла по перу лопатки. Использование холодной вальцовки, позволяет использовать поковки с более тонким пером, но при этом необходимо использовать заготовительные переходы перед окончательной штамповкой. Однако к лопаткам со значительным перепадам площадей поперечного сечения применять заготовительные переходы затруднительно. Так, например, при выдавливании диаметр выдавливаемой части лимитирован степенью деформации, а диаметр первоначальной заготовки ограничен размерами замка. Такая технология имеет немного более высокий КИМ, чем штамповка с предварительной осадкой, и структура металла в данном случае будет более качественной. Другой вариант изготовления поковок для холодной вальцовки это штамповка с предварительной высадкой, при этом для большинства лопаток компрессора требуется порядка 3-4 переходов, для формирования объёмов перед окончательной штамповкой. Но для поковок лопаток последних ступеней компрессора такого количества переходов будет недостаточно, кроме того для данных поковок требуются прутки меньшего диаметра чем изготавливаемые по отраслевому стандарту.

Таким образом, на данный момент не существует технологии, которая позволяла бы получать поковки последних ступеней лопаток компрессора с высокими КИМ и производительностью. Поэтому разработка новой технологии для штамповки заготовок таких деталей и её исследование является актуальной темой.

Степень разработанности темы. Отечественными и зарубежными исследователями (Е.И. Семенов, А.П. Атрошенко, А.В. Ревельский, М.В. Сторожев, Г.Н. Дубинин, Е.Н. Сосенушкин., П.А. Головкин, J. Fix, D. N. Norrie и др.) рассмотрены процессы штамповки в общем и авиационном машиностроении, свойства и особенности титановых сплавов, а так же метод конечных элементов, и его применение при решении задач обработки

давлением. При этом существующие технологии для производства поковок со значительным перепадом площадей поперечного сечения малоэффективны. Поэтому было предложено использование комбинирование процессов выдавливания и высадки на заготовительных переходах, а для повышения эффективности предложили использовать штампы закрытого типа с компенсатором в виде продолжения перьевой части поковки (для операции высадки). Однако при использовании такого штампа на операции высадки возникает удлинение стержня, которое необходимо учитывать при расчете заготовки по переходам. Именно нахождение зависимости между данным удлинением и геометрическими размерами с учётом коэффициента трения было направлено наше исследование. В итоге была получена зависимость, позволяющая рассчитывать данное удлинение и размеры заготовки по переходам.

Цель работы – увеличение коэффициента использования металла с помощью внедрения новой технологии производства поковок компрессорных лопаток со значительным перепадом площадей поперечного сечения.

Объект исследования – процесс высадки предварительно выдавленной заготовки в закрытом штампе с компенсатором в виде продолжения перьевой части поковки.

Предметом исследования является относительное удлинение перьевой части предварительно выдавленной заготовки на операции высадке в закрытом штампе с компенсатором.

Задачи исследования:

– разработать технологию производства компрессорных лопаток со значительным перепадом площадей поперечного сечения с высоким КИМ и высокой производительностью;

– исследовать влияние коэффициента трения и геометрических параметров инструмента и технологии на относительное удлинение перьевой части предварительно выдавленной заготовки на операции высадки, объединение полученных зависимостей в одну и получение математической модели удлинения перьевой части в процессе высадки;

– создание методики расчёта заготовок поковок лопаток со значительным перепадом площадей поперечного сечения, с использованием комбинирования процесса выдавливания и высадки на заготовительных переходах.

Методология и методы исследования: системный подход к решению сформулированных задач методом конечных элементов с использованием программного обеспечения QForm 5.

Научная новизна работы

– впервые изучено напряженно-деформированное состояние при высадке замковой части поковок лопаток компрессора авиационного двигателя с помощью метода конечных элементов, что позволило разработать рациональную технологию процесса;

– исследовано влияние отдельных геометрических параметров, степени деформации и коэффициента трения на относительное удлинение перьевой части поковки во время процесса высадки с одновременным истечением металла в перьевую часть, являющейся компенсатором, что позволило получить зависимость, учитывающая суммарное влияние коэффициента трения, геометрических параметров заготовки и инструмента на удлинение перьевой части поковки;

– разработана математическая модель, позволяющая определить первоначальную длину пера, обеспечивающую полное заполнение штампа на операции высадке;

– предложена методика расчёта размеров заготовок поковок компрессорных лопаток со значительным перепадом площадей поперечного сечения, с использованием комбинирования процесса выдавливания и высадки на заготовительных переходах, которая позволяет рассчитывать технологию производства любых деталей подобного типа.

Достоверность полученных результатов обеспечена:

– корректно постановкой задач и обоснованными допущениями;
– использование программы моделирования процессов обработки давлением QForm 5, неоднократно показавшей адекватность получаемых результатов.

Теоретическая значимость работы заключается в:

– влиянии отдельных геометрических параметров и коэффициента трения на относительное удлинение перьевой части поковок компрессорных лопаток;

– обобщение полученных результатов по влиянию геометрических параметров и коэффициента трения и объединение их в одну зависимость, позволяющую определить полное удлинение перьевой части поковки на операции высадки.

