

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ «МОСКОВСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ПРИБОРОСТРОЕНИЯ
И ИНФОРМАТИКИ»

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

Диссертация на соискание ученой степени кандидата
технических наук

Научный руководитель – проф., д-р техн. наук Осадчий В.Я.

Москва – 2014

Оглавление

Введение	4
1. Литературный обзор.....	6
1.1 Горячая объёмная штамповка поковок компрессорных лопаток	6
1.2 Титановые сплавы, применяемые при изготовлении компрессорных лопаток.	14
1.3 Цели и задачи работы	18
Выводы по разделу	18
2 Математическое моделирование процессов штамповки. Методика проведения исследования.....	19
2.1 Математическое моделирование процессов обработки металлов давлением...	19
2.2 Метод конечных элементов. Основные принципы.	21
2.3 Использование программы QForm для решения задач обработки металлов давлением.....	26
2.3 Методика проведения исследования	29
Выводы по разделу	34
3. Исследовательский раздел.....	35
3.1 Постановка задачи исследования	35
3.2 Допущения. Порядок проведения исследования. Основные этапы проведения исследования. Параметры	35
3.3 Исследование влияния длины перьевого части поковки на её относительное удлинение.....	40
3.4 Исследование влияния диаметра высаженной части поковки на относительное удлинение перьевого части поковки	44
3.5 Исследование влияния радиуса скругления на переходе от замковой к перьевого части поковки на относительное удлинение перьевого части поковки	48
3.6 Исследование влияния радиуса скругления дна матрицы на относительное удлинение перьевого части поковки	51
3.7 Исследование влияния радиуса скругления поковки около пуансона на относительное удлинение перьевого части поковки	54

3.8 Исследование влияния угла наклона перьевой части на относительное удлинение перьевой части поковки	56
3.9 Исследование влияния степени деформации высаживаемой части поковки на относительное удлинение перьевой части поковки	59
3.10 Исследование влияния коэффициента трения на относительное удлинение перьевой части поковки.....	64
3.11 Вывод формулы, учитывающей влияние геометрических параметров, коэффициента трения и степени деформации на относительное удлинение перьевой части поковки.....	67
3.12 Исследование технологических параметров процесса высадки в программе QForm.	72
3.13 Экспериментальное исследование относительного удлинения перьевой части поковки в процессе высадки. Сравнение результатов исследования и результатов, полученных моделированием	75
Выводы по разделу	77
4 Разработка технологического режима штамповки	78
4.1 Разработка чертежа поковки лопатки на последнем переходе штамповки.....	78
4.2 Разработка чертежей заготовительных переходов штамповки.....	79
4.3 Расчёт геометрических размеров заготовки.....	90
4.4 Выбор температурного режима.....	90
4.5 Блок-схема математической модели расчета поковки по переходам от конечной поковки к первоначальной заготовки.....	92
4.6 Сравнение базовой и предложенной технологий	104
Выводы по разделу	109
Заключение.....	110
Список литературы.....	112

Введение

Авиационный двигатель является сложным и ответственным агрегатом. Поэтому к нему и деталям из которых он состоит предъявляются жесткие требования по надёжности и точности изготовления. Одними из наиболее важных и ответственных деталей являются лопатки компрессора. Данные лопатки обеспечивают сжатие воздуха и подачу его в камеру сгорания. В российском двигателестроении существует ряд технологий позволяющие получать лопатки различными способами: литье, холодное вальцевание, высокоскоростная механическая обработка. При этом высокоскоростную механическую обработку и холодное вальцевание используют в основном только для получения профиля пера лопатки, а замок предварительно протягивают. Но при изготовлении компрессорных лопаток небольшой длины со значительным перепадом площадей поперечного сечения из титановых сплавов (рисунок 1.1) применение литья затруднительно.

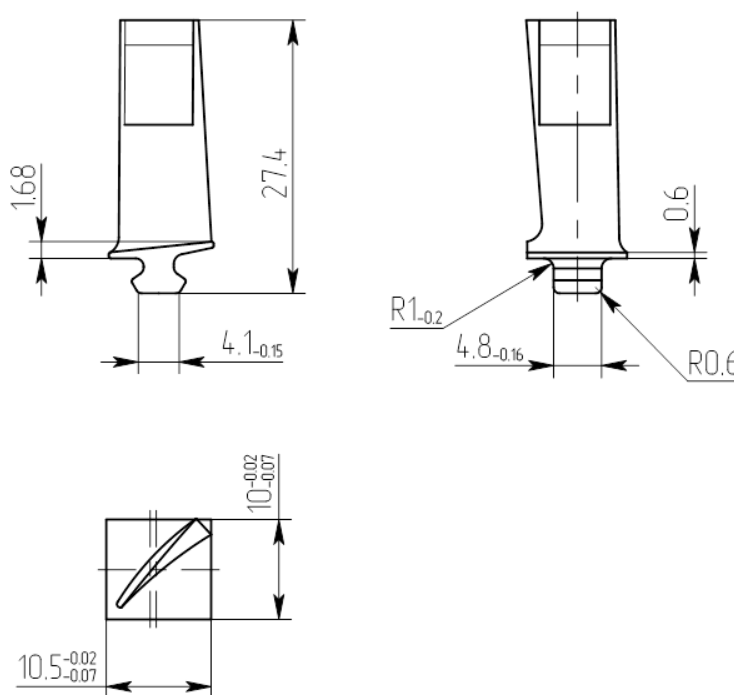


Рисунок 1 – Лопатка компрессора высокого давления

Поэтому 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 [3], 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. Поэтому существует необходимость предложить и исследовать новую технологию изготовления поковок компрессорных лопаток небольшой длины со значительным перепадом площадей поперечного сечения. Наиболее рационально разрабатывать данную технологию для кривошипных горячештамповочных пресов (КГШП), поскольку они получили наибольшее распространение в авиационном машиностроении.

1. Литературный обзор

1.1 Горячая объёмная штамповка поковок компрессорных лопаток

Как отмечалось выше, лопатка компрессора является одной из наиболее массовых деталей в авиационном машиностроении. Зарубежные специалисты, выделяют три важнейших вида получения заготовок для металлических изделий: литьё, обработка металлов давлением и порошковая металлургия [2]. Однако для компрессорных лопаток из титановых сплавов применение литья и порошковой металлургии проблематично в связи с требованиями к механическим свойствам. Поэтому будем рассматривать операции и процессы, применяемые при получении поковок компрессорных лопаток методами ОМД. В машиностроительном производстве существует несколько классификаций процессов и поковок получаемых горячей объёмной штамповкой [1, 4-10]:

1. По типу штампов
 - а. Штамповка в открытых штампах;
 - б. Штамповка в закрытых штампах.
2. По типу поковок:
 - а. Поковки круглые в плане и близкие к ним;
 - б. Поковки удлиненной формы.
3. По используемому оборудованию
 - а. Штамповка на молотах;
 - б. Штамповка на кривошипных горячештамповочных прессах (КГШП);
 - в. Штамповка на гидравлических прессах (ГКМ);
 - г. Штамповка на винтовых прессах;
 - д. Штамповка на горизонтально-ковочных машинах;
 - е. Специализированные процессы штамповки.

Ранее отмечалось, что при штамповке поковок компрессорных лопаток чаще применяются операции штамповки на КГШП, ГКМ и ряд специализированных процессов. Рассмотрим их более подробно.

Особенностями штамповки на КГШП [11] по сравнению со штамповкой на молотах является постоянство величины рабочего хода, восприятие деформирующих усилий самой конструкцией прессы, наличие выталкивающих устройств, надёжность направляющих ползуна прессы. Основные преимущества штамповки на КГШП[11-12] – высокая точность и качество получаемых поковок, высокая производительность, именно поэтому данный процесс получил столь широкое применение при изготовлении компрессорных лопаток.

Поковки штампуемые на КГШП можно разделить на 5 групп [1,13]:

- I. группа – осесимметричные поковки, изготавливаемые осадкой в торец или осадкой с одновременным выдавливанием;
- II. группа – поковки удлиненной формы с небольшой разницей в площадях поперечных сечений. Штамповка осуществляется, как правило, без предварительной подготовки заготовок;
- III. группа – поковки удлиненной формы со значительной разницей в площадях поперечного сечения. Для изготовления таких поковок необходимы заготовки, предварительно обработанные высадкой на ГКМ или выдавливанием, вальцовкой или другом аналогичном оборудовании;
- IV. группа – поковки с изогнутой осью. При изготовлении таких поковок применяют штампы с замком, гибочные ручки и комбинацию обоих решений;
- V. группа – поковки, изготавливаемые выдавливанием.

Поковки компрессорных лопаток можно отнести к III группе поковок. Однако стоит отметить, что использование только одной операции выдавливания при изготовлении таких деталей ведёт к снижению коэффициента использования металла. Рассмотрим более подробно данную операцию.

Выдавливание это штамповка заготовки вытеснением металла исходной заготовки в полость и (или) отверстия ручья штампа [14]. Исследование формообразования на выдавливание проводилось в ряде работ [15-20]. В зависимости от характера течения металла выделяют несколько видов выдавливания[21]:

Прямое выдавливание – технологическая операции, в процессе которой происходит истечение металла, заключенного в замкнутую полость в направлении движения рабочего инструмента. Таким выдавливанием получают поковки, по форме близкие к стержню с утолщением на конце.

Обратное выдавливание – технологическая операции, в процессе которой происходит истечение металла из замкнутой полости в направлении, обратном движению рабочего инструмента в зазор между пуансоном и матрицей. Данное выдавливание применяют для изготовления поволоков типа стакан.

Боковое выдавливание – технологическая операция, в процессе которой происходит истечение металла из замкнутой полости через отверстия в его боковой поверхности, в боковые полости. Применяется для изготовления поволоков типа крестовин карданного вала, корпуса газосварочной аппаратуры [22]. Однако при таком выдавливании крайне важно контролировать степень деформации, а так же прогнозировать разрушение металла. Так, например при боковом выдавливании могут возникать следующие дефекты [135]: трещины, утяжины, незаполнения, искажения формы.

Радиальное выдавливание – технологическая операция, в процессе которой происходит истечение металла из замкнутой полости через щель, расположенную по периметру боковой поверхности в кольцевую полость. Такой вид выдавливания применяется для изготовления поволоков с фланцами [23].

В соответствии с данной классификацией, заготовки поволоков компрессорных лопаток можно получить при помощи прямого выдавливания. Такое выдавливание имеет схему всестороннего сжатия, обеспечивающему металлу высокую пластичность [24]. Стоит отметить что поковки, получаемые обратным, прямым и радиальным выдавливанием, как правило, представляют собой тела вращения. Заготовки, применяемые для получения таких поволоков, так же обладают осевой симметрией. Следовательно, схема напряжённого состояния в произвольной точке на стадии свободного истечения является осесимметричной в цилиндрической или сферической системе координат [25,26]. При боковом выдавливании только в некоторых случаях в первом приближении схема напряжённого состояния и

пластическое течение металла может соответствовать осесимметричной деформации. А при заключительной стадии выдавливания, в ходе которой происходит заполнение углов полости, схема напряжённого состояния и пластическое течение металла, могут только весьма отдалённо напоминать условия осесимметричной деформации [21]. Эти заключительные стадии подробно изучены [22, 27, 28]. Кроме перечисленных видов выдавливания существует также комбинированное выдавливание сочетающие в себе несколько видов. Данный тип выдавливания для штамповки фланцевых поковок рассмотрен в работе [137]

Наряду с выдавливанием при получении заготовок поковок компрессорных лопаток применяют так же высадку на ГКМ. Иногда используется комбинирование вальцовки и высадки на ГКМ [29]. В [11] отмечаются следующие преимущества штамповки на ГКМ:

1. Возможность штамповки в закрытых штампах и во многих случаях без штамповочных уклонов.
2. Штамповка без облоя позволяет получать поковки высокой тонности и качества поверхности, увеличить коэффициент использования металла.
3. Высокое качество поковок, что объясняется благоприятным расположением волокон и осевой ликвацией относительно действующих усилий при работе детали.
4. Наличие двух взаимно перпендикулярных плоскостей разъема штампов обеспечивает получение таких поковок, которые невозможно получить при штамповке на другом штамповочном оборудовании с одной плоскостью разъема.

В зависимости от сложности конфигурации все поковки изготавливаемые на ГКМ разделяют на две основные группы [11,30]:

1. Поковки сплошного стержня с одним или двумя утолщениями и утолщением типа проушины, развилины.
2. Поковки типа колец и втулок со сквозными отверстиями.

При высадке заготовки первого с отношением длины высаживаемой части l_6 к диаметру исходной заготовки d больше трёх неизбежен продольный изгиб [31]. В таких случаях необходимо предусмотреть дополнительный наборный переход.

При разработке технологического процесса штамповки на ГКМ необходимо руководствоваться следующими правилами [11,32]

1. Если $l_6 \leq 3d$ при ровном перпендикулярном к оси прутка торце заготовки и плоском пуансоне, то высадку за один ход машины можно произвести на любой диаметр
2. Если $l_6 \leq 3d$, то высадку за один ход машины можно произвести на диаметр $d_1 < 1,5d$. Для того что бы не было образования складок, высадку на указанный диаметр осуществляют в закрытой полости матрицы или пуансона с тем, чтобы стенки полости предохраняли от слишком большого изгибания высаживаемого прутка и появления на нём складок.
3. Если $l_6 \leq 3d$ и высадка производится на диаметр $d_1 = 1,5d$, то выступающая за пределы матрицы свободная часть прутка не должна превышать диаметр исходного прутка d .

Пользуясь этими правилами можно определить, что для заготовки поковок компрессорных лопаток со значительным перепадом площадей поперечного сечения необходимо использовать минимум 5 перехода на ГКМ, при этом стоит отметить, что при таких значения будет наблюдаться пространственный изгиб заготовки, что скажется на структуре заготовки и её механических свойствах. Кроме этого необходимо контролировать суммарную степень деформации, что бы она не превысила допустимое значение для используемого сплава.

Дальнейшим развитием высадки на ГКМ можно считать электровысадку. Электровысадкой получают головки из прутка длиной 15 - 20 и более его диаметров. Этот процесс дает возможность непрерывно деформировать нагретую часть заготовки при соблюдении соотношения [1,10]. Данная технологическая операция позволяет получать заготовки по 2 - 3-му классам точности без окалины, так как нагрев происходит очень быстро [33]. Процесс электровысадки применяется как для свободного набора металла, так и для набора металла в замкнутую полость [1,10,34].

Этот процесс позволяет непрерывно деформировать нагретую часть заготовки при соблюдении зависимости $l_6 \leq 3d$ [1]. В связи с этим электровысадка получила широкое распространение для изготовления заготовок под штамповку турбинных лопаток, тарельчатых клапанов поршневых двигателей, полуосей для автомобилей [35]. Однако данный процесс, так же как и высадка на ГКМ ограничен допустимой степенью деформации.

Иногда, для формирования объёмов заготовок перед окончательной штамповкой используют вальцовку. Данная технологическая операция по своей сущности представляет продольную прокатку. Как и в случае с прокаткой, при вальцовке происходит уменьшение поперечного размера с одновременным увеличением его длины [1]. Вальцовка может производиться в открытых и закрытых ручьях. В открытых ручьях производится вальцовка из любого полосового материала, а в закрытых из квадратного или круглого профиля. Сторожев М.В. отмечает [7], что в открытом ручье вальцовка позволяет получать заготовку периодического круглого или квадратного сечения в толстой части заготовки и овального в тонкой. Вальцовка же в закрытом ручье применяется для периодической вальцовки заготовок без заусенцев и с большим перепадом площадей поперечного сечения по длине. Стоит отметить, что данная технологическая операция, как и высадка на ГКМ применяется как в качестве заготовительной операции перед штамповкой на другом оборудовании, так и в качестве окончательной [36]. При многоручьевой вальцовке применяются следующие схемы [1,37]: круг-овал, овал-овал, овал-круг, овал-ребровый овал, квадрат-овал, овал-квадрат, квадрат ромб, ромб-квадрат. Сочетание этих схем позволяют многократно производить вальцовку и переходить от первоначальных размеров и формы заготовки к конечному результату. При этом нужно учитывать возможность осуществления вальцовки на заготовительных переходах, так при изготовлении поковок средних и малых компрессорных лопаток применение вальцовки затруднительно, поскольку толщина пера слишком мала (порядка 1,5-2мм) и приведённая длина которую нужно обжать при заготовке соответствующей размерам замка составляет порядка 2 мм. В связи с чем при изготовлении таких

лопаток применение вальцовки на заготовительных переходах не представляется возможным.

Одним из способов снизить количество переходов при изготовлении поковок компрессорных лопаток является штамповка с использованием сверхпластичности (СВП). В России использование эффекта сверхпластичности началось с применения горячего изотермического деформирования (ГИД) [38]. Результатом применения СВП может быть экономия материальных средств на 50-70% и повышение коэффициента использования металла (КИМ) до 50-60% [39]

В отличие от обычной горячей деформации технология ГИД характеризуется следующим:

- Разница температур между заготовкой и инструментом близка к нулю;
- Уровень температур соответствует проявлению материалом заготовки максимальной пластичности;
- Скорость перемещения инструмента поддерживается такой, чтобы скорость разупрочняющих процессов в металле заготовке преобладал над скоростью упрочняющих этот металл [40,41];
- Усилие деформирования снижается в 4-10 раз [38]

Стоит отметить, что за рубежом ГИД начали использовать в конце 1970 гг. для обработки труднодеформируемых и дорогостоящих металлов и сплавов. Так, для деформирования в режиме сверхпластичности полуфабрикатов дисков для газотурбинных двигателей из никелевых или титановых сплавов, фирмы США Pratt and Whitney, Ladish и Wyman Gordon разработали и испытали технологический процесс Gatorizing [42]. Скорости инструмента при этом были на уровне 0,002 мм/с, а КИМ составлял около 60% [42, 43].

Отдельно стоит отметить, что при выборе материала инструмента для операции горячего изотермического деформирования основным фактором является его жаропрочность [44]. Для оценки качества работоспособности инструмента может быть принята скорость ползучести его рабочего размера [45]. При этом в качестве материала инструмента для низкотемпературного ГИД (400-700°C) используются сплавы алюминия, магния, меди и др., а для высокотемпературного

(800-1200°C) – сплавы титана, никеля и др. [38]. Хорошей альтернативой металлическим материалам для инструмента ГИД является керамика. Например, прочность на сжатие оксидов алюминия и диоксида циркония в несколько раз выше, чем у никелевых сплавов при той же температуре [46]. К недостаткам керамики следует отнести крайне низкую пластичность при растяжении. Поэтому на практике используют сочетание рациональных конструкций инструмента с преимуществами керамики [47]. Необходимо отметить, что более выгодно разогревать до температуры ГИД только его рабочую зону, а не весь инструмент. В работе [134] также говорится, что использование изотермической штамповки позволяет использовать оборудование меньшей мощности, а это снижает энергоёмкость данного процесса

Однако, при всех достоинствах, ГИД имеет свои недостатки, одним из которых является низкая производительность. Так, чтобы получить наибольшую эффективность при использовании СВП рекомендуется поддерживать скорость инструмента в районе 10^{-8} -1,0 мм/с [48,49]. Ещё одной проблемой для использования данного эффекта является точность контролирующих приборов для кузнечно-прессового оборудования. Например, при скоростях траверс порядка 0,5 мм/с погрешность доходит до 30% [50], а при скоростях на порядок меньше может возрасти до 80%.

Анализируя технологии, используемые для изготовления поволоков компрессорных лопаток, можно отметить, что некоторые из них имеют низкую производительность, но высокий коэффициент использования металла, другие же наоборот, весьма производительны, но при этом КИМ крайне низок. Помимо этого, при изготовлении компрессорных лопаток со значительным перепадом площадей поперечного сечения, есть технологии, которые либо невозможно осуществить, либо они требуют дополнительной термообработки для снятия остаточных напряжений. В связи с этим нами было принято решение разработать новую технологию, которая могла сочетать в себе как высокий КИМ, так и высокую производительность, однако, для этого необходимо проанализировать материал из которого изготавливаются данные лопатки.

1.2 Титановые сплавы, применяемые при изготовлении компрессорных лопаток.