Практическая ценность работы состоит из:

– разработана новая технология производства поковок компрессорных лопаток со значительным перепадом площадей поперечного сечения с использованием комбинирования процессов высадки и выдавливания;

– предложена методика расчета размеров заготовки поковок компрессорных лопаток по переходам.

Положения, выносимые на защиту:

– предложение использовать комбинирование процессов выдавливания и высадки при производстве компрессорных лопаток со значительным перепадом площадей поперечного сечения, при этом на заготовительных переходах предлагается использовать закрытый штамп с компенсатором в виде продолжения перьевой части поковки;

– применение метода конечных элементов, для изучения напряженно деформированного состояния металла, и определение влияния геометрических параметров и коэффициента трения на относительное удлинение перьевой части;

– зависимость совместного влияния геометрических параметров и коэффициента трения на удлинение перьевой части, и учёт её для расчёта первоначальных размеров заготовки;

– методика расчёта технологии производства поковок компрессорных лопаток по переходам.

Реализация работы. Результаты выполненных исследований переданы для внедрения на ОАО «ММП им. В.В. Чернышева».

Апробация работы. Материалы диссертации докладывались на общероссийской конференции «Студенческая научная весна 2011: Машиностроительные технологии», а также на университетских конференциях: «Научно-технических конференциях МГУПИ: Информатика и технология 2012», «Научно-технических конференциях МГУПИ: Информатика и технология 2013», «Научно-технических конференциях МГУПИ: Информатика и технология 2014», Международный научно-технический конгресс ОМД 2014. «Фундаментальные проблемы. Инновационные материалы и технологии»

Публикации. По теме диссертации опубликовано 6 работ, в том числе 3 статьи в рецензируемых журналах Перечня ВАК.

Структура и объём диссертации. Диссертация состоит из введения 4 разделов, 26 подразделов, заключения, списка литературы. Объём диссертации 122 страницы.

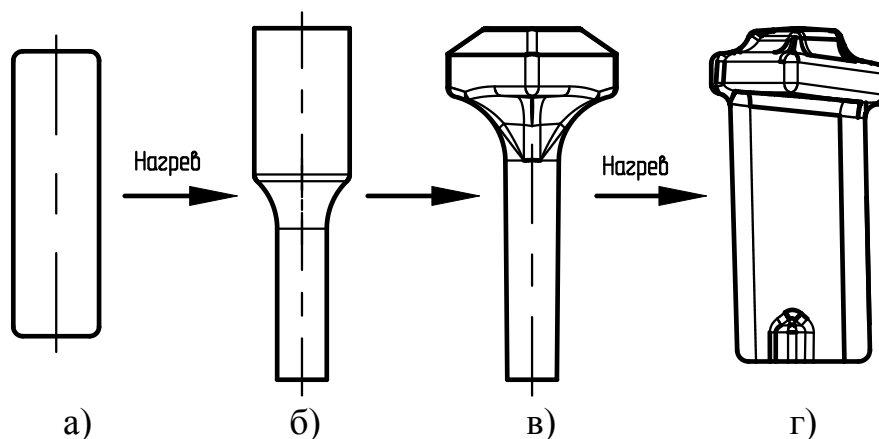
ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновывается актуальность темы диссертационного, исследования определяется его объект, предмет, цель, задачи и методы исследования, выдвигается гипотеза, раскрывается научная новизна, теоретическая и практическая значимость, формулируются выносимые на защиту положения.

В первом разделе содержится аналитический обзор производства поковок компрессорных лопаток на машиностроительных заводах. Особое внимание уделено процессам штамповки на кривошипных горячештамповочных прессах (КГШП), штамповке с предварительной высадкой на горизонтально-ковочных машинах (ГКМ) и электровысадочных машинах, штамповке с предварительной вальцовкой и изотермической штамповке. Все эти процессы широко используются при изготовлении поковок компрессорных лопаток. При этом, стоит отметить, что применение данных процессов к изготовлению поковок титановых компрессорных лопаток со значительным перепадом площадей поперечного сечения не эффективно: вальцовку на заготовительном переходе столь маленьких лопаток невозможно осуществить, для процессов высадки и электровысадки будет превышена допустимая степень деформации, а значит потребуются отжиг для снятия напряжений, что приведёт к увеличению альфированного слоя, кроме того высадка таких лопаток будет требовать минимум 4 переходов на ГКМ, изотермическая штамповка позволяет избежать

дополнительного нагрева и имеет высокий коэффициент использования металла (КИМ), но при этом она более энергозатратна и имеет низкую производительность, поэтому суммарный экономический эффект будет минимальный. Именно по этой причине при штамповке таких лопаток применяются технологии, при которых либо идёт минимальное фасонирование пера лопатки при помощи процесса выдавливания и используется окончательная штамповка, либо просто штамповка в один переход с последующей обработкой высокоскоростным фрезерованием.

Поэтому предлагается новая технология изготовления данных поковок (рисунок 1): нагрев, выдавливание перьевого части с площадью поперечного сечения, равной максимальной площади поперечного сечения пера поковки лопатки с учётом облоя, высадка замковой части, подогрев и окончательная штамповка в открытом штампе. Учитывая, что в машиностроительном производстве наиболее распространены кривошипные горячештамповочные прессы, то рационально разрабатывать технологию именно под это оборудование. Чтобы добиться наиболее эффективного использования металла целесообразно проводить операции высадки и выдавливания в закрытом штампе с компенсатором в виде продолжения перьевого части (рисунок 2).



Рисунке 1 – Предложенная технология. а – заготовка, б – выдавливание металла под перьевую часть, в – высадка замковой части, г – штамповка в окончательном штампе

Использование такой схемы позволяет не опасаться заклинивания прессы или разрыва штампа, а разъёмные матрицы позволяют делать минимальные уклоны. Однако, высадка в штампе с компенсатором в виде продолжения перьевого части имеет свой минус: в процессе деформации замковой части будет происходить истечение металла в компенсатор, а следовательно удлинение пера, которое необходимо учесть при расчёте заготовки под данный переход. Правильно рассчитать размеры заготовки перед высадкой очень важно, поскольку в противном случае может возникнуть незаполнение полости штампа, и как следствие дефекты на окончательной штамповке. В связи с этим, было принято решение промоделировать данный процесс и выявить зависимость, позволяющую определить искомое удлинение перьевого части и рассчитать размеры заготовки для данной операции, и, как следствие, получить методику расчёта

переходов для всего технологического процесса штамповки таких поковок в целом.

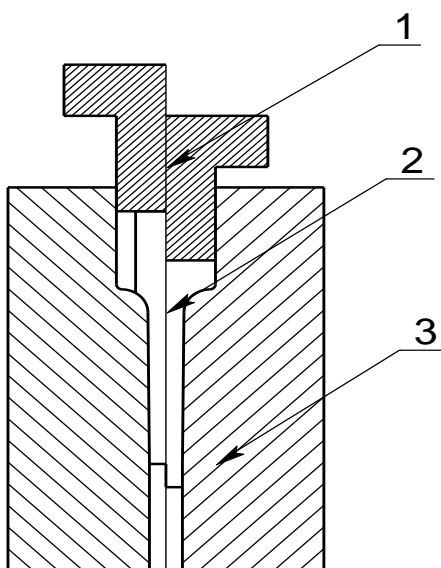


Рисунок 2 – Схема процесса высадки в закрытом штампе с компенсатором в виде продолжения перьевой части: 1 – пуансон; 2 – предварительно выдавленная заготовка; 3 – матрица.

Во втором разделе рассмотрены основные принципы метода конечных элементов а также его применение для решения задач в области обработки давлением. Общая схема, решение задачи с применением МКЭ состоит из следующих основных этапов:

1. Определение задачи, создание чертежа модели и нагрузок;
2. Создание геометрии модели, подходящей для МКЭ;
3. Разбиение модели на сетку конечных элементов;
4. Приложение к модели граничных условий (закрепление на границе или граничные нагрузки);
5. Численное решение системы уравнений (с помощью ЭВМ);
6. Анализ результатов.

В качестве пакета программ для моделирования данной технологии был выбран QForm 5. В ряде работ отмечается высокая точность получаемых результатов, соответствие поведения модели и реального материала при обработке давлением, а также возможность предсказания дефектов данного пакета программ. QForm имеет следующие допущения и особенности:

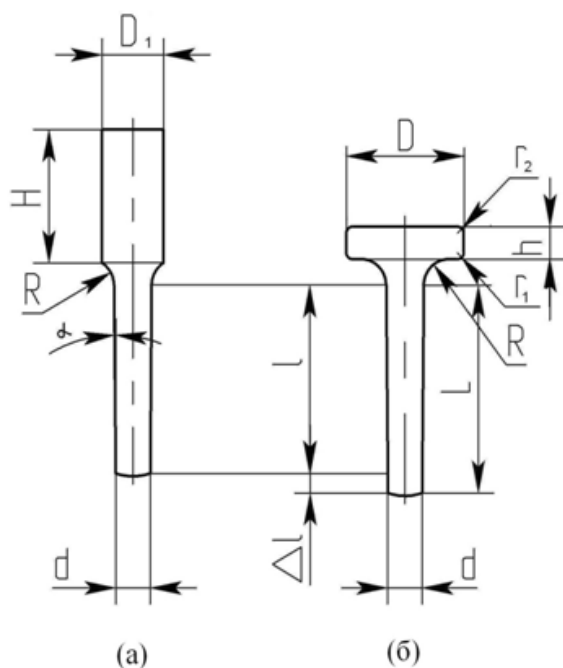
1. Заготовку и инструмент считаем сплошными, однородными и изотропными телами;
2. Материал заготовки рассматривается как вязкопластическое тело;
3. Материал инструментов – упруго-пластический;
4. Сопротивление деформации металла зависит от трех параметров: степени деформации, скорости деформации и температуры;
5. Построение КЭ сетки как на поверхности, так и в объеме полностью автоматическое, без вмешательства пользователя. Перестроение и

адаптация сетки производится также автоматически, исходя из требуемой точности решения задачи;

6. Пошаговая процедура расчета формоизменения при штамповке является адаптивной с автоматическим выбором шага по времени.