Титановые сплавы нашли очень широкое распространение в авиационной и ракетной технике. Это связано с тем, что использование данных сплавов позволяют значительно снизить вес всей конструкции. Так, например, использование сплавов титана в авиационных реактивных двигателях позволяют снизить их вес на 100-150 кг [51]. В целом применение титановых сплавов в летательных аппаратах позволяет значительно снизить их массу и повысить маневренность [52]. Однако стоит отметить, что высокая теплопередача, низкая теплопроводность и большая теплота фазовых переходов в титане $\alpha \leftrightarrow \beta$ (2835,4 Дж/моль[53]) часто приводят к несоответствию деформированной структуры заданным требованиям и высокому уровню остаточных напряжений [54]. В работе [55] отмечается, что в случае резкого расхождение фазового состава даже ближайших областей поковок из титановых сплавов, может стать причиной высоких остаточных напряжений термического и фазового происхождения [56]. В конечном итоге, всё это приводит к образованию несоответствующих с $(\alpha+\beta)$ матрицей α' -, α'' -, ω -фаз [57]. В результате местные напряжения и преимущественное расположение указанных фаз по границам и у тройных стыковых зерен провоцирует α' - и ω - хрупкость титановых сплавов [56,58]

Существует ряд титановых сплавов, используемых в двигателестроении. Технические требования к которым, а так же виды контроля указаны в отраслевом стандарте [59]. Стоит отметить, что для деталей, работающих при температуре выше 400°C, отдают предпочтение применению сплава ВТ8 [60]. Данный сплав превосходит сплавы ВТ3-1 и ВТ9 по термической стабильности, пластичности, и технологичности. Поэтому для изготовления лопаток компрессора высокого давления часто применяют этот сплав. Химический состав сплава ВТ-8 приведён в таблице 1.1 [61].

Для изготовления поковок компрессорных лопаток из сплава ВТ8 используют заготовки в отожженном состоянии удовлетворяющих следующим требованиям [62]: предел прочности (σ_B) не менее 1050 МПа, относительное удлинение

образца (δ) не менее 9%, относительное сужение образца (Ψ) не менее 30%, а ударная вязкость при изгибе (α_H) не менее 300 Дж. На рисунке 1.2 показаны механические свойства сплава ВТ8 в зависимости от температуры [63].

Таблица 1.1 – химический состав сплава ВТ 8

Тип элементов	Элемент	Содержание в %
Легирующие элементы	Алюминий (Al)	5,8-7,0
	Молибден (Mo)	2,8-3,8
	Кремний (Si)	0,2-0,4
Примеси	Углерод (C), не более	0,1
	Железо (Fe), не более	0,3
	Кислород (O), не более	0,15
	Азот (N), не более	0,05
	Водород (H), не более	0,015
	Прочие	0,3

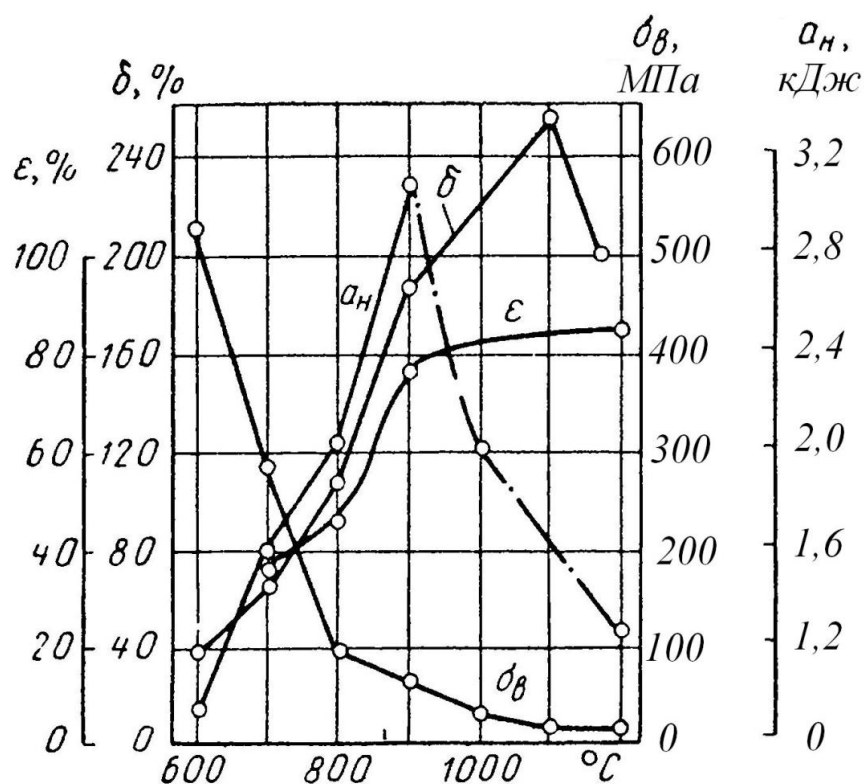
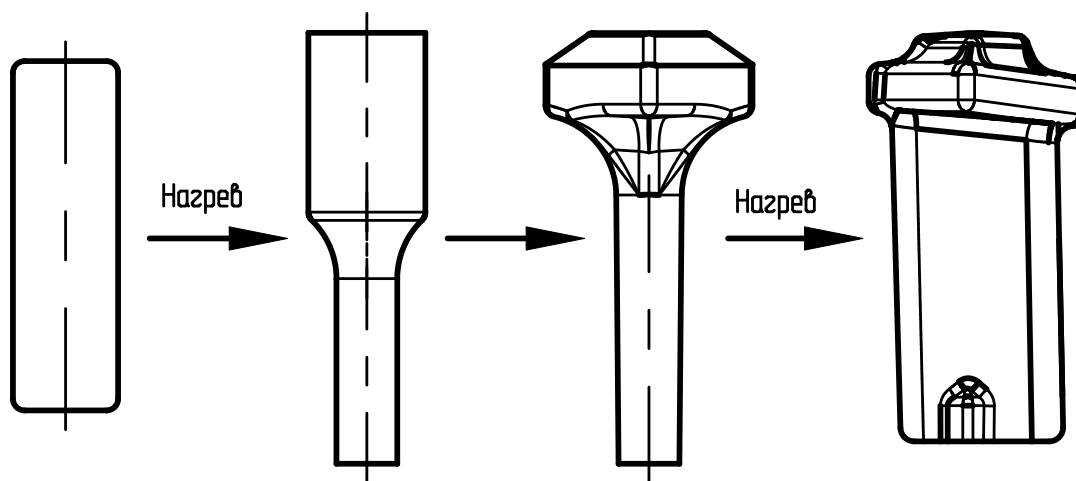


Рисунок 1.2 – Механические свойства сплава ВТ8 в зависимости от температуры.

Температурный интервал горячей штамповки данного сплава: 850-1020°C [62]. Однако, стоит отметить, что титановые сплавы не рекомендуется нагревать до верхнего предела температурного интервала, поскольку будет возникать деформационный разогрев, а он приводит к превращению α -фазы (которая обеспечивает наилучшие показатели сопротивления усталости [58,64]) в менее трещиностойчивую игольчатую α' - фазу[56,65].

Исходя из механических свойств сплава ВТ-8, а так же специфики штамповки компрессорных лопаток, нами была предложена следующая технология (рисунок 1.3): нагрев, выдавливание перьевой 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.

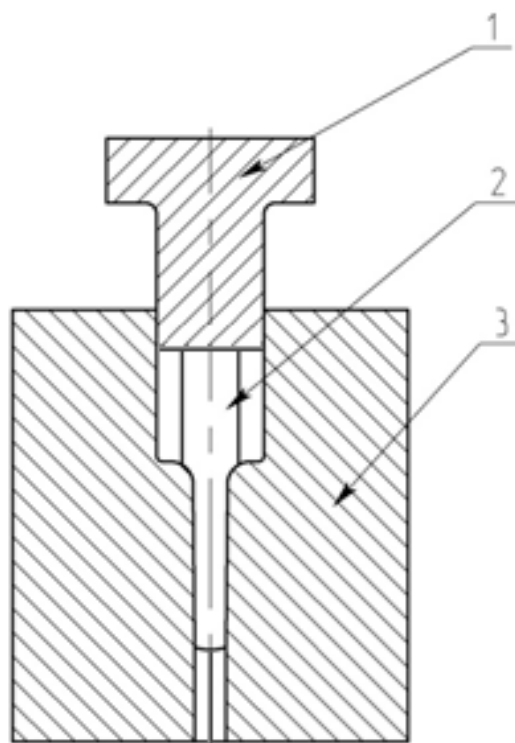


Рисунке 1.3 – Предложенная технология.

Однако, использование закрытых штампов на КГШП ограничено тем, что необходимо точно соблюдать размеры исходных заготовок. Поэтому нами было предложено использовать закрытый штамп с компенсатором в виде продолжения перьевой части заготовки (рисунок 1.4). Использование такого штампа позволяет отказаться от использования облойной канавки, но при этом не предъявлять

повышенных требований к исходной заготовке, поскольку избыток металла будет истекать в стержневую часть. Преимущества такой горячей безоблойной штамповки в разъёмной матрице рассмотрены в работе [136]

Стоит отметить, что использование такого штампа позволяет проводить такой процесс на КГШП, не опасаясь заклинивания прессы, но при этом металл будет частично истекать в перьевую часть заготовки, причём объём металла, который истечет в данном направлении будет зависеть от геометрических параметров и коэффициента трения. Это течение будет вызывать удлинение стержневой части и его необходимо учесть, в противном случае мы можем столкнуться с незаполнением полости штампа, и как следствии браку поковки на окончательном этапе. Поэтому нами было принято решение исследовать данный процесс при помощи метода конечных элементов, с целью установления зависимости удлинения перьевой части от геометрических параметров штампа и заготовки, а так же коэффициента трения.



*Рисунок 1.4 – Схема процесса высадки в закрытом штампе с компенсатором:
1 – пуансон; 2 – предварительно выдавленная заготовка; 3 – матрица.*

1.3 Цели и задачи работы

Целью данного исследования является увеличение коэффициента использования металла с помощью внедрения новой технологии производства поковок компрессорных лопаток со значительным перепадом площадей поперечного сечения.

Для достижения этой цели необходимо решить следующие задачи:

1. Промоделировать процесс изготовления поковок компрессорных лопаток со значительным перепадом площадей поперечного сечения при использовании на заготовительных переходах комбинирования процессов высадки и выдавливания.

2. Исследовать удлинение перьевой части поковки в процессе высадки замковой части в закрытом штампе с компенсатором при помощи компьютерного моделирования в программе QForm 5.

3. Определить зависимости относительного удлинения перьевой части поковки от геометрических параметров и коэффициентов трения.

4. Разработать математическую модель процесса изготовления поковок компрессорных лопаток со значительным перепадом площадей поперечного сечения.

Выводы по разделу

1. Проведён анализ действующих схем получения поковок компрессорных лопаток.

2. Рассмотрены свойства двухфазных сплавов и сплава ВТ-8 в частности, в ряде работ отдельно отмечается важность соблюдения температурного режима для таких сплавов.

3. Предложена новая технология изготовления компрессорных лопаток небольшой длины со значительным перепадом площадей поперечного сечения.

2 Математическое моделирование процессов штамповки. Методика проведения исследования.

2.1 Математическое моделирование процессов обработки металлов давлением

В настоящее время методы математического моделирования нашли довольно большое применение. С их помощью решаются задачи, относящиеся к экономике и организации кузнечно-штамповочного производства, а также отдельные технологические вопросы.

Математическое моделирование формообразования деталей при пластическом деформировании металла отличается большой сложностью, т.к. приходится учитывать много факторов: анизотропность механических свойств, зависимость механических свойств от температуры, зависимость параметров трения от температуры, сопротивление металлов пластической деформации, которое также зависит от температуры, накопление повреждений, наследственный характер деформации. Для начала необходимо разобраться что понимают под моделью.

Под моделью принято понимать некоторый объект, на котором воспроизводятся наиболее существенные характеристики реального физического процесса или явления (оригинала) с целью его исследования [66, 67]. Основной особенностью модели являются допущения, то есть модель не может не повторять все свойства объекта моделирования в точности. В тоже время, модель создается для получения новой информации об оригинале.

Различают физическое и математическое моделирование. Физические модели воспроизводят основные геометрические, физические и функциональные характеристики оригинала. В этом, случае модель и оригинал имеют одну и ту же физическую природу. Математическое моделирование базируется на том, что различные явления описываются одинаковыми математическими соотношениями. В широком смысле математическая модель есть описание основных характеристик оригинала с помощью математической символики.

Алгоритмизация математических моделей позволяет широко использовать вычислительную технику. Под алгоритмом понимают точное предписание по выполнению вычислительного процесса, которое должно привести к решению поставленной задачи: На основе алгоритма с помощью языков программирования создаются программы расчета.

Учитывая то, что любая модель является некоторым приближением реального объекта, наибольшей достоверностью обладают результаты, полученные при помощи физического моделирования в реальных условиях. Однако такой подход связан с большими временными и экономическими затратами и что в большинстве случаев невозможно и в большинстве случаев данный метод используется для подтверждения результатов математического моделирования и проверки адекватности модели [70].

Использование вычислительных машин привело к развитию систем автоматического проектирования, в которых вначале реализовывались справочные и статистические алгоритмы [68, 69, 70-76].

Одновременно развивалось направление моделирования пластической деформации [77-104]. При этом использовались различные методы решения задач пластичности: метод совместного решения условия равновесия и условия пластичности (инженерный) [79]; метод сопротивления материалов пластическим деформациям; метод линий скольжения [81,105,106]; метод верхней оценки [80, 107-110]; метод нижней оценки [111-113]; вариационные методы [114-117].

Для получения достоверной информации, важное значение имеет метод реализации. Вначале широкое распространение имел метод Рица, затем с развитием вычислительной техники стали применяться дискретные методы, сущность которых заключается в замене непрерывной области дискретной моделью, например, метод конечных разностей. В методе граничных элементов [118, 119] разбиение области проводят только по границе тела. С его помощью решены некоторые технологические задачи штамповки [120,121].

Моделирование инструмента, его деформации и распространения в нем напряжений также является важно частью совершенствования процессов обработки

давлением. Так, в работе [122] описана проблема появления дефектов в, следствии увеличения скорости истечения избытка металла в облой во время стадии доштамповки. Показано, что это приводит к появлению дефектов типа расслоения в плоскости разъема штампа.

Современные программы моделирующие процессы обработки давлением позволяют рассчитывать не только напряженно-деформирующие параметры заготовки и инструмента, но так же позволяют определять усилия штамповки и энергозатраты. В ряде работ [123,124] авторы рассматривают процессы упрочнения и разупрочнения металла протекающие при осадке в результате были найдены оптимальные режимы нагружения, и показано влияние закона нагружения на удельную работу сил деформации

Таким образом, математическое моделирование может служить как средство управления различными параметрами процессов формоизменения металла. Помимо этого, его можно применять для разработки нового или совершенствования имеющегося инструмента [125, 126].

В настоящее время на рынке программного продукта имеется много различных программных пакетов, позволяющих производить расчеты пластического деформирования. Но в основе всех их лежит метод конечных элементов.

2.2 Метод конечных элементов. Основные принципы.

Метод конечных элементов (МКЭ) – метод решения вариационных задач. Данный метод применяется для решения задач деформации, теплопроводности, колебаний, гидро- газодинамики, электромагнетизма и других задач.

Первые разработки МКЭ были выполнены в 50-х годах двадцатого столетия для решения задач сопротивления материалов. В 60-е годы математики получили строгое обоснование этого метода, после чего он стал общим средством изучения задач в частных производных, постепенно вытесняя метод конечных разностей, который рассматривался в то время, как универсальное средство решения названных задач [127]. Благодаря работам О. Зенкевича, Р. Галлагера, Дж. Одена, и других ученых [128-130], начиная с 1970 г., МКЭ становится все более популярным среди

инженеров всех специальностей. Тогда же были разработаны первые программные комплексы, в которых реализовался метод конечных элементов.

Стоит отметить, что ещё в 1975-1980 гг. было показано, что наиболее эффективным методом решения ряда технологических задач обработки давлением является метод конечных элементов, однако, учитывая мощность вычислительных машин того времени, сводилось, как правило, к рассмотрению упрощенных плоских задач.

Основная идея метода конечных элементов [127-130] состоит в том, что любую непрерывную величину (перемещение, температура, давления и т.д.) можно аппроксимировать моделью, состоящей из отдельных участков, т.е. заменить исследуемый объект конечным числом дискретных элементов, взаимодействующих между собой только в узловых точках. В каждом элементе с помощью интерполяционных формул (линейный полином) задаются формы распределения искомых функций. В результате состояние каждого элемента и объекта в целом оценивается конечным числом узловых параметров интерполяции (значений функций и их производных в узлах элементов), которые определяются из решения соответствующих исходных уравнений.

Вектор узловых перемещений n -го тетраэдра содержит 12 компонент по 3 (u_x , u_y , u_z) в каждом узле i, j, m, l . Перемещения внутри тетраэдра аппроксимируются полиномом вида $\varphi = \alpha_1 + \alpha_2 x + \alpha_3 y + \alpha_4 z$. Существует возможность перейти к цилиндрическим координатам, считая $x = r \cdot \cos\theta$, $y = r \cdot \sin\theta$. Коэффициенты $\alpha_1 \dots \alpha_4$ определяются из системы 4-х уравнений из общей зависимости для φ путём подстановки в них координат узлов и соответствующих им узловых перемещений

$$\begin{cases} \varphi_i = \alpha_1 + \alpha_2 x_i + \alpha_3 y_i + \alpha_4 z_i \\ \varphi_j = \alpha_1 + \alpha_2 x_j + \alpha_3 y_j + \alpha_4 z_j \\ \varphi_m = \alpha_1 + \alpha_2 x_m + \alpha_3 y_m + \alpha_4 z_m \\ \varphi_l = \alpha_1 + \alpha_2 x_l + \alpha_3 y_l + \alpha_4 z_l \end{cases}$$

В матричном виде $\varphi = N_i \varphi_i + N_j \varphi_j + N_m \varphi_m + N_l \varphi_l = [N] \{ \varphi \}$

где $\{\varphi\} = \begin{Bmatrix} \varphi_i \\ \varphi_j \\ \varphi_m \\ \varphi_l \end{Bmatrix}$ – вектор узловых перемещений

$[N] = [N_i N_j N_m N_l]$ - матрица функций формы, которые имеют вид

$$N_p = \frac{1}{6v} (a_p + b_p x + c_p y + d_p z), (p = i, j, m, l)$$

коэффициенты – a_p, b_p, c_p, d_p – определяются через координаты узлов

$$a_i = \begin{vmatrix} x_j & y_j & z_j \\ x_m & y_m & z_m \\ x_i & y_i & z_i \end{vmatrix} \quad b_i = - \begin{vmatrix} 1 & y_j & z_j \\ 1 & y_m & z_m \\ 1 & y_i & z_i \end{vmatrix}$$

$$c_i = \begin{vmatrix} 1 & x_j & z_j \\ 1 & x_m & z_m \\ 1 & x_i & z_i \end{vmatrix} \quad c_i = - \begin{vmatrix} 1 & x_j & y_j \\ 1 & x_m & y_m \\ 1 & x_i & y_i \end{vmatrix}$$

Остальные коэффициенты получаются циклической перестановкой индексов

$$V = \frac{1}{6} \begin{vmatrix} 1 & x_j & y_i & z_i \\ 1 & x_j & y_j & z_j \\ 1 & x_m & y_m & z_m \\ 1 & x_l & y_l & z_l \end{vmatrix}$$

Поскольку $\varphi = [M]\{\varphi\}$, то полный вектор приращений узловых перемещений n-го тетраэдра имеет вид:

$$\{\Delta v\}^n = \begin{Bmatrix} \Delta U_x \\ \Delta U_y \\ \Delta U_z \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} N_i & 0 & 0 & N_j & 0 & 0 & N_m & 0 & 0 & N_l & 0 & 0 \\ 0 & N_i & 0 & 0 & N_j & 0 & 0 & N_m & 0 & 0 & N_l & 0 \\ 0 & 0 & N_i & 0 & 0 & N_j & 0 & 0 & N_m & 0 & 0 & N_l \end{bmatrix} = \begin{Bmatrix} \Delta U_{xi} \\ \Delta U_{yi} \\ \Delta U_{zi} \\ \Delta U_{xj} \\ \Delta U_{yj} \\ \Delta U_{zj} \\ \Delta U_{xm} \\ \Delta U_{ym} \\ \Delta U_{zm} \\ \Delta U_{xl} \\ \Delta U_{yl} \\ \Delta U_{zl} \end{Bmatrix}$$

Вектор приращения n-го тетраэдра имеет вид

$\{\Delta\varepsilon\}^n = [B]\{\Delta U\}^n$, где матрица $[B]$ получена дифференцированием предыдущего выражения по пространственным координатам, и с учётом N_p .

$$[B] = \frac{1}{6V} \begin{bmatrix} b_i & 0 & 0 & b_j & 0 & 0 & b_m & 0 & 0 & b_l & 0 & 0 \\ 0 & c_i & 0 & 0 & c_j & 0 & 0 & c_m & 0 & 0 & c_l & 0 \\ 0 & 0 & d_i & 0 & 0 & d_j & 0 & 0 & d_m & 0 & 0 & d_l \\ c_i & b_i & 0 & c_j & b_j & 0 & c_m & b_m & 0 & c_l & b_l & 0 \\ d_i & 0 & b_i & d_i & 0 & b_j & d_i & 0 & b_m & d_l & 0 & b_l \\ 0 & d_i & c_i & 0 & d_i & c_j & 0 & d_i & c_m & 0 & d_l & c_l \end{bmatrix}$$

Вектор приращения напряжений n-го элемента

$$\{\Delta\sigma\}^n = \begin{cases} [D]\{\Delta\varepsilon\}^n & \text{— для упругих элементов} \\ [D_p]\{\Delta\varepsilon\}^n & \text{— для пластичных элементов} \end{cases}$$

где $[D]$ и $[D_p]$ – соответственно упругая и упругопластическая матрицы. Верхнее выражение – это закон Гука, нижнее отражает упрочнение при пластической деформации.

Система разрешающих уравнений полного вектора приращений узловых перемещений на каждом шаге нагружения имеет вид

$$[K]\{\Delta V\} = \{\Delta F\}$$

где ΔF – вектор приращения нагрузки:

$[K] = \sum_{n-1}^M [K]^n$ - полная матрица жесткости, равная сумме подматриц для каждого элемента, которые определяются как

$$[K]^n = \begin{cases} [B]^T [D] [B] V & \text{— для упругих элементов} \\ [B]^T [D_p] [B] V & \text{— для пластичных элементов} \end{cases}$$

T – символ транспонирования матриц.

Зная полный вектор приращения узловых перемещений, определяются приращения деформаций и напряжений каждого элемента.

Текущие значения деформаций и напряжений каждого элемента на n-ом шаге нагружения определяются как:

$$\{\varepsilon\}_q = \{\varepsilon\}_{q-1} + \{\Delta\varepsilon\}_q$$

$$\{\sigma\}_q = \{\sigma\}_{q-1} + \{\Delta\sigma\}_q$$

Приведение упругих элементов к пластическому состоянию осуществляется с помощью коэффициента приведения β , который определяется для каждого элемента следующим соотношением

$$\sigma'_u = \sigma_T$$

где σ_T – текущее значение сопротивления деформации металла с учётом упрочнения и разупрочнения;

σ'_u – интенсивность напряжений элемента, приводимого к пластическому состоянию.

Для трёхмерной задачи:

$$\sigma'_u = \frac{1}{2} \sqrt{[(\sigma_x + \beta\Delta\sigma_x) - (\sigma_y + \beta\Delta\sigma_y)]^2 + [(\sigma_x + \beta\Delta\sigma_x) - (\sigma_z + \beta\Delta\sigma_z)]^2 + [(\sigma_y + \beta\Delta\sigma_y) - (\sigma_z + \beta\Delta\sigma_z)]^2 + 6(\tau_{xy} + \beta\tau_{xy})^2 + 6(\tau_{yz} + \beta\tau_{yz})^2 + 6(\tau_{zx} + \beta\tau_{zx})^2}$$

Зная компоненты вектора напряжений, можно найти эквивалентные напряжения. Суммирование соответствующих напряжений для контактных элементов на контактных поверхностях должно определить внешние нагрузки, возникающие от перемещений инструмента.

На внешних неконтактных поверхностях, где отсутствуют силы трения, проекции нормальных напряжений равны нулю, если нет действующих сил. При воздействии внешних сил проекции внутренних сил по границе равны проекциям распределённых внешних сил. Этим выполняются граничные условия интегрирования уравнений равновесия.

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.

2.3 Использование программы QForm для решения задач обработки металлов давлением

В настоящее время использование метода МКЭ для моделирования процессов обработки давлением уже не является преимуществом только крупных предприятий, его всё чаще начинают использовать во все большем количестве кузниц, заводах средней мощности [131]. Это связано, во-первых, с тем, что гораздо эффективнее и экономичнее промоделировать процессы ОМД, чем потом переделывать оснастку или устранять дефекты в деталях. А во-вторых, сейчас существует целый ряд пакетов прикладных программ позволяющие решать задачи в области обработки давлением при помощи метода МКЭ. Одним из них является пакет программ QForm выпускаемый ООО «КванторФорм». Данный пакет состоит из ряда программ, которые позволяют редактировать геометрию заготовки и штамповой оснастки, задавать граничные условия и условия протекания процесса, выбирать свойства материала детали и заготовки, корректировать свойства элементов участвующих в процессе, проводить расчёт процесса, а также анализировать полученные результаты. Стоит отметить, что QForm, позволяет получить значительное количество информации, необходимую для проектирования и анализа технологических процессов, а точность полученных результатов отмечается в ряде работ [131,132].

Данный программный комплекс 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 – упругопластический;
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;

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

Как отмечалось выше, пакет QForm включает в себя несколько программ, каждая из которых имеет своё функциональное назначение. Для простоты работы с данным пакетом алгоритм моделирования можно представить состоящим из следующих этапов[133]:

- подготовка геометрического описания инструментов и заготовки в пакетах САПР (результаты необходимо экспортировать в форматы dxf, step, igs, qsg);
- подготовка исходных данных и моделирование в QForm (создание основного файла исходных данных расчета в формате qfm и вспомогательных файлов в форматах crs, shl, sst, log);
- анализ результатов моделирования в QForm или QFormPlayer, создание файлов с различными результатами расчета (форматы bmp, avi, txt, qfl, stl, dxf, shl, crs).

Работа как с 2d геометрией, так и с 3d на первом этапе может вестись в любой системе, способной экспортировать свои файлы в форматы dxf (для 2d геометрии), step, igs, qsg (для 3d геометрии). На стадии подготовки исходных данных необходимо воспользоваться редактором геометрии QDraft (для 2d геометрии), который служит для предварительной обработки геометрии инструмента и заготовки, а так же для назначения тех элементов, которые будут относиться к заготовке и инструментам. Для 3d геометрии используется QShape, его функциональное назначение совпадает с QDraft. Отдельно стоит отметить базы данных, которые имеются в данном пакете, они содержат большинство материалов, смазок, оборудования, используемые в машиностроении, при этом, в случае необходимости можно создать новый элемент данной базы.

После задания геометрии и назначения всех требуемых параметров начинается сам анализ. Конечно-элементное ядро программы условно можно представить состоящим из системы авторазбиения конечноэлементной сетки и системы расчета методом конечных элементов. В QForm применена технология автоматического адаптивного переразбиения конечноэлементной сетки в ходе расчета. Также величина приращения по времени автоматически подбирается для каждого шага расчета. Распределение плотности конечноэлементной сетки напряжений зависит поля скоростей деформаций и геометрии деформируемого тела в момент переразбиения. Учитываются участки инструмента, которые войдут в контакт с деформируемым металлом на следующем шаге расчета (рисунок 2.1).

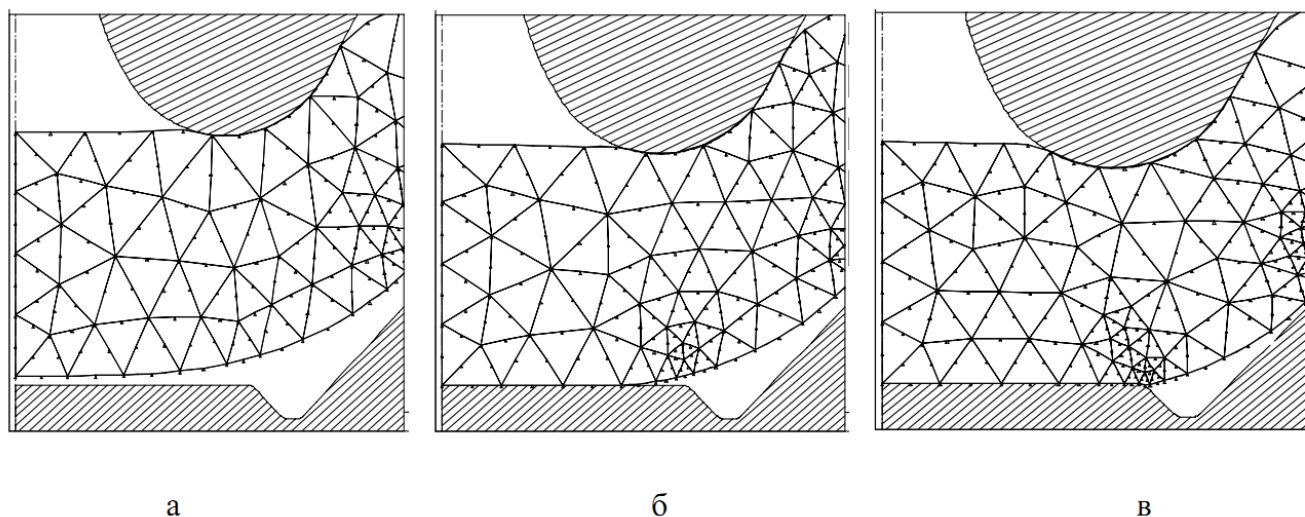


Рисунок 2.1. Пример переразбиения сетки конечных элементов при соприкосновении с инструментом: а – начальный вид сетки, б – увеличение плотности сетки в окрестности соприкосновения с ребром инструмента, в – вид сетки после соприкосновения с ребром

Следующим этапом работы является непосредственно анализ напряженно-деформируемых параметров исследуемого процесса. QForm позволяет исследовать изменения напряжения, деформации, скорости деформации, получать информацию по распределению температурных полей, течению металла, и требуемому усилию. Исходя из всех этих возможностей для моделирования нашей технологии и исследования зависимости удлинения стержневой части от геометрических параметров и коэффициента трения мы выбрали именно данный пакет программ.

2.3 Методика проведения исследования

В разделе 1 данной диссертации была предложена новая технология изготовления поковок компрессорных лопаток небольшой длины со значительным перепадом площадей поперечного сечения: выдавливание перьевой части, высадка замковой и затем, после дополнительного подогрева штамповка в окончательном штампе. Для того что бы на операции высадке можно было использовать штамп с компенсатором в виде продолжения перьевой части (рисунок 1.4) необходимо знать как будет течь металл, какое его количество будет истекать в перьевую часть. Поэтому было принято решение промоделировать данный процесс, что бы определить зависимость удлинения перьевой части в процессе высадке с одновременным истечением металла в компенсатор. Знать данное удлинение необходимо, поскольку при неверном расчёте длина стержня окажется слишком большой, а следовательно произойдёт незаполнение полости замковой части замка, что приведёт к браку. В случае если длина стержневой части будет слишком мала, то полость замка заполнится слишком рано, и на последних этапах штамповки будет происходить интенсивное истечение металла в полость штампа, что приведет к его быстрому износу.

Исследование будет проводится в программе QForm. Эскизы 3-d модели штамповой оснастки и заготовки предварительно проектируются в программе Siemens NX затем экспортируются в программу QDraft, где распределяются контуры заготовки и инструмента или сами инструменты и заготовка (в случае 3-d моделей), присваивая им стандартные имена, после этого программа QForm может использовать заданную геометрию в процессе проектирования.

Однако сначала нами было принято решение промоделировать влияние формы замковой части на относительное удлинение. Для этого были выбраны размеры поковки наиболее подходящие для изготовления рассматриваемой лопатки, были заданы коэффициент трения $f=0,3$ и степень деформации на операции высадке равная 0,6, остальные параметры приведены на рисунке 2.2. Для того что бы можно было отследить влияние изменение формы замковой части с квадратной на

осесимметричную, мы исследовали как будет влиять изменение площади замковой части на удлинение перьевой, и зависит ли оно от формы замка. Данное исследование необходимо провести, что бы можно было сделать вывод о возможности перехода к 2d моделированию, поскольку это значительно увеличит скорость расчета.

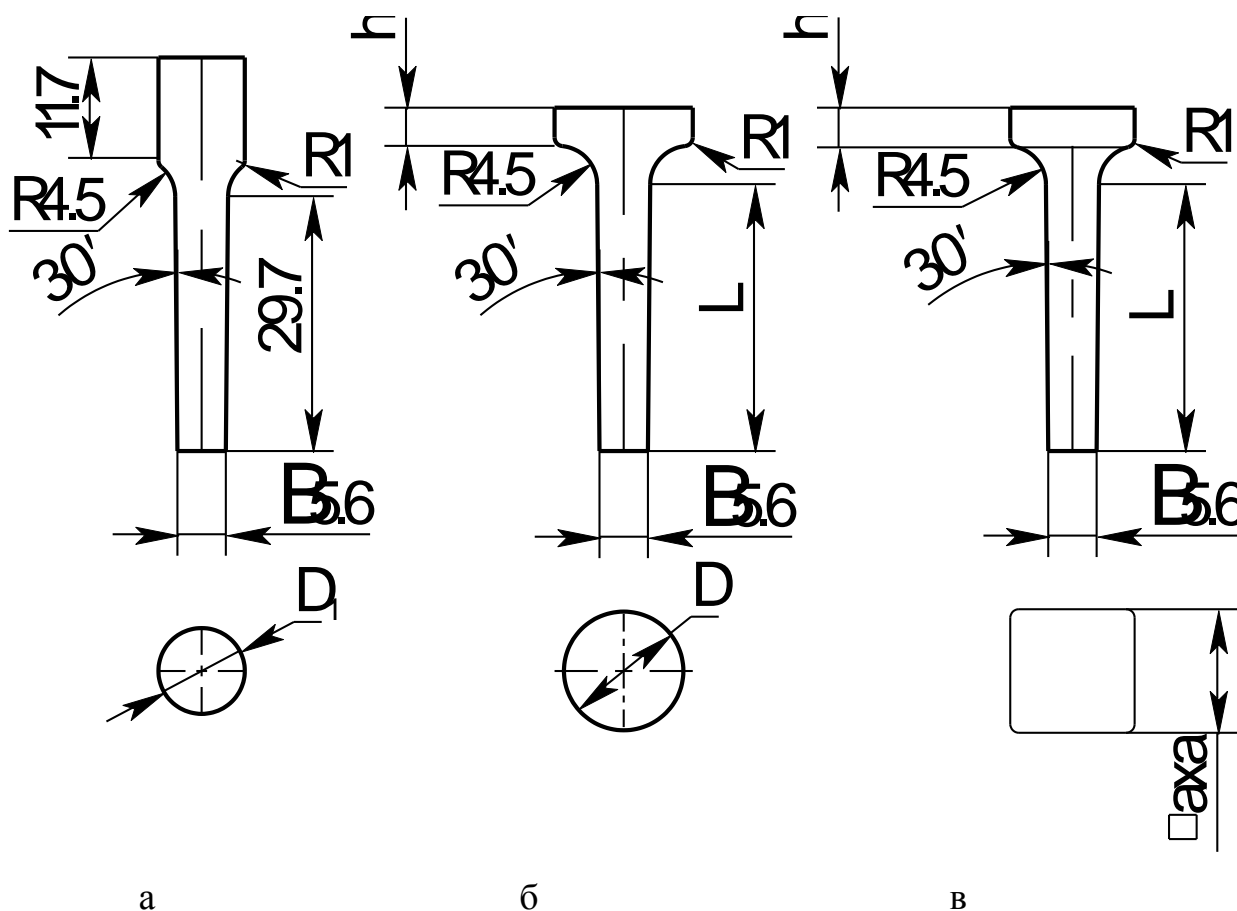


Рисунок 2.2. Эскизы предварительно выдавленной заготовки (а), поковки с высаженной круглой частью (б), поковки с высаженной квадратной частью (г)

Результаты моделирования занесем в таблицу 2.1.

Таблица 2.1– Зависимость относительного удлинения стержня от относительного диаметра высаженной части поковки, для квадратного и круглого сечения высаженной части.

D_1 , мм	$F_{\text{ПОК}}$, мм ²	D , мм	Круг				Квадрат			
			D , мм	h , мм	Δl , мм	$\Delta l/l$	a , мм	h , мм	Δl , мм	$\Delta l/l$
6,11	73,29	9,66	9,66	4,07	1,81	0,061	8,56	4,06	1,78	0,06

7,53	111,41	11,91	11,91	4,25	1,63	0,055	10,55	4,26	1,63	0,055
8,75	150,22	13,83	13,83	4,45	0,98	0,033	12,26	4,43	0,95	0,032
9,98	195,57	15,78	15,78	4,54	0,92	0,03	13,98	4,54	0,86	0,029
11,2	246,34	17,71	17,71	4,58	0,45	0,015	15,7	4,57	0,45	0,015

Из таблицы 2.1 видно, что при высадке с одновременным истечением металла в компенсатор удлинение перьевого части поковки не зависит от формы замковой части. Поэтому дальнейшее исследование будем проводить в модуле QForm 2d, а то позволит повысить скорость расчета. Так на рисунках 2.3 и 2.4 показаны начальные и конечные этапы моделирования с квадратной и осесимметричной замковой частью с указанием разбиения на конечные элементы. Как видно переход с 3-х мерного моделирования в 2-х мерное позволил сократить максимальное количество конечных элементов при авторазбиении с 6500 до 250-360.

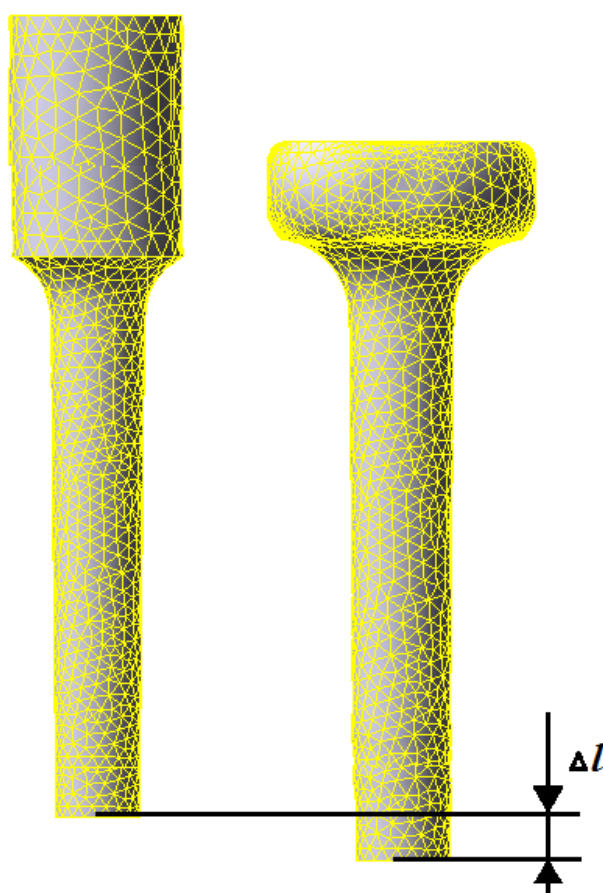


Рисунок 2.3. Начальная и конечная стадия высадки квадратной замковой части количество конечных элементов от 2546 до 6124

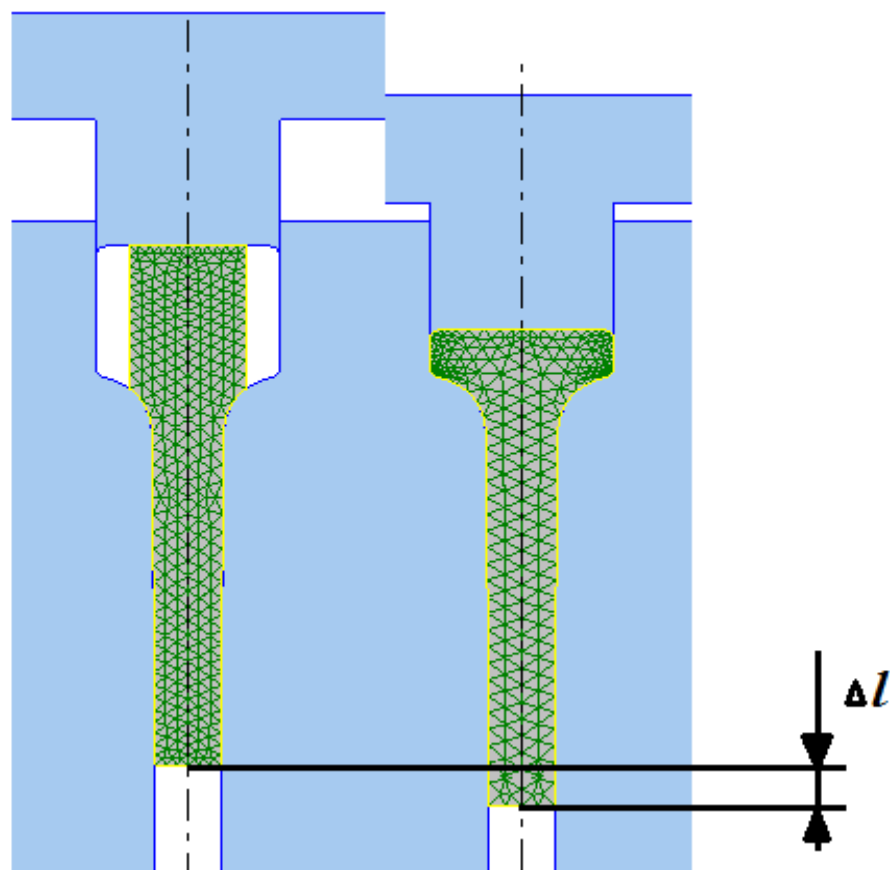


Рисунок 2.4. Начальная и конечная стадия высадки квадратной замковой части количество конечных элементов от 247 до 321

Перед началом исследования зависимости перьевого части от геометрических размеров заготовки и инструмента, а также коэффициента трения было принято решение промоделировать процесс высадки с одновременным истечением металла в стержневую часть для определения напряженно-деформируемого состояния и характера течения металла. В итоге было установлено, что данный процесс можно условно разделить на 2 этапа:

1. Осадка замковой части. На этой стадии происходит уменьшение высоты замковой части заготовки, и частичное заполнение полости штампа. Истечения металла в компенсатор не происходит (рисунок 2.5);
2. Доштамповка. Происходит окончательное заполнение штампа и одновременное истечение металла в компенсатор (рисунок 2.6).