Помимо этого в данном разделе определён порядок проведения исследования, способы обработки полученных результатов и проведение аппроксимации.

В третьем разделе представлены результаты исследования влияния геометрических параметров заготовки и инструмента, а также коэффициента трения на относительное удлинение ($\Delta l/l$) (рисунок 3) перьевого части лопатки. Как отмечалось выше, моделирование проводилось в программе QForm. В первую очередь было промоделировано влияние формы замковой части на удлинение пера и установлено, что квадратную замковую часть можно заменить круглой при сохранении объёма и площади проекции на плоскость штампа высаженной части поковки. Это позволило проводить дальнейшее исследование уже не в 3-х мерных моделях, а в 2-х мерных, что значительно повысило скорость расчёта.



D_1 – диаметр высаживаемой части; D – диаметр высаженной части; d – диаметр перьевого части; H – высота высаживаемой части; h – высота высаженной части; l – длина перьевого части до высадки без учётов радиусов скругления; L – длина перьевого части после высадки с учётом радиусов скругления; R – радиуса скругления перьевого части; γ_1 – радиус скругления поковки около пуансона; γ_2 – радиус скругления дна матрицы; α – угол наклона перьевого части; Δl – удлинение перьевого части.

Рисунке 3 – Эскиз предварительно выдавленной заготовки (а) и высаженной поковки (б).

В процессе моделирования изменяли каждый геометрические параметр и коэффициент трения отдельно и определяли его влияние на удлинение стержня. Стоит отметить, что при моделировании программа QForm изменяет количество элементов в зависимости от сложности формы поковки, инструмента, концентрации и интенсивности напряжения и скорости деформации так в данном исследовании количество элементов варьировалось от 273 до 435.

В ходе исследования было выявлено что относительное удлинение перьевого части поковки зависит от следующих параметров:

m – отношение длины перьевой части поковки к диаметру, рассчитывается по формуле $m = \frac{l}{d}$,

n – относительный диаметр высаженной части поковки, рассчитывается по формуле $n = \frac{D^2}{d^2}$,

ξ_R , – относительный радиус скругления перьевой части поковки, рассчитывается по формуле $\xi_R = \frac{R}{d}$,

ξ_1 – относительный радиус скругления дна матрицы, рассчитывается по формуле $\xi_1 = \frac{r_1}{d}$,

$\varepsilon_{\text{выс}}$ – степень деформации при посадке, рассчитывается по формуле $\varepsilon_{\text{выс}} = 1 - \frac{D^2}{D_1^2}$,

α – угол наклона перьевой части,

f – коэффициент трения.

Рассмотрим влияние данных параметров более подробно.

Как видно из рисунка 4, график зависимости относительного удлинения перьевой части поковки от отношения длины стержня к диаметру имеет вид дробно-линейной функции. Это связано с тем что при увеличении длины стержня сопротивление течению металла в стержень увеличивается, а следовательно относительное удлинение уменьшается. Аппроксимировав экспериментальные данные получили следующую зависимость:

$$\frac{\Delta l}{l} = \frac{0,453 - 0,046m}{m + 0,439}$$

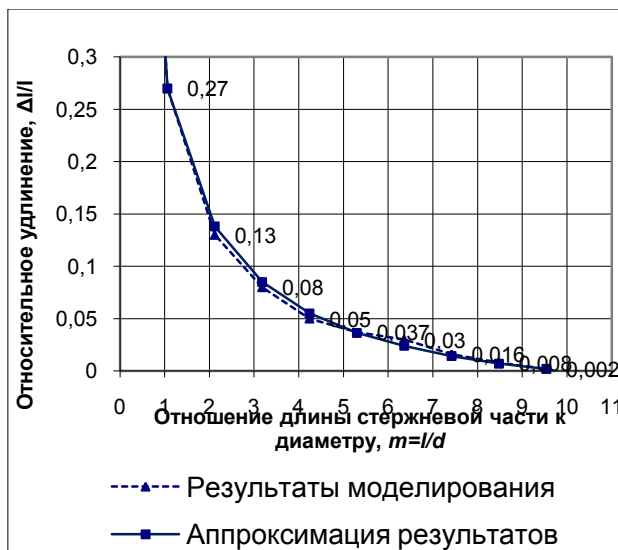


Рисунок 4 - Зависимость относительного удлинения перьевой части от отношения длины перьевой части к диаметру