В целом дальнейшая методика проведения исследования будет заключаться в том, что для определения зависимость удлинения пера от отдельных геометрических параметров будем менять каждый из этих параметров отдельно и

моделировать его влияние на удлинение. После чего будем проводить анализ полученных результатов, наносить полученную зависимость на координатную плоскость и аппроксимировать данные. И на окончательном этапе, после того как зависимости относительного удлинения от геометрических параметров и коэффициента трения будут получены, объединим данные зависимости в одну и выведем закономерность, позволяющую рассчитать первоначальную длину стержня.

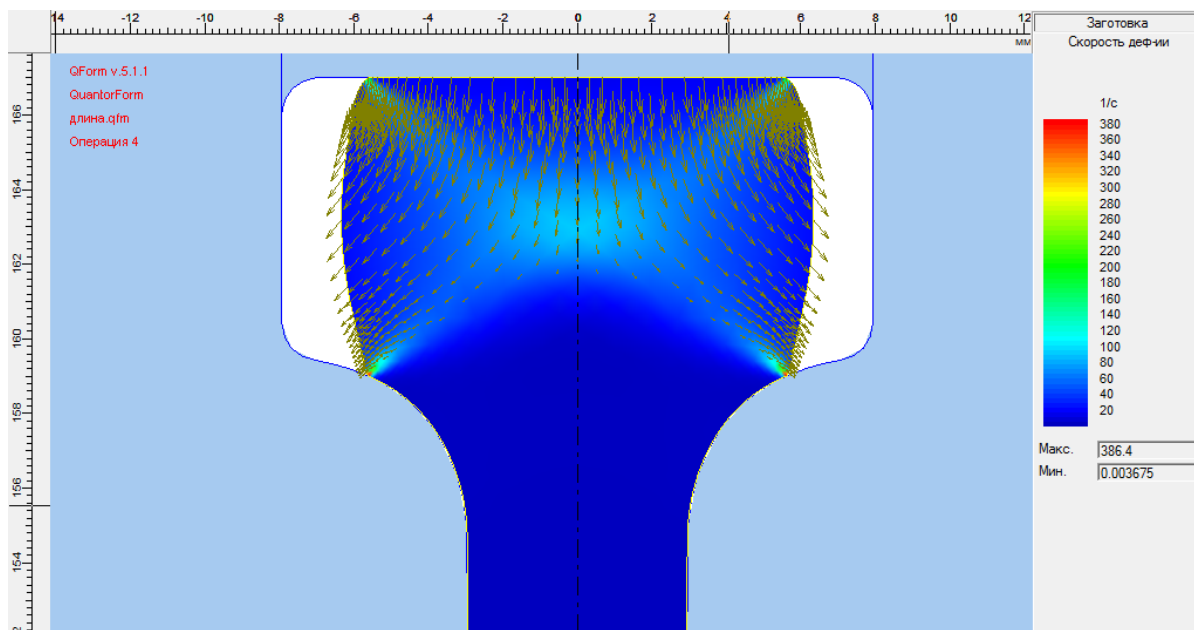


Рисунок 2.4. Скорости деформации на этапе осадке замковой части.

Истечения металла в перьевую часть не происходит.

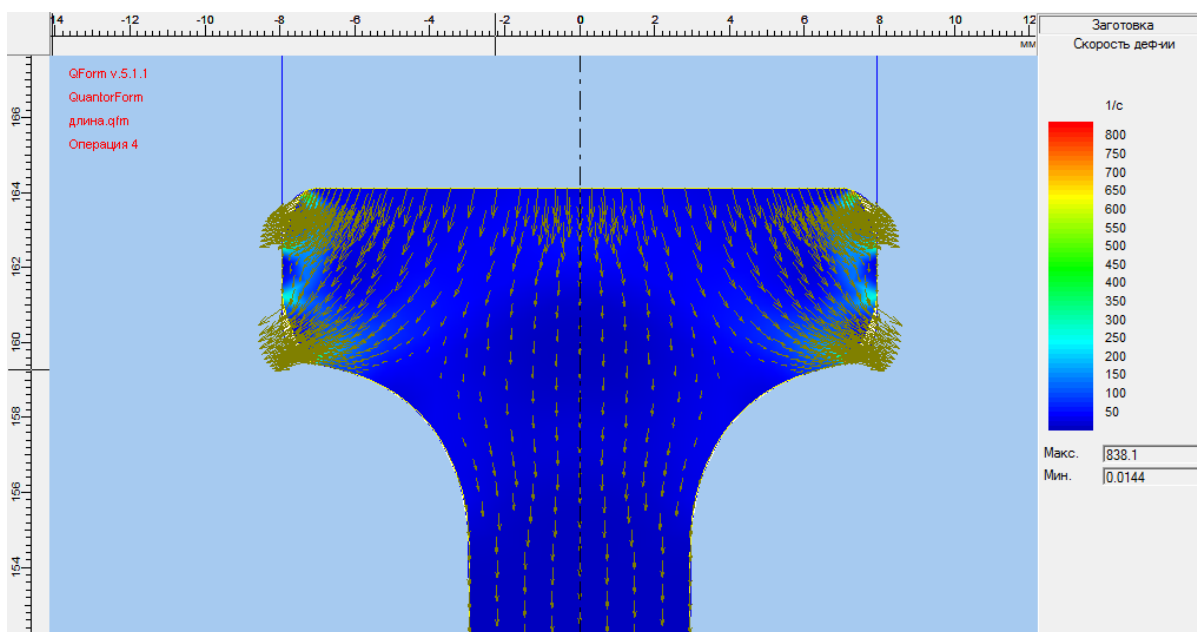


Рисунок 2.4. Скорости деформации на этапе доштамповки.

Происходит интенсивное истечение металла в перьевую часть.

Выводы по разделу

1. Рассмотрен метод конечных элементов, его основные принципы и значение в изучении процессов обработки металлов давлением.
2. Проанализированы основные допущения и преимущества программного комплекса QForm. Особо отмечается автоматическое переразбиение сетки на конечные элементы в зависимости от величины напряжений, интенсивности деформации и сложности формы поковки и инструмента.
3. Предложена методика дальнейшего исследования процесса высадки замковой части лопатки с одновременным истечением металла в перьевую часть.
4. Изучено влияние формы замковой части на относительное удлинение, и установлено что квадратную замковую часть можно заменить на осесимметричную, а это позволило сократить число конечных элементов при авторызбиении с 7000 до 300-500. И как следствие это позволило повысить скорость расчета.
5. Установлено что процесс высадки в закрытом штампе с компенсатором можно разделить на две стадии: осадка замковой части и доштамповка. На стадии осадки происходит заполнение полости замковой части, кроме углов и незначительное истечение металла в перьевую часть. На стадии доштамповки происходит интенсивное истечение металла в перьевую часть и заполнение всей полости штампа.

3. Исследовательский раздел

3.1 Постановка задачи исследования

Ранее отмечалось, что для изготовления компрессорных лопаток небольшой длины со значительным перепадом площадей поперечного сечения под холодную вальцовку нами предложена следующая технология: нагрев заготовки, выдавливание перьевой части, высадка замковой части, снова нагрев и окончательная штамповка. Из-за того что во время высадки замковой части будет происходить истечение металла в перьевую часть, то происходит удлинение данной части поковки, выступающей также в роли компенсатора. При этом необходимо знать количество металла, которое истечет в компенсатор, в противном случае у нас либо произойдет незаполнение полости штампа, либо в замковой части окажется избыток металла а это влечёт за собой следующие последствия:

- повышенный износ штамповой оснастки;
- резкое возрастание номинального усилия, что может привести к заклиниванию кривошипного пресса;
- разрыв штампа и приход его в состояние негодности.

Задача исследования: учитывая потребность в расчёте относительного удлинения перьевой части поковки возникает необходимость провести ряд экспериментов, которые позволили бы рассчитывать данное удлинение и разработать методику для инженерного расчёта деталей с поэлементным формированием поковки.

3.2 Допущения. Порядок проведения исследования. Основные этапы проведения исследования. Параметры

Допущения. В ходе исследования будем считать что заготовка и поковка осесимметричны. Также, учитывая, что моделирование будет проводиться в программном комплексе QForm, стоит отметить что в данном модуле заготовка и

инструмент считаются сплошными, однородными, изотропными телами. Материал заготовки считается вязкопластическим, а инструмента упругопластический.

Порядок проведения исследования. Исследование будет проводится в программе QForm. Эскизы штамповой оснастки и заготовки предварительно проектируются в программе Siemens NX затем экспортируются в программу QDraft, где распределяются контуры заготовки и инструмента по слоям, присваивая им стандартные имена, после этого программа QForm может использовать заданную геометрию в процессе проектирования. Поскольку моделирование будет проходить в QForm 2d, а детали осесимметричны, то эскизы в QDraft экспортируются в виде половины эскиза (рисунок 3.1).

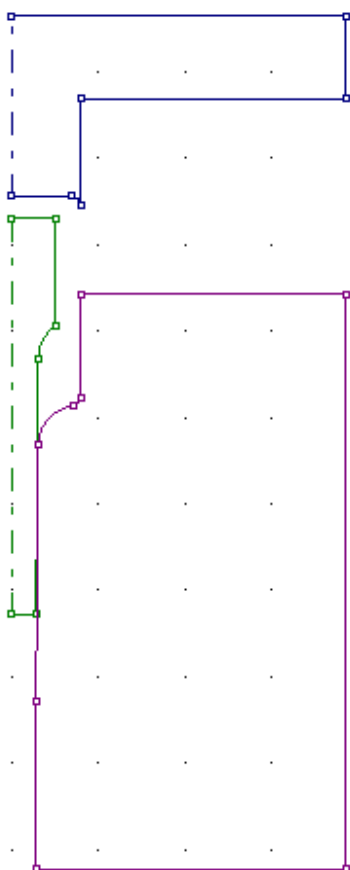


Рисунок 3.1 Эскиз для моделирования операции высадки с одновременным истечением металла в компенсатор в модуле QDraft. Слои показаны цветами: фиолетовый – матрица, синий – пуансон, зеленый – заготовка.

В ходе исследования необходимо найти как влияет каждый отдельный параметр на относительное удлинение перьевой части поковки. Сделаем общие эскизы поковки для всего исследования с буквенным обозначением (рисунок 3.2).

На рисунке 3.2 буквами обозначены: D_1 – диаметр высаживаемой части; D – диаметр высаженной части; d – диаметр перьевой части; H – высота высаживаемой части; h – высота высаженной части; l – длина перьевой части до высадки без учётов радиусов скругления; L – длина перьевой части после высадки с учётом радиусов скругления; R – радиуса скругления перьевой части; r_1 – радиус скругления поковки около пуансона; r_2 – радиус скругления дна матрицы; α – угол наклона перьевой части; Δl – удлинение перьевой части.

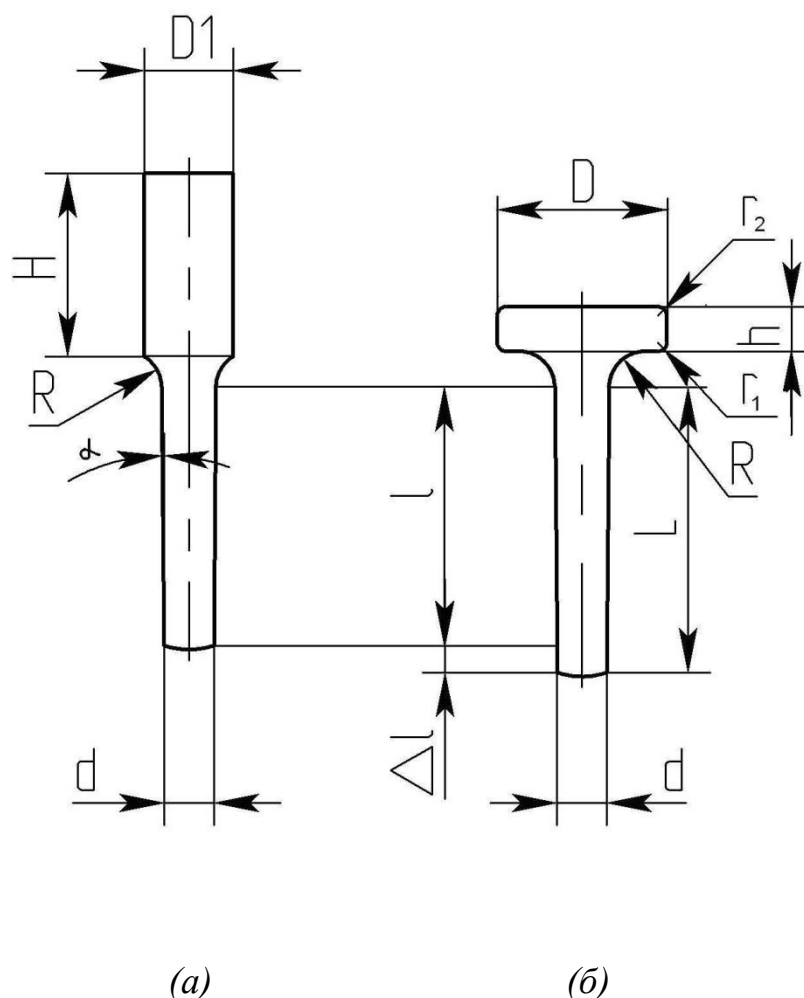


Рисунок 3.2 – Эскиз предварительно выдавленной заготовки (а) и высаженной поковки (б).

Основные этапы. Решение задачи исследования будем искать в виде:

$$\frac{\Delta l}{l} = f(k), \quad (3.1)$$

где

Δl – удлинения перьевой части в процессе высадки, мм;

l – длина перьевой части до высадки без учёта радиусов скругления, мм;

k – комплексный параметр, учитывающий геометрию заготовки и поковки, а так же коэффициент трения.

Для определения параметра k разобьём наше исследование на следующие этапы:

- 1) Исследование влияния длины перьевой части на относительное удлинение.
- 2) Исследование влияния диаметра высаженной части на относительное удлинение.
- 3) Исследование влияния радиуса скругления перьевой части на относительное удлинение.
- 4) Исследование влияния радиуса скругления дна матрицы на относительное удлинение.
- 5) Исследование влияния радиуса скругления поковки у пуансона на относительное удлинение.
- 6) Исследование влияния степени деформации высаживаемой части на относительное удлинение.
- 7) Исследование влияния угла наклона перьевой части на относительное удлинение.
- 8) Исследование влияния коэффициента трения на относительное удлинение

Поскольку удлинение стержня зависит от диаметра, то будем искать влияние геометрических параметров на относительное удлинение, как их отношение к этому диаметру. Поэтому мы получили следующие относительные величины:

- отношение длины перьевой части к диаметру:

$$m = \frac{l}{d}, \quad (3.2)$$

d – диаметр перьевой части заготовки;

- относительный диаметр поковки:

$$n = \frac{D^2}{d^2}, \quad (3.3)$$

где

D – диаметр Высаженной части поковки.

- относительный радиус скругления перьевой части:

$$\xi_R = \frac{R}{d}, \quad (3.4)$$

где

R – радиус скругления перьевой части.

- относительный радиус скругления дна матрицы:

$$\xi_1 = \frac{r_1}{d}, \quad (3.5)$$

где

r_1 – радиус скругления дна матрицы.

- относительный радиус скругления поковки у пуансона:

$$\xi_2 = \frac{r_2}{d}, \quad (3.6)$$

где

r_2 – радиус скругления около пуансона.

- степень деформации высаживаемой части:

$$\varepsilon_{\text{выс}} = 1 - \frac{D_1^2}{D^2}, \quad (3.7)$$

где

D_1 – диаметр высаживаемой части.

Коэффициент трения (f) в исследовании будем брать по закону Амонтона-Кулона.

3.3 Исследование влияния длины перьевой части поковки на её относительное удлинение

В ходе данного исследования необходимо построить график зависимости относительного удлинения от отношения длины перьевой части к диаметру перьевой части, после этого аппроксимируем график. Из (рисунка 3.2) видно, что для изменения отношения длины перьевой части к диаметру необходимо изменить длину стержня, а остальные параметры поковки можно оставить без изменения, поэтому зададим все размеры заготовки, а значения длины стержня, отношение длины перьевой части к диаметру, высоты высаженной части, удлинения и относительного удлинения занесём в таблицу 3.1.

$d=5,6\text{мм};$

$D_1=10\text{мм};$

$D=15,85\text{мм};$

$R=4,5\text{мм};$

$r_1=1\text{мм};$

$r_2=1\text{мм};$

$\alpha=30^\circ;$

$H=11,7\text{мм};$

$f=0,3.$

Таблица 3.1 – Зависимости относительного удлинения перьевой части от относительной длины стержня.

$l, \text{ мм}$	t	$h, \text{ мм}$	$\Delta l, \text{ мм}$	$\Delta l / l$
0	0	4,4	1,39	∞
5,94	1,06	4,4	1,65	0,27
11,87	2,12	4,42	1,57	0,13
17,81	3,18	4,39	1,37	0,08
23,74	4,24	4,41	1,24	0,05
29,7	5,3	4,42	1,06	0,037
35,62	6,36	4,43	1,04	0,03
41,55	7,42	4,42	0,67	0,016
47,49	8,48	4,42	0,36	0,008
53,42	9,54	4,43	0,13	0,002

Из рисунка 3.3 видно, что графика зависимости относительного удлинения перьевой части от отношения длины стержня к диаметру имеет вид дробно-линейной функции.

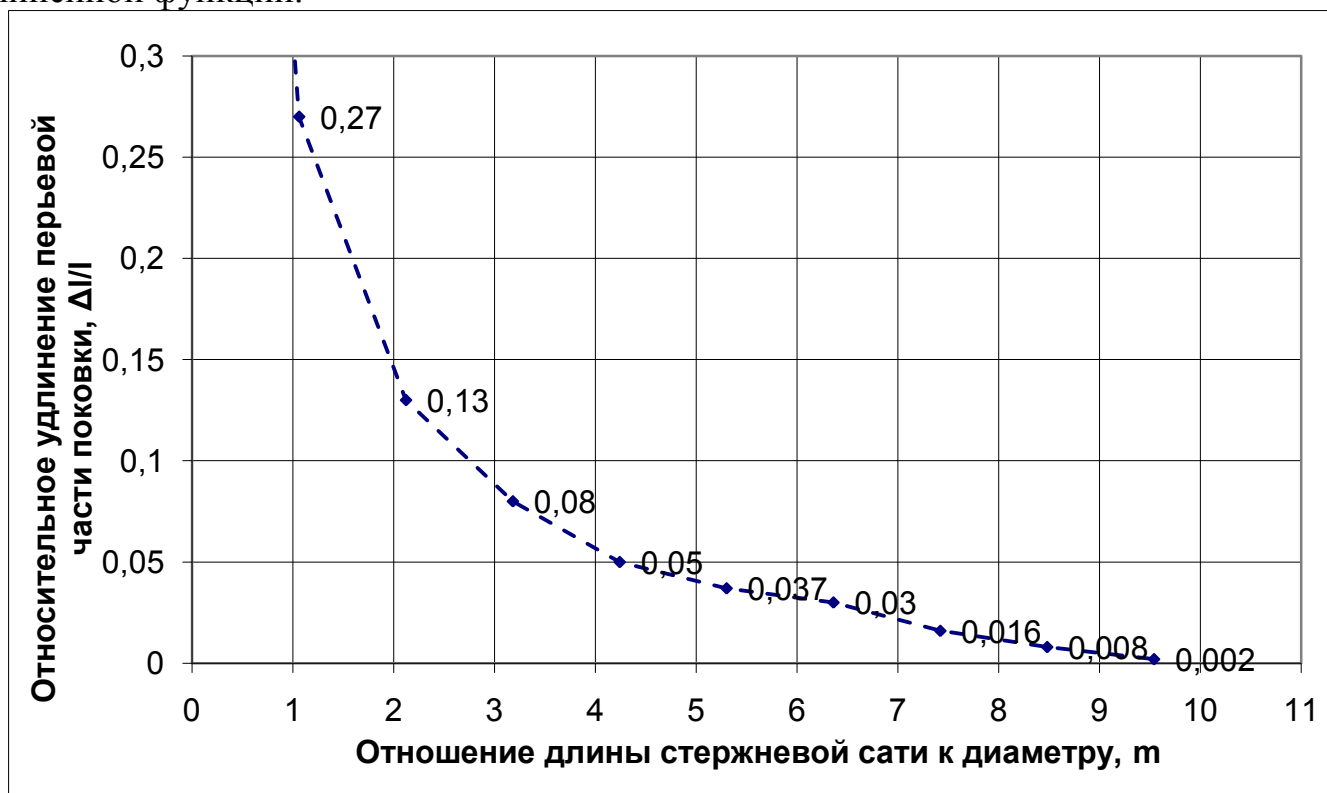


Рисунок 3.3 – Зависимость относительного удлинения перьевой части от отношения длины перьевой части к диаметру.