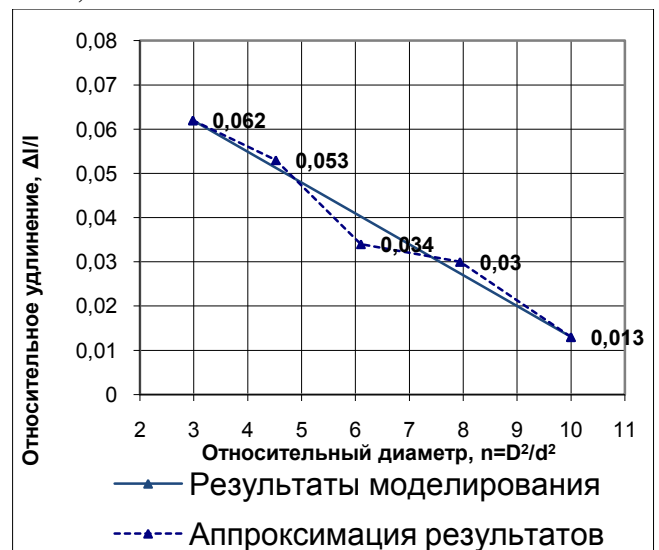


Рисунок 5 - Зависимость относительного удлинения перьевой части от относительного диаметра высаженной части.

При анализе влияния относительного диаметра высаженной части поковки видно (рисунок 5), что зависимость имеет вид линейной функции. Это связано с тем, что при увеличении диаметра высаженной части увеличивается и площадь поверхности, по которой будет действовать трение, направленное, против течения металла, а, следовательно, металлу будет сложнее истекать в стержневую часть поковки. Аппроксимировав полученные данные, получили следующую зависимость:

$$\frac{\Delta l}{l} = 0,083 - 0,007n$$

Из рисунка 6 видно, что зависимость относительного удлинения перьевой части поковки от относительного радиуса скругления перьевой части имеет вид дробно-линейной функции, при этом при увеличении радиуса скругления, относительное удлинение уменьшается. Это связано с тем, что при увеличении данного параметра, увеличивается площадь проекции перпендикулярная к силе выдавливания, а следовательно увеличивается сила трения направленная против течения металла. После аппроксимации данных получили следующую зависимость:

$$\frac{\Delta l}{l} = \frac{0,022 \cdot \xi_R + 0,017}{\xi_R + 0,268}$$

Анализ зависимости относительного удлинения перьевой части от относительного радиуса скругления дна матрицы (рисунок 7) показал, что в этом случае, относительное удлинение уменьшается при увеличении радиуса скругления дна матрицы, это можно объяснить тем, что чем больше данный радиус, тем проще металлу заполнить полость замковой части.

$$\frac{\Delta l}{l} = 0,049 - 0,023\xi_1$$

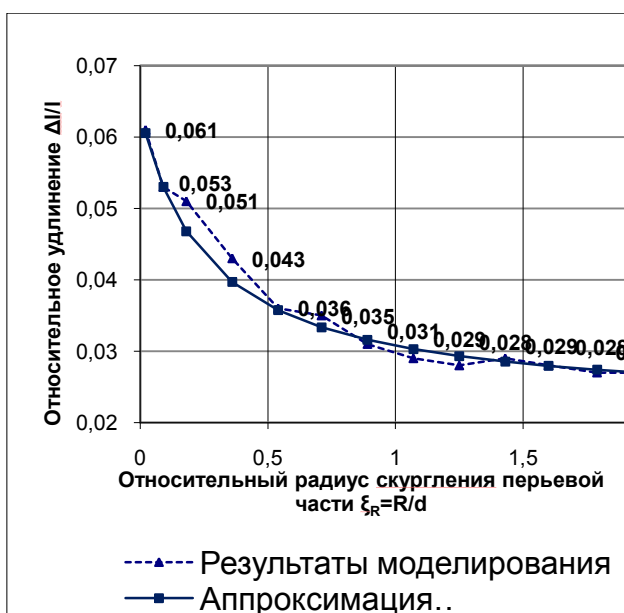


Рисунок 6 - Зависимость относительного удлинения перьевой части от относительного радиуса скругления перьевой части

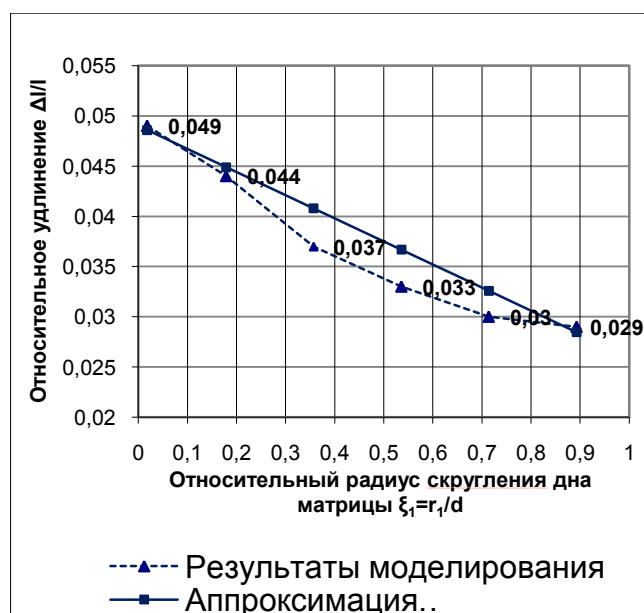


Рисунок 7 - Зависимость относительного удлинения перьевой части от относительного радиуса скругления дна матрицы.