В результате аппроксимации зависимость относительного удлинения перьевой части от отношения длины перьевой части к диаметру должна быть представлен в виде:

$$\frac{\Delta l}{l} = \frac{a_1 m + b_1}{m + c_1} \quad (3.8)$$

где

a_1 , b_1 и c_1 – коэффициенты, определяющие положение гиперболы на координатной плоскости, рассчитывается исходя из экспериментальных данных.

Подставим максимальное, минимальное значения $\Delta l/l$ и соответствующие им значения m , а так же значение $\Delta l/l$ при $m=5,3$ в (3.8) получим систему уравнений:

$$\begin{cases} 0,27 = \frac{a_1 \cdot 1,06 + b_1}{1,06 + c_1} \\ 0,002 = \frac{a_1 \cdot 9,54 + b_1}{9,54 + c_1} \\ 0,037 = \frac{a_1 \cdot 5,3 + b_1}{5,3 + c_1} \end{cases} \quad (3.9)$$

Решив (3.9) получим:

$$\begin{cases} a_1 = -0,046 \\ b_1 = 0,453 \\ c_1 = 0,439 \end{cases}$$

Подставив значения k_1 и b_1 в (3.8) получим:

$$\frac{\Delta l}{l} = \frac{0,453 - 0,046m}{m + 0,439} \quad (3.10)$$

Из рисунка 3.4 видно что, наибольшую ошибку аппроксимированная зависимость даёт при значении $m=2,12$ и составила 0,008 от отношения Δ/l . Подобные ошибки как правило связаны либо с упрощением либо с особенностями моделирования (моделирование дискретно)

Учитывая, что был введён коэффициент b то необходимо вести ограничение, иначе относительное удлинение может оказаться отрицательным, для этого рассчитаем при каком значении m отношение Δ/l будет равно нулю.

Из расчета следует что значение $m=9,85$ является критическим, поэтому выведенной формулой можно пользоваться только при $m < 9,85$. А при $m \geq 9,85$ принимаем относительное удлинение равным нулю.

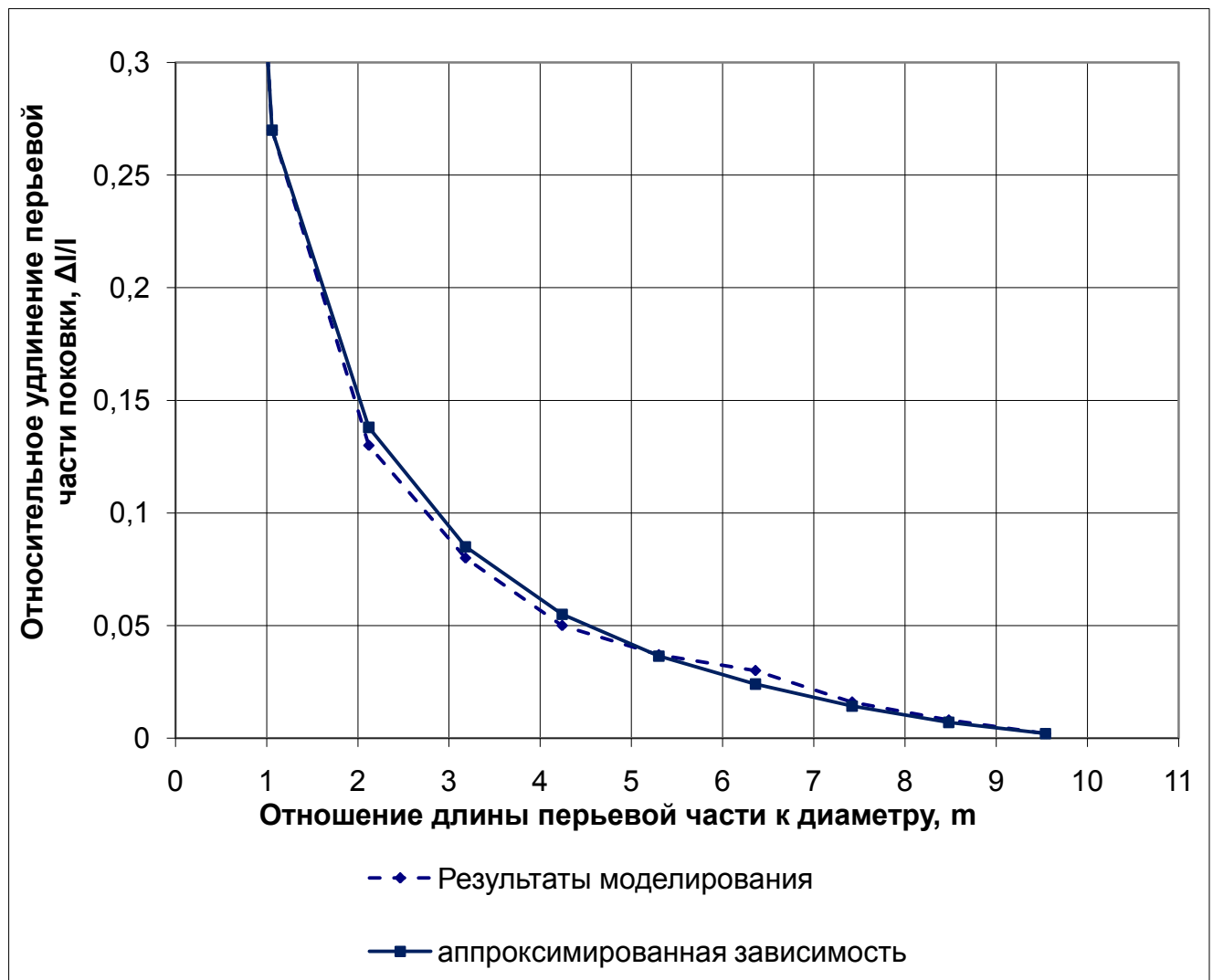


Рисунок 3.4 – Аппроксимация зависимости относительного удлинения перьевой части от отношения длины стержня к диаметру.

Анализируя результаты моделирования, можно сделать вывод, что при увеличении длины перьевой её относительное удлинение уменьшается. Это связано с тем что при увеличении данного параметра увеличивается величина контактной поверхности по которой действует трение, а следовательно и сама сила трения.

3.4 Исследование влияния диаметра высаженной части поковки на относительное удлинение перьевой части поковки

При исследовании влияния диаметра высаженной части на относительное удлинение будем исследовать зависимость относительного удлинения от относительного диаметра n , который рассчитывается по (3.3).

В ходе данного исследования необходимо задать ограничения, построить график зависимости относительного удлинения от относительного диаметра высаженной части поковки и аппроксимировать график. Из (3.7) видно, что на диаметр высаженной части (D) влияет диаметр высаживаемой части (D_1), а поскольку заготовка была предварительно выдавлена, то диаметр высаживаемой части зависит от диаметра перьевой части следующим образом:

$$D_1 = \frac{d}{\sqrt{1 - \varepsilon_{\text{выд}}}}, \quad (3.11)$$

где

$\varepsilon_{\text{выд}}$ – степень деформации при выдавливании.

Учитывая, что испытания проводятся при температуре 980°C и что для сплава ВТ8 допустимая степень деформации при данной температуре равна 75%, то максимальный диаметр высаживаемой части можно рассчитать по формуле:

$$D_{1\text{MAX}} = \frac{d}{\sqrt{1 - 0,75}}, \quad (3.12)$$

Учитывая, что диаметр высаживаемой части не может быть меньше диаметра стержня на уровне горизонтально поверхности высаживаемой части, получаем неравенство:

$$d + 2l \cdot \operatorname{tg}(\alpha) \leq D_1 \leq \frac{d}{\sqrt{1-0,75}} \quad (3.13)$$

Зададим размеры которые будут оставаться постоянными:

$$d=5,6\text{мм};$$

$$l=29,7\text{мм};$$

$$\varepsilon_{\text{ВЫС}} = 0,6;$$

$$R=4,5\text{мм};$$

$$r_1=1\text{мм};$$

$$r_2=1\text{мм};$$

$$\alpha=30^\circ;$$

$$H=11,7\text{мм};$$

$$f=0,3.$$

Экспериментальные данные занесем в таблицу 3.2.

Таблица 3.2 – Зависимость относительного удлинения стержня от относительного диаметра высаженной части поковки.

$D_1, \text{мм}$	$D, \text{мм}$	n	$h, \text{мм}$	$\Delta l, \text{мм}$	$\Delta l/l$
6,11	9,66	2,98	4,07	1,83	0,062
7,53	11,91	4,52	4,25	1,58	0,053
8,75	13,83	6,1	4,45	1	0,034
9,98	15,78	7,94	4,54	0,92	0,03
11,2	17,71	10	4,58	0,4	0,013

Из рисунка 3.5 видно, что зависимость относительного удлинения перьевой части от относительного диаметра высаженной части имеет вид близкий к линейному, поэтому аппроксимацию данной зависимости будем искать в виде:

$$\frac{\Delta l}{l} = k_2 n + b_2 \quad (3.14)$$

где

k_2 и b_2 – коэффициенты, определяющие положение прямой на координатной плоскости, рассчитываются исходя из экспериментальных данных.

Подставим максимальное и минимальное значения $\Delta l/l$ и соответствующие им значения n в (3.14) получим систему уравнений:

$$\begin{cases} 0,062 = k_2 \cdot 2,98 + b_2 \\ 0,013 = k_2 \cdot 10 + b_2 \end{cases} \quad (3.15)$$

Решив (3.15) получим:

$$\begin{cases} k_2 = -0,007 \\ b_2 = 0,083 \end{cases}$$

Подставив значения k_2 и b_2 в (3.14) получим:

$$\frac{\Delta l}{l} = 0,083 - 0,007n. \quad (3.16)$$

Исходя из полученных результатов, можно сделать вывод что увеличение данного параметра позволяет снизить величину относительного удлинения перьевой части поковки. Поэтому в качестве рекомендации при разработки таких технологических процессов было рекомендовано брать максимально возможное данное значение.

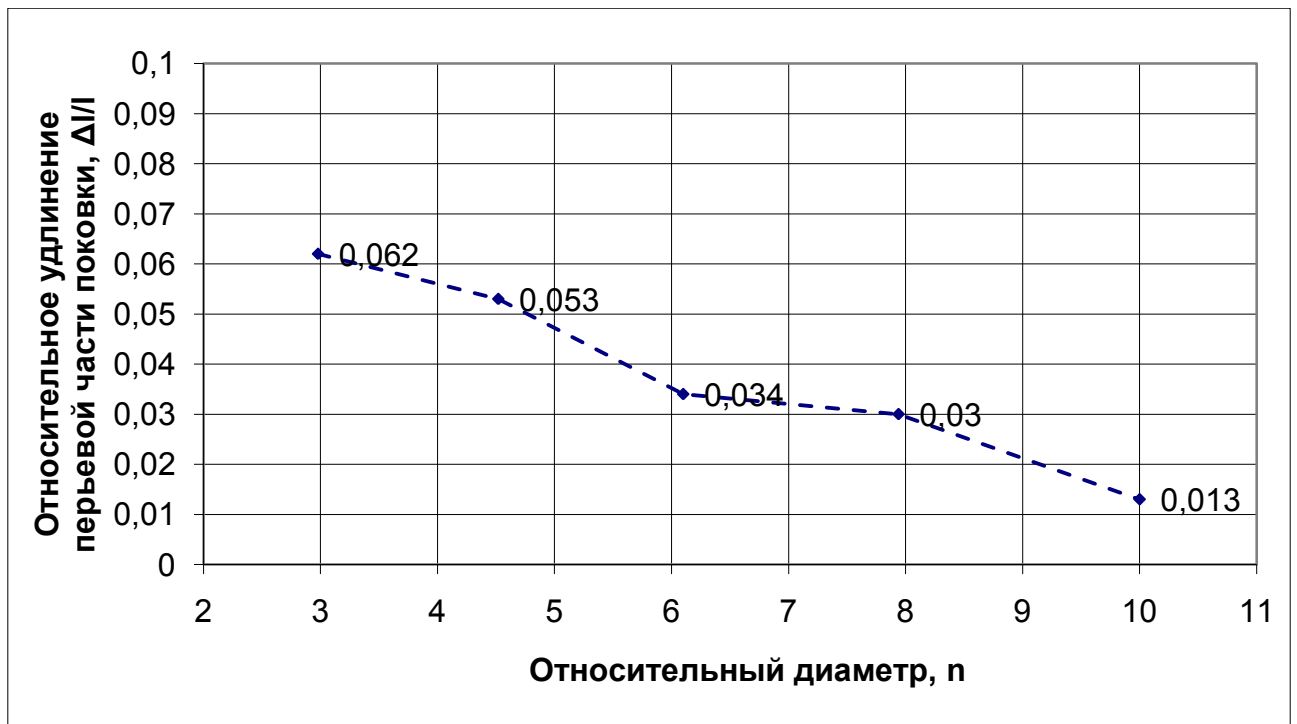


Рисунок 3.5 – Зависимость относительного удлинения перьевой части от относительного диаметра высаженной части.

Из рисунка 3.6 видно, что аппроксимированная прямая даёт максимальную ошибку в точке $n=6,1$. Ошибка составила 0,006 от отношения $\Delta l/l$.

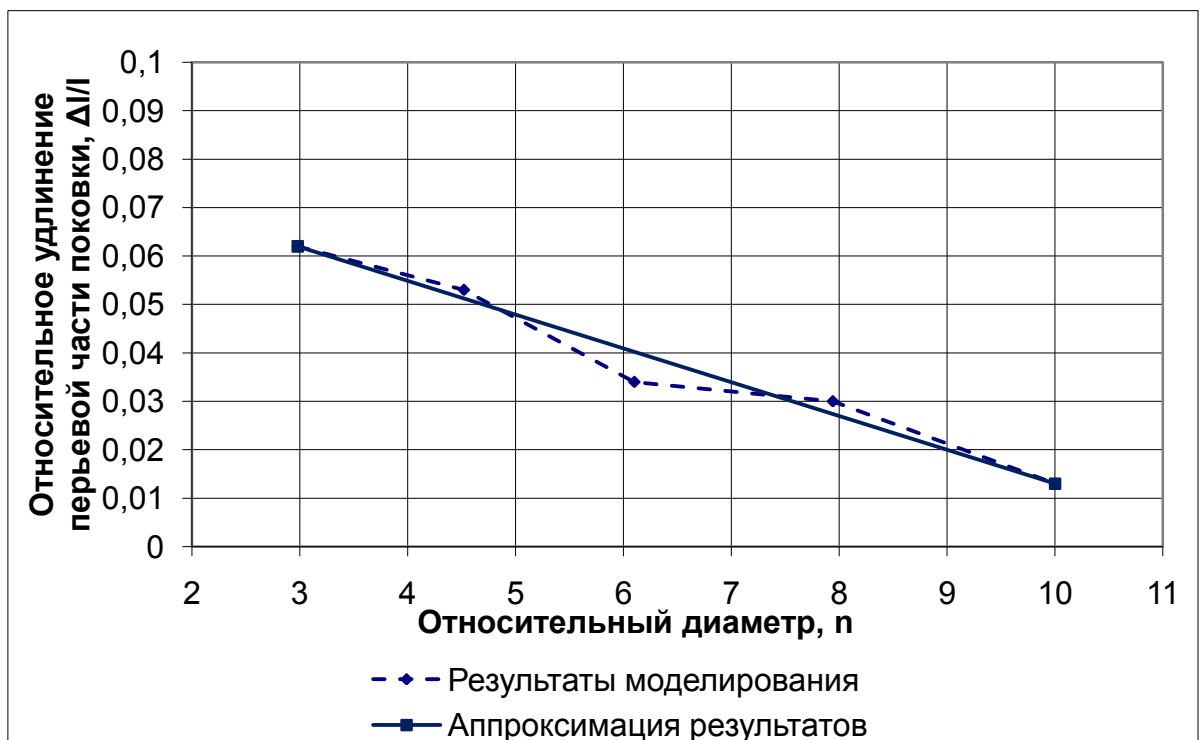


Рисунок 3.6 – Аппроксимация зависимости относительного удлинения перьевой части от относительной длины стержня.

3.5 Исследование влияния радиуса скругления на переходе от замковой к перьевой части поковки на относительное удлинение перьевой части поковки

При исследовании влияния радиуса скругления перьевой части на относительное удлинение будем исследовать зависимость относительного удлинения от относительного радиуса скругления перьевой части ξ_R , который рассчитывается по (3.4).

В ходе данного исследования необходимо построить график зависимости относительного удлинения от относительного радиуса скругления перьевой части, аппроксимировать полученный график и найти максимальную ошибку. Из (4) видно, что для изменения относительного радиуса скругления перьевой части необходимо изменять только радиус скругления перьевой части, поэтому задаём следующие параметры:

$$d=5,6\text{мм};$$

$$l=29,7\text{мм};$$

$$D_1=10\text{мм};$$

$$D=15,85\text{мм};$$

$$r_1=1\text{мм};$$

$$r_2=1\text{мм};$$

$$\alpha=30^\circ;$$

$$H=11,7\text{мм};$$

$$f=0,3.$$

Проведём ряд экспериментов, а полученные данные занесём в таблицу 3.3.

Таблица 3.3 – Зависимость относительного удлинения перьевой части от относительного радиуса скругления перьевой части.

$R, \text{ мм}$	ξ_R	$h, \text{ мм}$	$\Delta l, \text{ мм}$	$\Delta l/l$
0,1	0,02	4,45	1,81	0,061
0,5	0,09	4,5	1,57	0,053
1	0,18	4,45	1,51	0,051

2	0,36	4,55	1,28	0,043
3	0,54	4,4	1,07	0,036
4	0,71	4,45	1,04	0,035
5	0,89	4,5	0,92	0,031
6	1,07	4,5	0,86	0,029
7	1,25	4,45	0,83	0,028
8	1,43	4,4	0,86	0,029
9	1,6	4,4	0,83	0,028
10	1,79	4,35	0,8	0,027
11	1,96	4,44	0,8	0,027

На основании таблицы 3.3 построим график зависимости относительного удлинения перьевой части от относительного радиуса скругления перьевой части (рисунок 3.7)

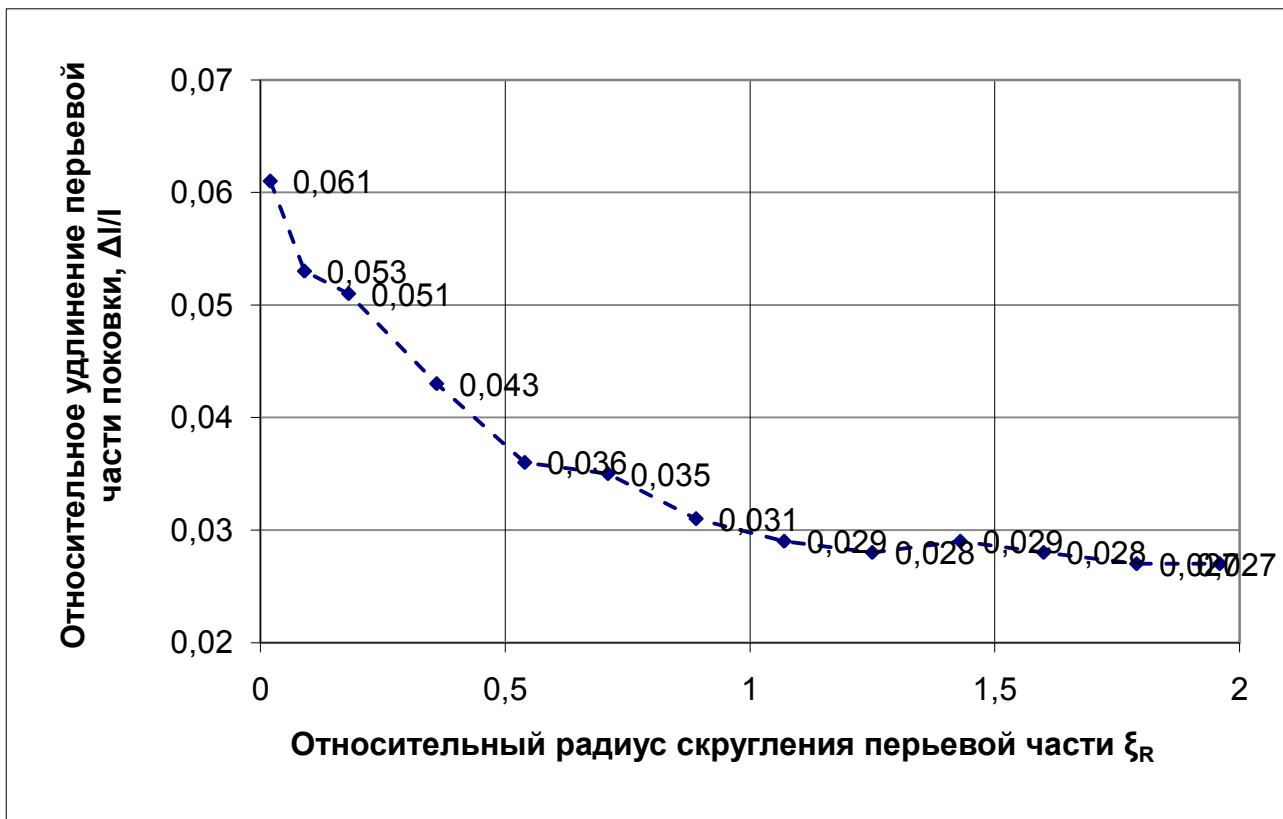


Рисунок 3.7 – Зависимость относительного удлинения перьевой части от относительного радиуса скругления перьевой части.

Из рисунка 3.7 видно, что имеет вид дробно-линейной функции, поэтому данная зависимость будет иметь вид:

$$\frac{\Delta l}{l} = \frac{a_3 \xi_R + b_3}{\xi_R + c_3} \quad (3.17)$$

где

a_3 , b_3 и c_3 – коэффициенты, определяющие положение гиперболы на координатной плоскости, рассчитывается исходя из экспериментальных данных.

Подставим максимальное, минимальное и значения $\Delta l/l$ и соответствующие им значения ρ , а так же значение $\Delta l/l$ при $\xi_R = 0,54$ в (3.17) получим систему уравнений:

$$\begin{cases} 0,061 = \frac{a_1 \cdot 0,02 + b_1}{0,02 + c_1} \\ 0,036 = \frac{a_1 \cdot 0,54 + b_1}{0,54 + c_1} \\ 0,027 = \frac{a_1 \cdot 1,96 + b_1}{1,96 + c_1} \end{cases} \quad (3.18)$$

Решив (3.18) получим:

$$\begin{cases} a_3 = 0,022 \\ b_3 = 0,017 \\ c_3 = 0,268 \end{cases}$$

Подставив значения a_3 , b_3 , c_3 в (3.17) получим

$$\frac{\Delta l}{l} = \frac{0,022 \cdot \xi_R + 0,017}{\xi_R + 0,268} \quad (3.19)$$

Из рисунка 3.8 видно, что аппроксимированная зависимость даёт максимальную ошибку в точке $\xi_R = 0,36$ и составляет 0,003 от отношения $\Delta l/l$.

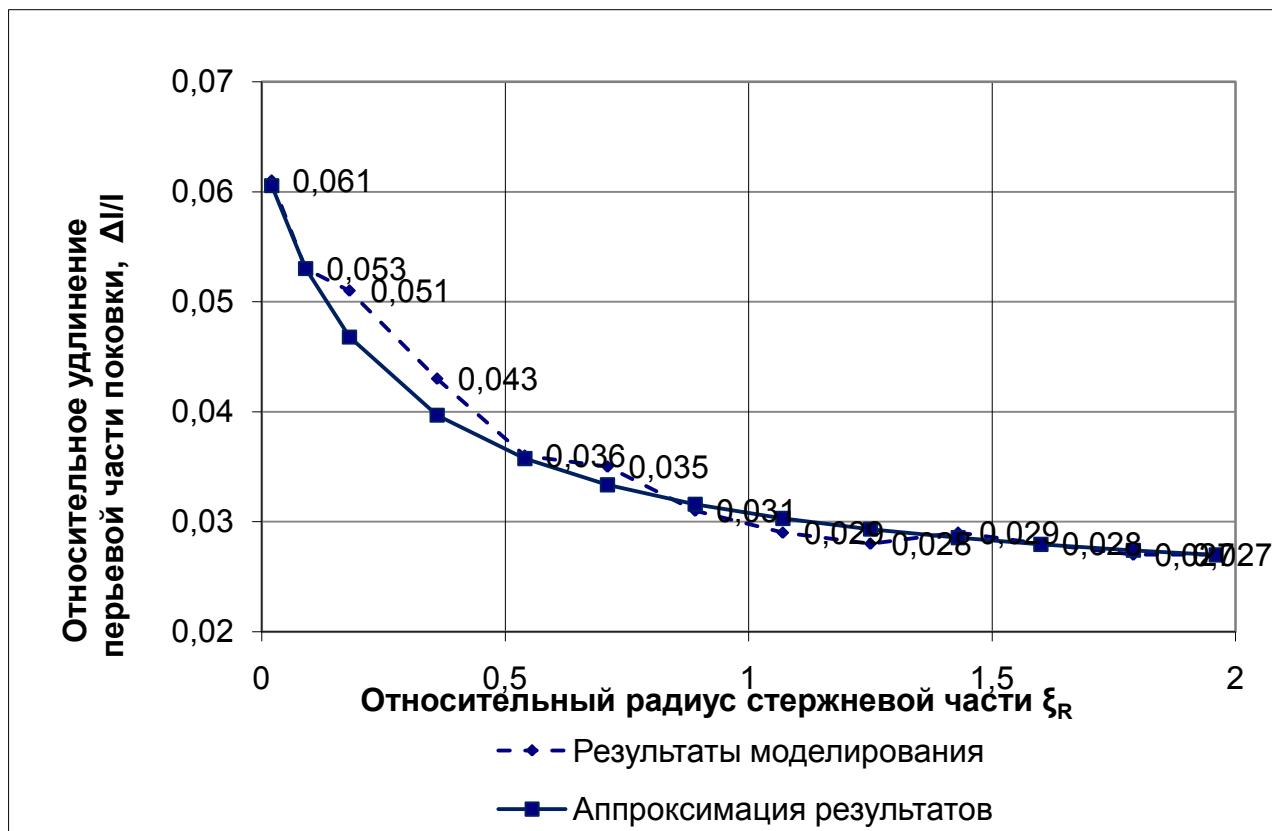


Рисунок 3.8 – Аппроксимация зависимости относительного удлинения перьевого части от относительного радиуса скругления перьевого части.

Учитывая полученные результаты, представляется наиболее рациональным использовать радиуса при которых значения данного параметра больше 1,5, а относительное удлинение перьевого части поковки становится постоянным. Однако большие радиуса скругления повлекут за собой увеличение КИМ и использование такой последовательности изготовления поволок станет не технологичным.

3.6 Исследование влияния радиуса скругления дна матрицы на относительное удлинение перьевого части поковки

При исследовании влияния радиуса скругления дна матрицы на относительное удлинение будем исследовать зависимость относительного удлинения от относительного радиуса скругления дна матрицы ξ_1 , который рассчитывается по (3.5). В ходе данного исследования необходимо построить график зависимости относительного удлинения от относительного радиуса скругления дна матрицы,

аппроксимировать полученный график и найти максимальную ошибку. Из (3.5) видно, что для изменения относительного радиуса скругления дна матрицы необходимо изменять только радиус скругления дна матрицы, поэтому задаём следующие параметры:

$$d=5,6\text{мм};$$

$$l=29,7\text{мм};$$

$$D_1=10\text{мм};$$

$$D=15,85\text{мм};$$

$$R=4,5\text{мм};$$

$$r_2=1\text{мм};$$

$$\alpha=30^\circ;$$

$$H=11,7\text{мм};$$

$$f=0,3.$$

Занесём экспериментальные данные в таблицу 3.4

Таблица 3.4 – Зависимость относительного удлинения перьевой части от относительного радиуса скругления дна матрицы.

$r_1, \text{мм}$	ξ_1	$h, \text{мм}$	$\Delta l, \text{мм}$	$\Delta l/l$
0,1	0,018	4,46	1,45	0,049
1	0,179	4,65	1,3	0,044
2	0,357	4,42	1,05	0,037
3	0,536	4,43	9,8	0,033
4	0,714	4,43	0,9	0,03
5	0,893	4,44	0,85	0,029

Из рисунка 3.9 видно, что зависимость имеет вид прямой, поэтому будем аппроксимировать данную зависимость в виде:

$$\frac{\Delta l}{l} = k_4 \xi_1 + b_4 \quad (3.20)$$

где

k_4 и b_4 – коэффициенты, определяющие положение прямой на координатной плоскости, рассчитываются исходя из экспериментальных данных.

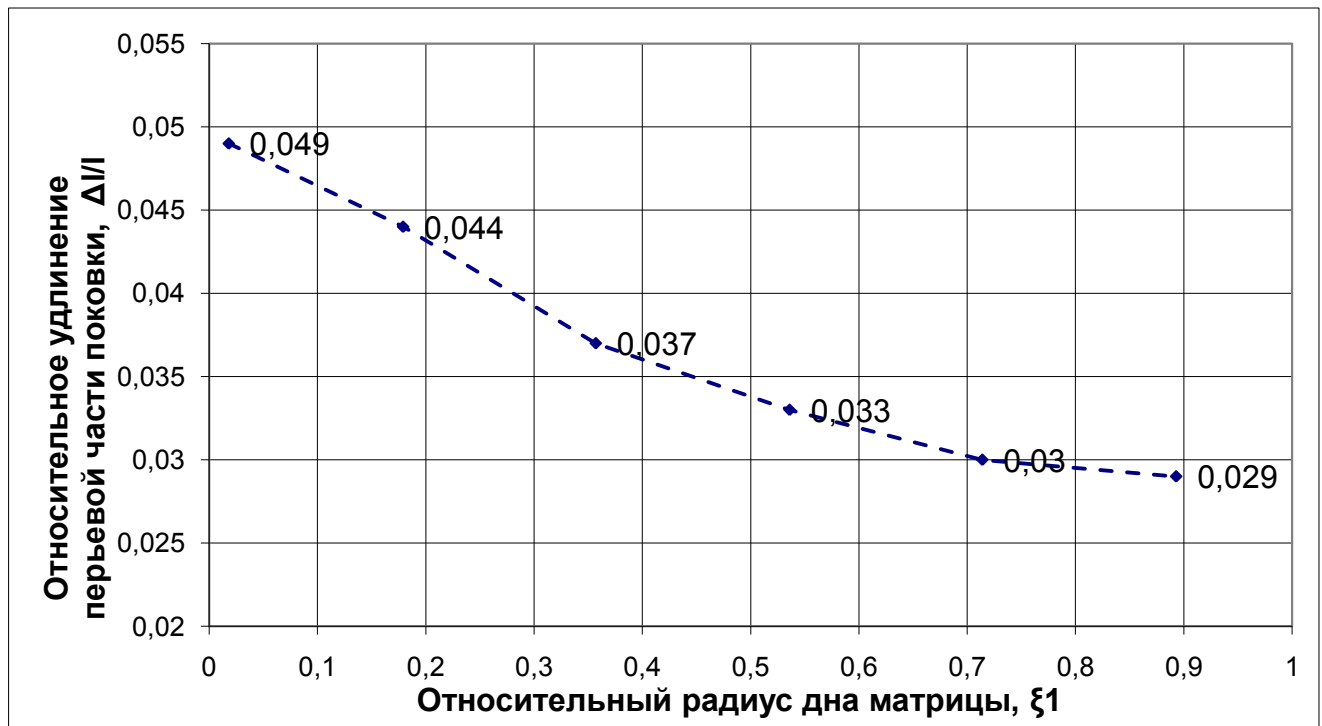


Рисунок 3.9 – Зависимость относительного удлинения перьевой части от относительного радиуса скругления перьевой части.

Подставим максимальное и минимальное значения $\Delta l/l$ и соответствующие им значения ξ_1 в (3.20) получим систему уравнений:

$$\begin{cases} 0,049 = k_4 \cdot 0,018 + b_4 \\ 0,029 = k_4 \cdot 0,893 + b_4 \end{cases} \quad (3.21)$$

Решив (3.20) получим:

$$\begin{cases} k_4 = -0,023 \\ b_4 = 0,049 \end{cases}$$

Подставив значения k_4 и b_4 в (3.20) получим:

$$\frac{\Delta l}{l} = 0,049 - 0,023\xi_1. \quad (3.22)$$

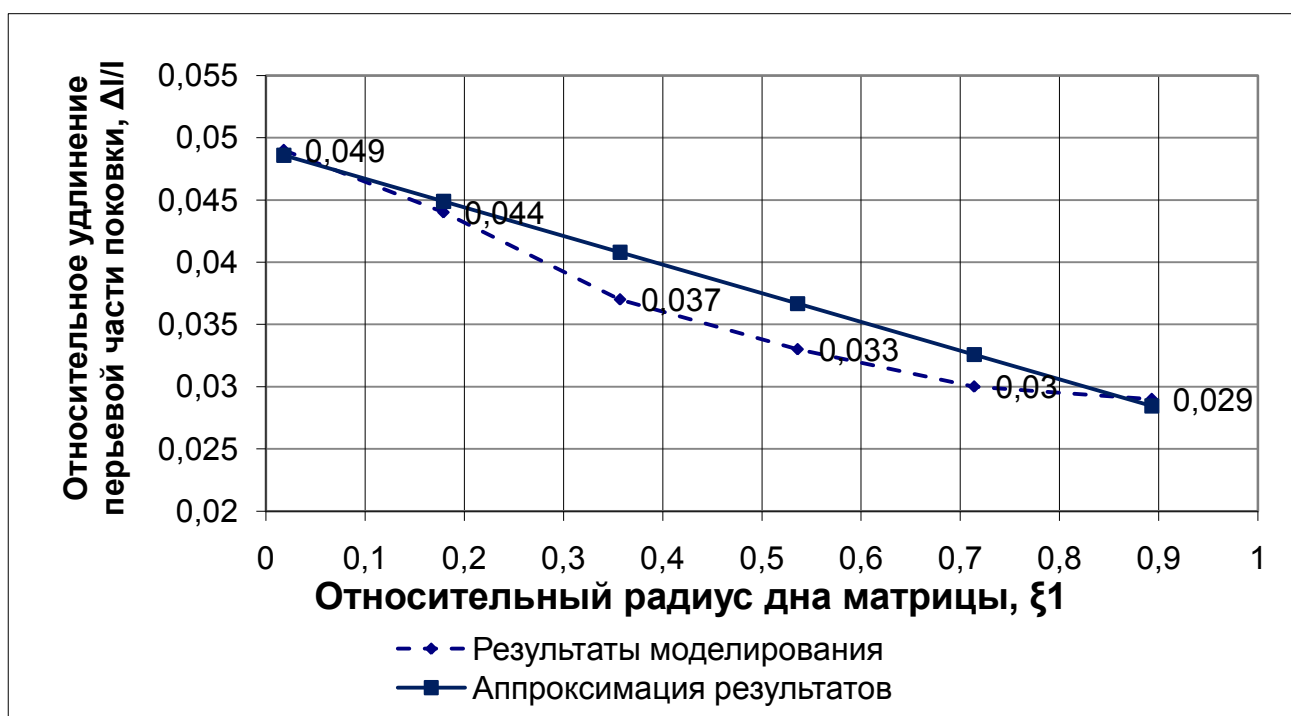


Рисунок 3.10 – Аппроксимация зависимости относительного удлинения перьевой части от относительного радиуса скругления дна матрицы.

Как видно из рисунка 3.10 максимальную ошибку даёт при $\xi_1=0,375$, и составляет 0,004 от отношения $\Delta l/l$.

Анализируя полученную зависимость можно сделать вывод, что увеличение радиуса скругления дна матрицы позволяет снизить удлинение перьевой части поковки, однако данный размер лимитирован окончательными размерами поковки и его менять нельзя.

3.7 Исследование влияния радиуса скругления поковки около пуансона на относительное удлинение перьевой части поковки

При исследовании влияния радиуса скругления пуансона на относительное удлинение будем исследовать зависимость относительного удлинения от относительного радиуса скругления пуансона ξ_2 , который рассчитывается по (3.6). В ходе данного исследования необходимо построить график зависимости

относительного удлинения от относительного радиуса скругления пуансона, аппроксимировать полученный график и найти максимальную ошибку. Из (3.6) видно, что для изменения относительного радиуса скругления пуансона необходимо изменять только радиус скругления пуансона, поэтому задаём следующие параметры:

$$d=5,6\text{мм};$$

$$l=29,7\text{мм};$$

$$D_1=10\text{мм};$$

$$D=15,85\text{мм};$$

$$R=4,5\text{мм};$$

$$r_1=1\text{мм};$$

$$\alpha=30^\circ;$$

$$H=11,7\text{мм};$$

$$f=0,3.$$

Из рисунка 3.3 видно, что радиус скругления должен удовлетворять следующему неравенству:

$$r_2 \leq h - r_1 \quad (3.23)$$

В нашем случае неравенство (3.23) примет вид:

$$r_2 \leq 4,2 - 1,$$

$$r_2 \leq 3,2\text{мм},$$

Занесём экспериментальные данные в таблицу 3.5

Таблица 3.5 – Зависимость относительного удлинения перьевой части от относительного радиуса скругления дна матрицы.

$r_2, \text{мм}$	ξ_2	$h, \text{мм}$	$\Delta l, \text{мм}$	$\Delta l / l$
0,1	0,018	4,39	0,97	0,035
0,88	0,157	4,39	1,12	0,038

1,66	0,296	4,45	0,97	0,035
2,44	0,436	4,45	0,97	0,035
3,2	0,571	4,6	1,19	0,038

Как видно из полученных данных изменение радиуса скругления пуансона не оказывает значительного влияния на изменение относительного удлинения, поэтому мы не будем учитывать его при подсчёте относительного удлинения.

3.8 Исследование влияния угла наклона перьевой части на относительное удлинение перьевой части поковки

В ходе данного исследования необходимо задать ограничения на угол наклона перьевой части, построить график зависимости относительного удлинения от угла наклона перьевой части, аппроксимировать полученный график и найти максимальную ошибку.

Зададим постоянные величины:

$$d=5,6\text{мм};$$

$$l=29,7\text{мм};$$

$$D_1=10\text{мм};$$

$$D=15,85\text{мм};$$

$$R=4,5\text{мм};$$

$$r_1=1\text{мм};$$

$$r_2=1\text{мм};$$

$$H=11,7\text{мм};$$

$$f=0,3.$$

Из рисунка 3.3 видно, что угол наклона перьевой части должен удовлетворять неравенству:

$$\alpha \leq \arctg\left(\frac{D_1 - d}{2l}\right) \quad (3.24)$$

Подставив исходные данные в (3.24) получим:

$$\alpha \leq \arctg\left(\frac{10-5,6}{2 \cdot 29,7}\right)$$

$$\alpha \leq 4,2^\circ$$

Занесём экспериментальные данные в таблицу 3.6

Таблица 3.6 – Зависимость относительного удлинения перьевой части от угла наклона перьевой части.

$\alpha,^\circ$	$h, \text{ мм}$	$\Delta l, \text{ мм}$	$\Delta l/l$
0	4,43	1,31	0,044
1	4,44	1	0,034
2	4,45	0,84	0,028
3	4,47	0,31	0,01
4	4,47	0,21	0,007

Из рисунка 3.11 видно, что зависимость относительного удлинения перьевой части от угла наклона перьевой части имеет вид близкий к линейному, поэтому аппроксимацию данной зависимости будем искать в виде:

$$\frac{\Delta l}{l} = k_5 \alpha + b_5 \quad (3.25)$$

где

k_5 и b_5 – коэффициенты, определяющие положение прямой на координатной плоскости, рассчитываются исходя из экспериментальных данных.