На рисунке 8 видно, что с увеличением степени деформации возрастает относительное удлинение перьевой части поковки. Это связано с тем, что при увеличении степени деформации происходит увеличение интенсивности течения металла во всей поковке, и, как следствие, большее количество металла попадает в стержневую часть. Аппроксимировав полученные данные, мы вышли на следующую зависимость:

$$\frac{\Delta l}{l} = 0,2235 \cdot \varepsilon_{ВЫС}^3 - 0,0734 \cdot \varepsilon_{ВЫС}^2 + 0,0237 \cdot \varepsilon_{ВЫС}$$

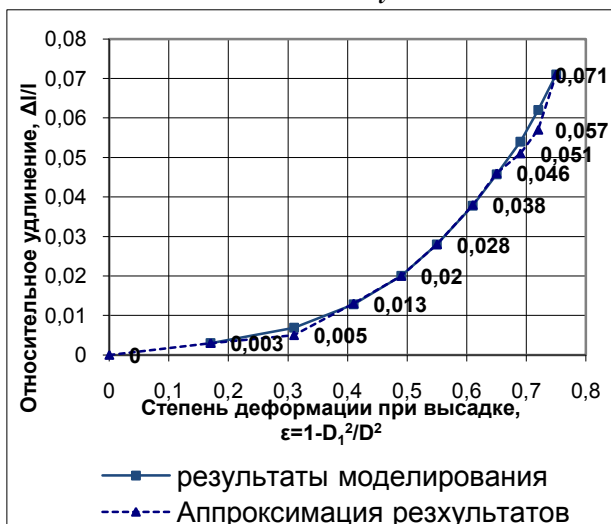


Рисунок 8 - Зависимости относительного удлинения перьевой части от степени деформации высаженной части.

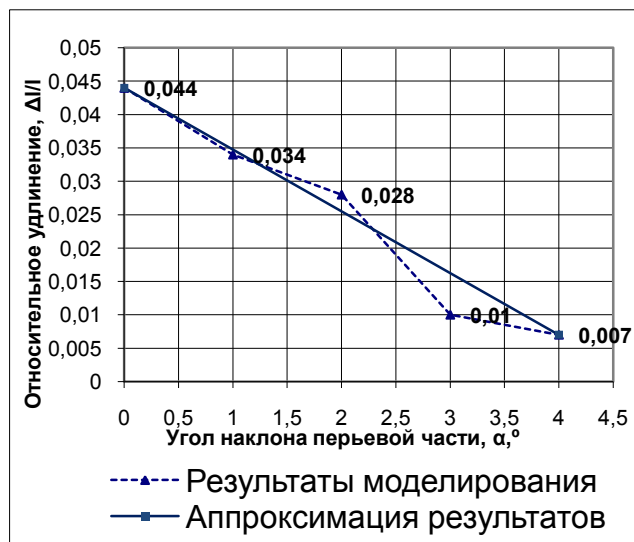


Рисунок 9 – Зависимости относительного удлинения перьевой части от угла наклона перьевой части

При увеличении угла наклона перьевой части поковки (рисунке 9) относительное удлинение уменьшается так как увеличивается сила контактного трения по длине стержня, и как следствие увеличивается сопротивление течению металла в стержень. Данная зависимость носит линейный характер, описывается следующей закономерностью:

$$\frac{\Delta l}{l} = 0,044 - 0,009\alpha$$



Рисунок 10 – Зависимости относительного удлинения перьевой части от коэффициента трения

При увеличении коэффициента трения уменьшается интенсивность истечения металла в стержень, и как следствие уменьшается относительное удлинение (рисунке 10). Поэтому зависимость относительного удлинения стержня от коэффициента трения примет вид:

$$\frac{\Delta l}{l} = \frac{0,027f + 0,002}{f + 0,026}$$

Объединив данные зависимости в одну, и выразив длину стержня перед высадкой, получаем следующие зависимости:

при $m < 9,85$:

$$l = \frac{-b + \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a}$$

при $m \geq 9,85$:

$$l = \frac{L}{1+z}$$

где:

$$a = 1 + z - 0,046;$$

$$b = 0,439d(1 + z + 1,032) - L;$$

$$c = d \cdot L \cdot 0,439;$$

$$z = \left(0,029 - 0,007n + \frac{0,022\xi_R - 0,0176}{\xi_R + 0,268} - 0,023\xi_1 - 0,009\alpha + 0,2235 \cdot \varepsilon_{ВЫС}^3 - 0,0734 \cdot \varepsilon_{ВЫС}^2 + 0,0237 \cdot \varepsilon_{ВЫС} + \frac{0,027f - 0,0066}{f + 0,026} \right)$$

По данной формуле, можно рассчитать длину перьевого части поковки перед операцией высадкой. Стоит отметить, что относительное удлинение в зависимости от различной комбинации геометрических параметров и коэффициента трения может изменяться от значений близких к нулю до 30%, именно поэтому так важно учитывать данное удлинение, особенно при штамповке в закрытых штампах.

После получения зависимости, нами были проведены эксперименты (рисунок 11), которые показали, что ошибка при расчете удлинения перьевого части поковки составляет от 2 до 4%.



а

б

в

г

**Рисунок 11 – Экспериментальное исследование относительного удлинения.
а – заготовка, б – поковка после операции выдавливания, в – окончание
стадии**

Четвертый раздел посвящен расчёту параметров технологии по переходам на примере лопатки одной из последних ступеней авиационного двигателя (рисунок 12). Как видно из чертежа лопатка имеет значительный перепад площадей поперечного сечения, поэтому данная лопатка является типичным представителем рассматриваемых деталей.

По первоначальной технологии данная деталь изготавливалась из заготовки диаметром 18мм, длиной 34мм. На основе чертежа детали был разработан сначала чертёж поковки после окончательной штамповки, а затем чертёж поковки после операции высадки. При этом, стоит отметить, что для предотвращения образования заковов как в плоскости перпендикулярной плоскости штампа, так и в самой плоскости, нами была предложена следующая методика расчёта радиусов скругления на операции высадке. Что бы предотвратить образования закова непосредственно в плоскости штампа, необходимо учитывать что металл будет течь, как от перьевой части, так и от замковой, по этому радиус перехода в данном месте должен быть равняться разнице между самой диагональю замка и максимальным значением диаметра стержня (из которого в последствии будет формироваться перо лопатки) с учётом уклона. В плоскости перпендикулярной плоскости разъёма штампа, основной причиной образования заковов является то, что на момент начала деформации поковка на переходе перо-замок не лежит на границе замка. В итоге, когда начинается деформация, штамп давит на заготовку, и она, скользя, начинает срезать часть металла о грани полости штампа (в области замка). Для предотвращения этого, была разработана методика расчёта такого радиуса скругления, что бы заготовка была зафиксирована в штампе.

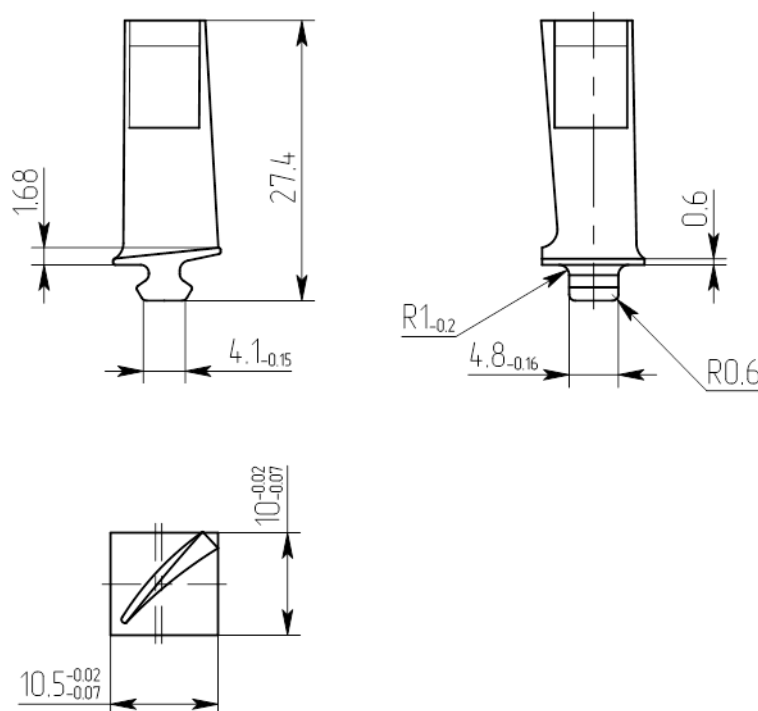


Рисунок 12 – Лопатка компрессора авиационного двигателя со значительным перепадом площадей поперечного сечения

После этого были рассчитаны размеры поковки после операции выдавливания. Здесь основную трудность представляет расчёт длины перьевой части поковки. При ошибки в расчете первоначальной длины перьевой части поковки имеют место два варианта: если размер пера будет слишком длинным, то за счёт того, что в ходе операции высадке происходит истечения металла в данную часть возникает незаполнение полости штампа, а значит, не сформируется поковка в окончательном штампе. В случае же если длина будет слишком маленькая, то на высадке замковая часть может потерять устойчивость, и произойдёт образование закова на боковой грани, что сразу приведёт к браку, либо высадка пройдёт успешно и поковка сформируется, но при этом будет иметь место повышенный износ штампа, особенно на радиусах скругления. Именно поэтому нами было проведено исследование данного процесса. Благодаря полученной зависимости, можно рассчитать данный переход и после этого рассчитать размеры исходной заготовки. При этом нам удалось повысить КИМ с 10,3% до 46,5%, то есть увеличился в 4,5 раза. В таблице 1 приведено сравнение исходной и предложенной технологии.