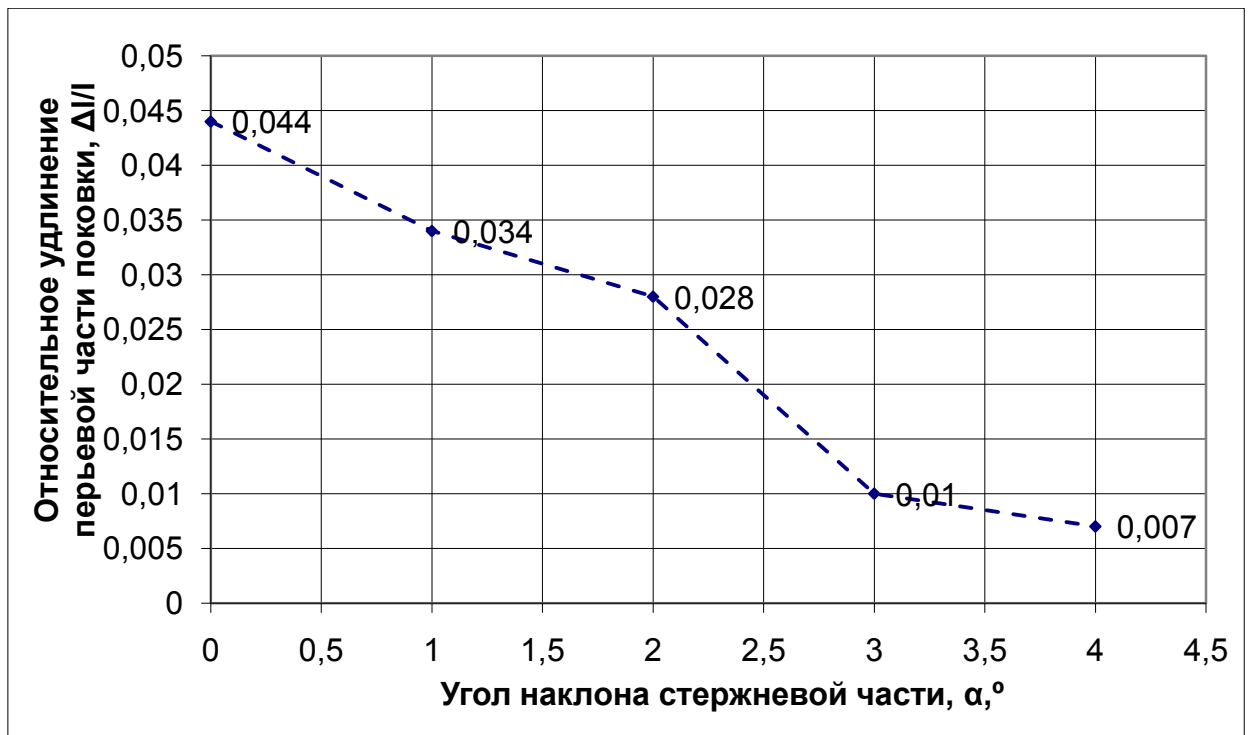


Рисунок 3.11 – Зависимость относительного удлинения перьевой части от угла наклона перьевой части.

Подставим максимальное и минимальное значения $\Delta l/l$ и соответствующие им значения α в (3.25) получим систему уравнений:

$$\begin{cases} 0,044 = b_4 \\ 0,007 = k_4 \cdot 4 + b_4 \end{cases} \quad (3.26)$$

Решив (3.26) получим:

$$\begin{cases} k_4 = -0,009 \\ b_4 = 0,044 \end{cases}$$

Подставив значения k_4 и b_4 в (3.25) получим:

$$\frac{\Delta l}{l} = 0,044 - 0,009\alpha. \quad (3.27)$$

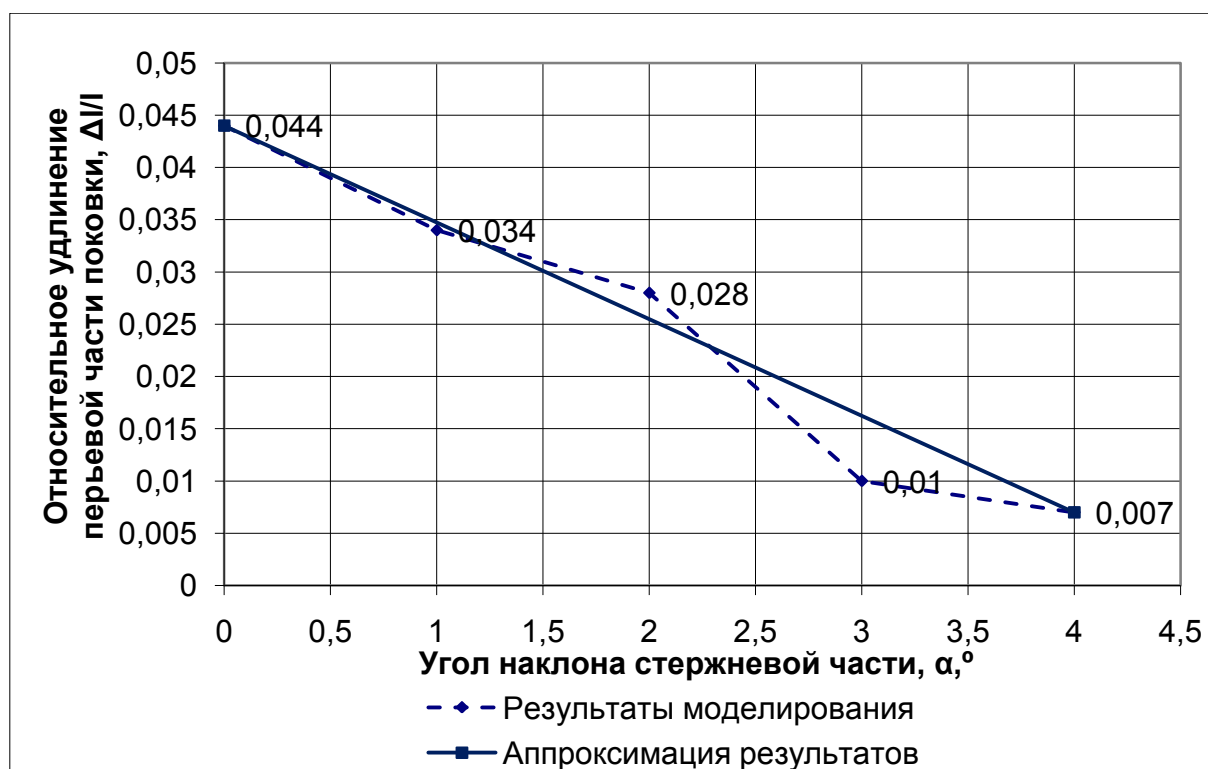


Рисунок 3.12 – Аппроксимация зависимости относительного удлинения перьевой части от угла наклона перьевой части.

На основании рисунка 3.12 можно сделать вывод, что максимальную ошибку аппроксимированная прямая даёт при значении $\alpha=3^\circ$. Ошибка составляет 0,007 от отношения Δ/l .

Как видно по результатам, полученным в ходе моделирования, увеличение угла наклона перьевой части, повлечет за собой уменьшение относительного удлинения. Однако данная величина ограничена, во-первых геометрией поковки, а во-вторых увеличение данного параметра влечёт за собой увеличение КИМ, поэтому было принято решение использовать минимально возможный угол наклона перьевой части.

3.9 Исследование влияния степени деформации высаживаемой части поковки на относительное удлинение перьевой части поковки

В ходе данного исследования необходимо задать ограничения на степень деформации высаживаемой части, построить график зависимости относительного удлинения от относительного степени деформации высаживаемой части,

аппроксимировать полученный график и найти максимальную ошибку. Из (3.8) видно, что для изменения степени деформации высаживаемой части необходимо изменять только диаметр высаженной части D , поэтому задаём следующие параметры:

$$d=5,6\text{мм};$$

$$l=29,7\text{мм};$$

$$D_1=10\text{мм};$$

$$R=4,5\text{мм};$$

$$r_2=1\text{мм};$$

$$r_1=1\text{мм};$$

$$\alpha=30^\circ;$$

$$f=0,3.$$

Из закона постоянства объёмов следует, что высота высаживаемой части так же зависит от диаметра высаженной части, поэтому она будет занесена в таблицу 3.7. Диаметр высаженной части поковки связан с диаметром высаживаемой части заготовки и степенью деформации при высадке следующим равенством:

$$D = \frac{D_1}{\sqrt{1 - \varepsilon_{ВЫС}}} \quad (3.28)$$

Учитывая, что диаметр высаженной части поковки должен быть больше диаметра высаживаемой части заготовки получим неравенство:

$$D_1 < D \leq \frac{D_1}{\sqrt{1 - \varepsilon_{ВЫС_{MAX}}}} \quad (3.29)$$

Подставляя в (3.29) исходные данные и учитывая, что максимальная степень деформации, для сплава ВТ8 при температуре 980°C составляет 0,75, получим:

$$10 < D \leq \frac{10}{\sqrt{1-0,75}},$$

$$10 < D \leq 20 \text{ мм},$$

Таблица 3.7 – Зависимость относительного удлинения перьевой части от степени деформации высаженной части.

$D, \text{ мм}$	$\varepsilon_{\text{выс}}$	$H, \text{ мм}$	$h, \text{ мм}$	$\Delta l, \text{ мм}$	$\Delta l / l$
11	0,17	5,61	5,15	0,1	0,003
12	0,31	6,66	4,87	0,16	0,005
13	0,41	7,81	4,68	0,4	0,013
14	0,49	9,05	4,57	0,6	0,02
15	0,55	10,4	4,42	0,83	0,028
16	0,61	11,83	4,41	1,15	0,038
17	0,65	13,35	4,39	1,39	0,046
18	0,69	14,97	4,38	1,52	0,051
19	0,72	16,68	4,37	1,68	0,057
20	0,75	18,48	4,36	2,11	0,071

Из рисунка 3.13 видно, что при увеличении степени деформации относительное удлинение увеличивается по параболе, поэтому аппроксимация данной зависимости будем искать в виде:

$$\frac{\Delta l}{l} = a_6 \varepsilon_{\text{выс}}^3 + b_6 \varepsilon_{\text{выс}}^2 + c_6 \varepsilon_{\text{выс}} + d \quad (3.30)$$

где

a_6, b_6, c_6, d_6 – коэффициенты учитывающие положение параболы на координатной плоскости, которые находятся из экспериментальных данных. Так как

при $\varepsilon=0$ относительное удлинение перьевой части так же будет равно нулю, то $d_6=0$, следовательно зависимость (3.29) примет вид:

$$\frac{\Delta l}{l} = a\varepsilon_{\text{ВЫС}}^3 + b\varepsilon_{\text{ВЫС}}^2 + c\varepsilon_{\text{ВЫС}} \quad (3.31)$$

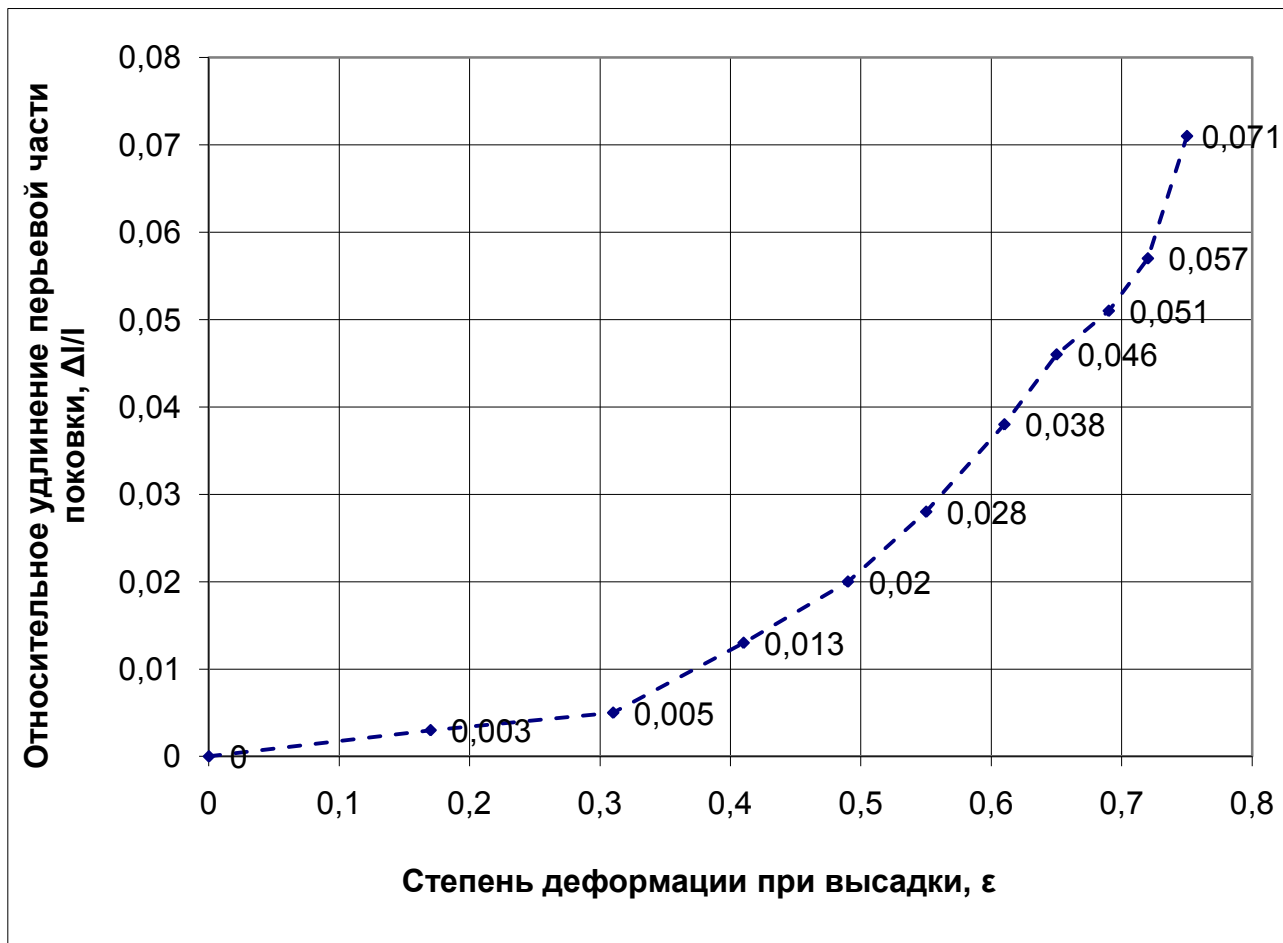


Рисунок 3.13 – Зависимость относительного удлинения перьевой части от степени деформации высаженной части.

Подставим максимальное и минимальное значения $\Delta l/l$ и соответствующие им значения $\varepsilon_{\text{ВЫС}}$ в (3.31) получим систему уравнений:

$$\begin{cases} 0,003 = a_6 \cdot 0,0049 + b_6 \cdot 0,289 + 0,17c_6 \\ 0,028 = a_6 \cdot 0,1664 + b_6 \cdot 0,3025 + 0,55c_6 \\ 0,071 = a_6 \cdot 0,4219 + b_6 \cdot 0,5625 + 0,75c_6 \end{cases} \quad (3.32)$$

Решив (3.32) получим:

$$\begin{cases} a_6 = 0,2235 \\ b_6 = -0,0734 \\ c_6 = 0,0237 \end{cases}$$

Подставив значения a и b в (3.31) получим:

$$\frac{\Delta l}{l} = 0,2235 \cdot \varepsilon_{\text{выс}}^3 - 0,0734 \cdot \varepsilon_{\text{выс}}^2 + 0,0237 \cdot \varepsilon_{\text{выс}} \quad (3.33)$$

Максимальная ошибка при данной аппроксимации составила 0,005 от отношения $\Delta l/l$ при $\varepsilon_{\text{выс}}=0,72$.

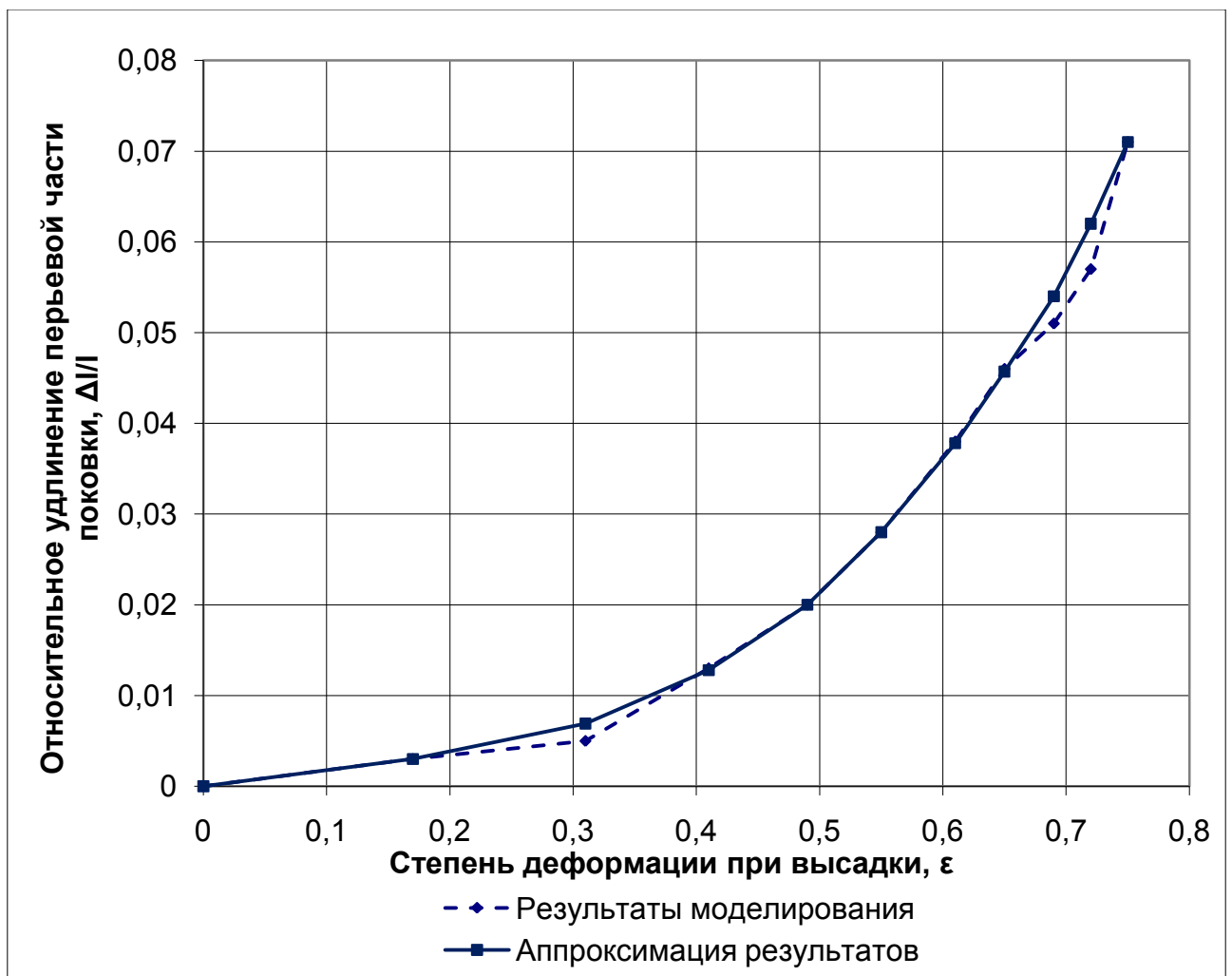


Рисунок 3.14 – Аппроксимация зависимости относительного удлинения перьевой части от степени деформации высаженной части.

Исходя из полученных результатов, было рекомендовано использовать по возможности меньшие степени деформации на операции высадке, поскольку это позволит уменьшить относительное удлинение перьевой части поковки.

3.10 Исследование влияния коэффициента трения на относительное удлинение перьевой части поковки

В ходе данного исследования необходимо построить график зависимости относительного удлинения от угла коэффициента трения, аппроксимировать полученный график и найти максимальную ошибку. Поскольку мы будем проводить моделирование, а не реальный эксперимент, то мы можем использовать идеальную смазку с коэффициентом трения равным нулю. Это позволит определить какое максимальное относительное удлинение может достичь перьевая часть в зависимости от трения.