Таблица 1- Сравнение исходной и предложенной технологии

Параметр	Исходная технология	Предложенная технология
Геометрический размеры заготовки	Ø18x34мм	Ø9x30мм
Объём заготовки	8651,9мм ³	1907,6 мм ³
Масса заготовки	38,9г	8,6г
КИМ	10,3%	46,5%

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Диссертация является научно-квалификационной работой, в которой содержится решение **задачи**, имеющей существенное значение для теории и практики производства поволоков лопаток компрессора со значительным перепадом площадей поперечного сечения с использованием комбинирования процессов высадки и выдавливания на заготовительных переходах при штамповке лопаток на КГШП в закрытых штампов с компенсатором.

В процессе теоретических и экспериментальных исследований получены **следующие основные результаты и сделаны выводы:**

1. В диссертационной работе решена важная научно-техническая задача повышения эффективности процесса штамповки поковок компрессорных лопаток со значительным перепадом площадей поперечного сечения путем разработки рациональной технологии, обеспечивающей уменьшение расхода металла.

2. На основе анализа технологических процессов установлено, что изготовление поковок компрессорных лопаток со значительным перепадом площадей поперечного сечения затруднено из-за сложности применения большинства заготовительных переходов, которое обусловлено спецификой геометрии изделия. Поэтому было предложено использовать 2 последовательных заготовительных перехода: выдавливание и высадку, причем оба этих перехода осуществляются в штампах с разъёмной матрицей, а на операции высадке использовать штамп, в котором перьевая часть будет одновременно являться и компенсатором.

3. Исследовано напряжённо деформированное состояние металла на операции высадки в закрытом штампе с компенсатором предварительно выдавленной заготовки. Исследование проводилось с применением метода конечных элементов в программе Qform 5. Установлено, что при любой деформации высаживаемой части поковки происходит истечение металла в компенсатор, и, в зависимости от геометрических параметров инструмента и заготовки, объём истечения металла в компенсатор будет разным.

4. Получены зависимости между относительным удлинением перьевой части лопатки (компенсатора) и каждым геометрическим параметром инструмента и заготовки отдельно, кроме того исследовано влияние коэффициента трения на относительное удлинение перьевой части поковки. В итоге данные зависимости были объединены в одну, что позволило разработать инженерный метод поэтапного расчёта технологии производства таких лопаток. Проведены эксперименты, которые показали, что ошибка при использовании формулы составляет от 2 до 4%. Технология изготовления поковок компрессорных лопаток методом комбинирования процесса высадки и выдавливания на заготовительных переходах передана к внедрению на ОАО «ММП им. В.В. Чернышева».

5. Разработана математическая модель и предложен алгоритм в виде блок-схемы, позволяющие создать программу автоматизированного расчёта технологических переходов штамповки компрессорных лопаток со значительным перепадом площадей поперечного сечения, путем поэлементного формирования частей поковки.

6. Прделанная работа позволила уменьшить массу заготовки в 4,5 раза, а экономия металла с одной ступени двигателя достигает 2,5 кг, что при стоимости сплава ВТ-8 в 1800 рублей за килограмм составит 4500 рублей с одной ступени и порядка 22000 рублей со всех лопаток небольшой длинны со значительным перепадом площадей поперечного сечения на одном двигателе.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ:

1. **Князев, Я.О. Методика расчётов параметров поковки при высадке в закрытом штампе с компенсатором./** Князев Я.О., Лентяшин В.Б., Осадчий В.Я. // Производство проката – 2012 – №8 с. 40-44
2. **Князев, Я.О. Инновационная технология штамповки компрессорных лопаток небольшой длины./** Осадчий В.Я., Лентяшин В.Б., Князев Я.О. // Заготовительное производство – 2013 – №3 с. 22-25.
3. **Князев, Я.О. К расчету удлинения перьевого участка компрессорной лопатки при операции высадки./** Князев Я.О., Осадчий В.Я. // Производство проката – 2014 – №5 с. 31-35.
4. **Князев, Я.О. Исследование процесса горячей объёмной штамповки поволоков компрессорных лопаток из титановых сплавов с целью сокращения расхода металла/** Князев Я.О., Лентяшин В.Б.// Электронное издание студенческая весна 2011 – М.: МГТУ им. Баумана, 2011. Диск № гос. регистрации 0321100671.
5. **Князев, Я.О. Математическое моделирование процесса изготовления поковки лопатки компрессора авиационного двигателя. /** Осадчий В.Я., Князев Я.О.// Информатика и технология: Межвузовский сборник научных трудов: Материалы научно-технической конференции Московского государственного университета приборостроения и информатики. Выпуск XX. – 2014 – с. 18-25.
6. **Князев, Я.О. Инновационная технология производства поволоков компрессорных лопаток. /** Князев Я.О., Осадчий В.Я.// Сборник докладов международного научно-технического конгресса ОМД 2014. «Фундаментальные проблемы. Инновационные материалы и технологии» – 2014 – с. 194

Подписано к печати 24.07.2014 г. Формат 60x84 1/16.
Объем 1,0 усл.п.л. Тираж 100 экз. Заказ № 1236

Отпечатано с готового оригинал-макета на полиграфической базе
ФГБОУ ВПО «Государственный университет - учебно-научно-производственный комплекс»
302030, г. Орел, ул. Московская, 65