Зададим следующие исходные данные:

$$d=5,6\text{мм};$$

$$l=29,7\text{мм};$$

$$D_1=10\text{мм};$$

$$D=15,85\text{мм};$$

$$R=4,5\text{мм};$$

$$r_1=1\text{мм};$$

$$r_2=1\text{мм};$$

$$\alpha=30^\circ;$$

$$H=11,7\text{мм};$$

Таблица 3.8 – Зависимость относительного удлинения перьевой части от коэффициента трения.

f	$h, \text{мм}$	$\Delta l, \text{мм}$	$\Delta l / l$
0	4,2	2,7	0,09
0,08	4,4	1,3	0,044

0,1	4,4	1,2	0,04
0,2	4,42	1,05	0,035
0,3	4,42	0,95	0,032
0,4	4,42	1	0,034
0,5	4,42	0,95	0,032
0,6	4,43	0,9	0,03
0,7	4,43	0,9	0,03
0,8	4,43	0,85	0,029

Из рисунка 3.15 видно, что при коэффициенте трения равным нулю относительное удлинение резко возрастает, поэтому будем аппроксимировать данную зависимость в виде дробно-линейной функции.

$$\frac{\Delta l}{l} = \frac{a_7 f + b_7}{f + c_7} \quad (3.34)$$

где

a_7 , b_7 и c_7 – коэффициенты, определяющие положение гиперболы на координатной плоскости, рассчитывается исходя из экспериментальных данных. Подставим максимальное, минимальное и значения $\Delta l/l$ и соответствующие им значения f , а так же значение $\Delta l/l$ при $f=0,1$ в (3.34) получим систему уравнений:

$$\begin{cases} 0,09 = \frac{a_7 \cdot 0 + b_7}{0 + c_7} \\ 0,04 = \frac{a_7 \cdot 0,1 + b_7}{0,1 + c_7} \\ 0,029 = \frac{a_7 \cdot 0,8 + b_7}{0,8 + c_7} \end{cases} \quad (3.35)$$

Решив (3.35) получим:

$$\begin{cases} a_7 = 0,027 \\ b_7 = 0,002 \\ c_7 = 0,026 \end{cases}$$

Подставив a_7, b_7, c_7 в (3.33) получим:

$$\frac{\Delta l}{l} = \frac{0,027f + 0,002}{f + 0,026} \quad (3.36)$$



Рисунок 3.15 – Зависимость относительного удлинения перьевой части от коэффициента трения.

Анализ полученные результаты, можно сделать вывод, что при увеличении коэффициента трения относительное удлинение перьевой части поковки уменьшается. При этом стоит обратить особое внимание на участок со значением исследуемого параметра меньше 0,1. Как видно из представленных графиков при данных значениях относительное удлинение резко увеличивается, поэтому использование смазок с такими значениями не рекомендуется.

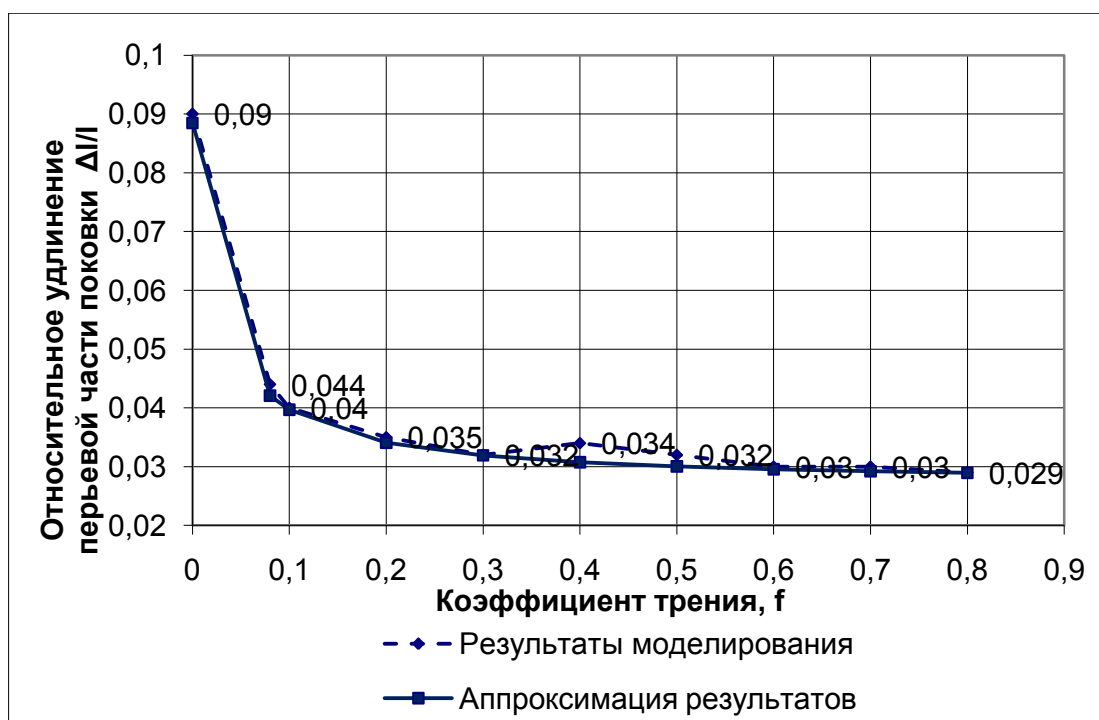


Рисунок 3.16 – Аппроксимация зависимости относительного удлинения первой части от коэффициента трения.

Как видно из рисунка 3.16 максимальная ошибка при данной аппроксимации будет при $f=0,4$ и составляет 0,003 от отношения $\Delta l/l$.

3.11 Вывод формулы, учитывающей влияние геометрических параметров, коэффициента трения и степени деформации на относительное удлинение первой части поковки

Для того, что бы при помощи одной формулы можно было посчитать относительное удлинение необходимо выбрать один параметр, по которому будет рассчитываться относительное удлинение, данный параметр будем считать основным, а остальные параметры будут поправочными. Основной параметр будет задан в том виде который мы получили аппроксимируя экспериментальные данные. Поправочные параметры будут заданы при помощи параллельного смещения аппроксимированных кривых вдоль оси ординат, так что бы относительное удлинение, рассчитанное по аппроксимированным зависимостям, равнялось бы нулю, когда относительные параметры будут соответствовать заданным при проведении эксперимента с основным параметром.

За основной параметр принято отношение длина стержня к диаметру (m), относительное удлинение для основного параметра при $m < 9,85$ можно будет найти по формуле (3.10):

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

А при $m \geq 9,85$, длина стержни не будет влиять на относительное удлинение и принимается равным нулю.

При поведении данного эксперимента остальные параметры были равны:

$$n = 8,01,$$

$$\xi_R = 0,8,$$

$$\xi_1 = 0,179,$$

$$\varepsilon_{BMC} = 0,6,$$

$$\alpha = 30'$$

$$f = 0,3$$

Для того что бы произвести относительное смещение кривой вдоль оси ординат необходимо: подставить значения поправочных параметров и приняв, что относительное удлинение равно нулю, рассчитать коэффициенты b для прямых и коэффициент d для параболы, при которых будет выполняться данное условие. Подставим вышеперечисленные параметры в формулы: (3.16), (3.19), (3.22), (3.27), (3.33), (3.36), приравняем нулю и, рассчитав новые значения коэффициентов данных коэффициентов получим:

$$\frac{\Delta l}{l} = 0,0561 - 0,007n \quad (3.37)$$

$$\frac{\Delta l}{l} = \frac{0,008 - 0,01\xi_R}{\xi_R + 0,268} \quad (3.38)$$

$$\frac{\Delta l}{l} = 0,004 - 0,023\xi_1 \quad (3.39)$$

$$\frac{\Delta l}{l} = 0,005 - 0,009\alpha \quad (3.40)$$

$$\frac{\Delta l}{l} = 0,2235 \cdot \varepsilon_{\text{ВЫС}}^3 - 0,0734 \cdot \varepsilon_{\text{ВЫС}}^2 + 0,0237 \cdot \varepsilon_{\text{ВЫС}} - 0,036 \quad (3.41)$$

$$\frac{\Delta l}{l} = \frac{0,001 - 0,004f}{f + 0,026} \quad (3.42)$$

Сложив вышеперечисленные формулы получим:

При $m < 9,85$:

$$\begin{aligned} \frac{\Delta l}{l} = & 0,029 + \frac{0,453 - 0,046m}{m + 0,439} - 0,007n + \frac{0,008 - 0,01\xi_R}{\xi_R + 0,268} - 0,009\alpha + 0,2235 \cdot \varepsilon_{\text{ВЫС}}^3 - \\ & - 0,0734 \cdot \varepsilon_{\text{ВЫС}}^2 + 0,0237 \cdot \varepsilon_{\text{ВЫС}} + \frac{0,001 - 0,004f}{f + 0,026} \end{aligned} \quad (3.43)$$

При $m \geq 9,85$:

$$\begin{aligned} \frac{\Delta l}{l} = & 0,029 + 0,007n + \frac{0,008 - 0,01\xi_R}{\xi_R + 0,268} - 0,009\alpha + 0,2235 \cdot \varepsilon_{\text{ВЫС}}^3 - 0,0734 \cdot \varepsilon_{\text{ВЫС}}^2 + \\ & + 0,0237 \cdot \varepsilon_{\text{ВЫС}} + \frac{0,001 - 0,004f}{f + 0,026} \end{aligned} \quad (3.44)$$

Как правило, перед технологами стоит следующая задача: зная длину перьевой части после высадки найти длину перьевой части заготовки. Длину перьевой части после высадки можно найти по формуле:

$$L = l + \Delta l \quad (3.44)$$

Выразим из Δl (3.43) и (3.44) и подставив $m = \frac{l}{d}$, получим:

При $m < 9,85$:

$$\Delta l = \left(0,029 - 0,007n + \frac{0,008 - 0,01\xi_R}{\xi_R + 0,268} - 0,009\alpha + 0,2235 \cdot \varepsilon_{BbIC}^3 - 0,0734 \cdot \varepsilon_{BbIC}^2 + \right. \\ \left. + 0,0237 \cdot \varepsilon_{BbIC} + \frac{0,001 - 0,004f}{f + 0,026} \right) \cdot l + \frac{0,453dl - 0,046l^2}{l + 0,439d} \quad (3.45)$$

При $m \geq 9,85$

$$\Delta l = \left(0,029 - 0,007n + \frac{0,008 - 0,01\xi_R}{\xi_R + 0,268} - 0,009\alpha + 0,2235 \cdot \varepsilon_{BbIC}^3 - 0,0734 \cdot \varepsilon_{BbIC}^2 + \right. \\ \left. + 0,0237 \cdot \varepsilon_{BbIC} + \frac{0,001 - 0,004f}{f + 0,026} \right) \cdot l \quad (3.46)$$

Для упрощения расчета введём коэффициент z , который рассчитывается по формуле:

$$z = \left(0,029 - 0,007n + \frac{0,008 - 0,01\xi_R}{\xi_R + 0,268} - 0,009\alpha + 0,2235 \cdot \varepsilon_{BbIC}^3 - 0,0734 \cdot \varepsilon_{BbIC}^2 + \right. \\ \left. + 0,0237 \cdot \varepsilon_{BbIC} + \frac{0,001 - 0,004f}{f + 0,026} \right) \quad (3.47)$$

Подставив (3.47), в (3.46) и (3.45):

При $m < 9,85$

$$\Delta l = z \cdot l + \frac{0,453dl - 0,046l^2}{l + 0,439d} \quad (3.45)$$

При $m \geq 9,85$

$$\Delta l = z \cdot l \quad (3.46)$$

Подставим полученные значения в (3.44) получим:

При $m < 9,85$

$$L = l(1+z) + \frac{0,453dl - 0,046l^2}{l + 0,439d} \quad (3.47)$$

При $m \geq 9,85$

$$L = l(1+z) \quad (3.48)$$

Выразив из (3.47) и (3.48) l получим:

При $m < 9,85$

$$l = \frac{-b + \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a}, \quad (3.49)$$

где:

$$a = 1+z - 0,046; \quad (3.50)$$

$$b = 0,439d(1+z + 1,032) - L; \quad (3.51)$$

$$c = d \cdot L \cdot 0,439 \quad (3.52)$$

При $m \geq 9,85$

$$l = \frac{L}{1+z} \quad (3.53)$$

3.12 Исследование технологических параметров процесса высадки в программе QForm.

Для того чтобы проанализировать не только геометрические параметрам в процессе высадки, но и другие технологические параметры промоделируем эту операцию в программе QForm.

Одним из наиболее важных параметров в процессах горячей объемной штамповке является соблюдение температурного интервала горячей деформации материала. Стоит отметить, что при деформации титановых сплавов важно не только, что бы металл не остыл, но и также что бы в процессе деформации не произошёл перегрев металла, поскольку это может повлечь за собой фазовые превращения, которые негативно скажутся на свойствах детали в дальнейшем. На рисунке 3.17 представлено распределение температурных полей в поковке, после проведения операций выдавливания и высадки. И как видно из этого рисунка температурные поля в теле поковки распределены не равномерно, это связано с тем, что замковая часть в процессе высадки деформируется сильнее перьевой, а следовательно и разогревается за работы счёт сил деформации сильнее, исходя из этого можно сделать вывод. Что перед штамповкой в окончательном ручье необходим подогрев. Также стоит отметить, что при высадке замковой части максимальная температура составляла 1010°C , что ниже температуры фазового превращения в титане, а следовательно, не будет происходить образование несообразных с $(\alpha+\beta)$ матрицей α' -, α'' -, ω -фаз, а значит хрупкости материала, по этой причине не будет, следовательно стойкость лопатки по этой причине не пострадает.

Из рисунка 3.18 видно, что при высадке замковой части преобладают растягивающие напряжения, а сжимающие в основном локализованы на конце перьевой части. Это связано с тем, что в замке металл течёт в стороны и перьевую часть.

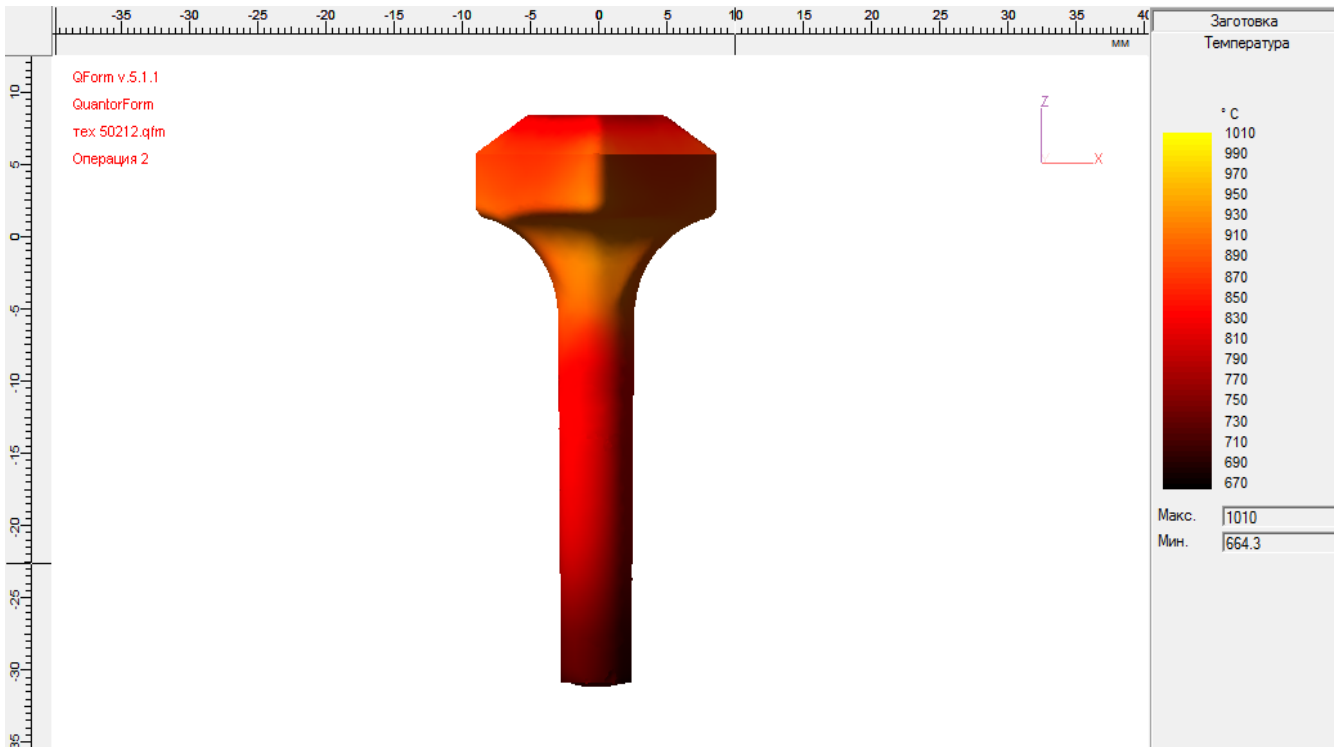


Рисунок 3.17 – Распределение температурных полей в поковке с высаженной замковой частью.

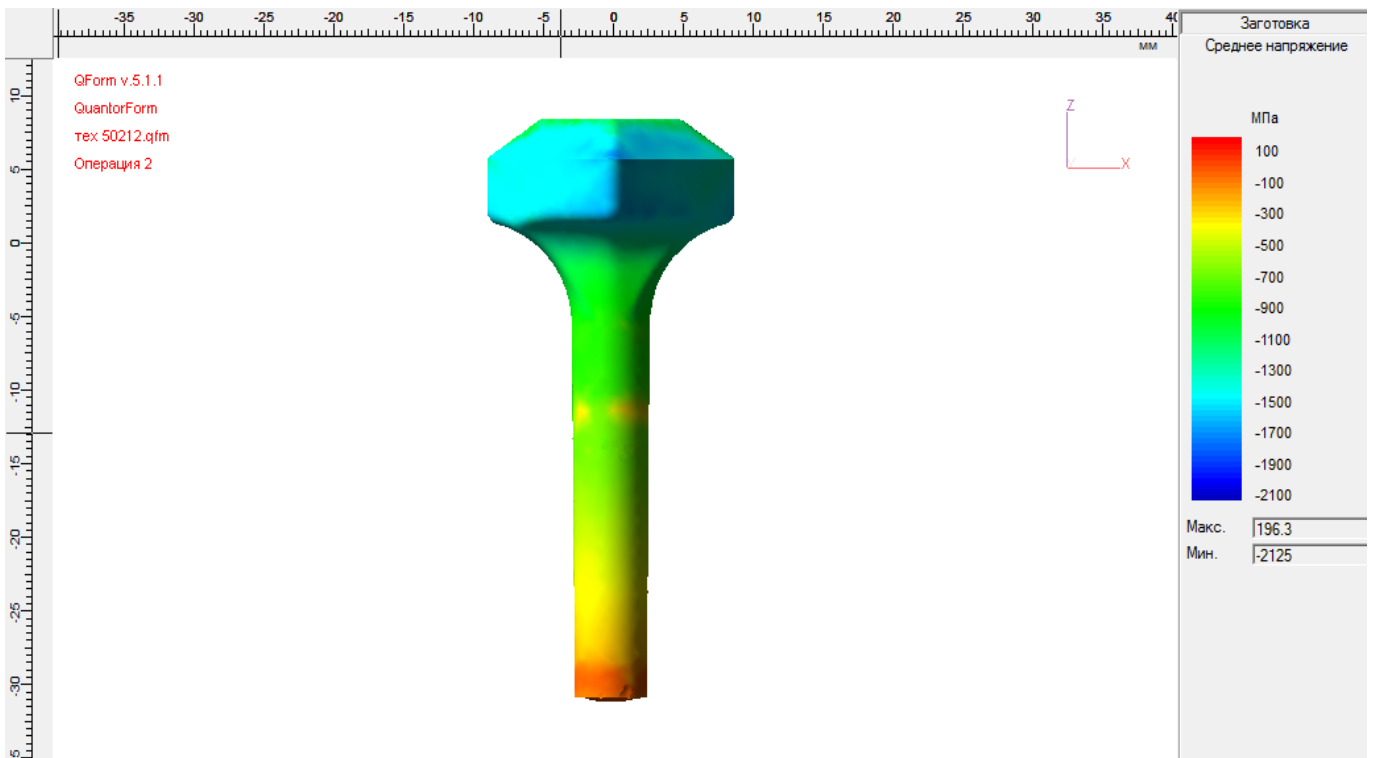


Рисунок 3.18 – Распределение средних напряжений в поковке с высаженной замковой частью.

Учитывая распределение скоростей деформации (рис. 3.19) можно сделать вывод, что при заполнении замковой части полости штампа металл начинает интенсивно течь в перьевую часть, а следовательно увеличивает износ штампа, при этом необходимо добиваться полного заполнения полости штампа. И именно поэтому так важно поймать момент, когда замковая часть полностью заполнена, причём истечение металла в перьевую часть после заполнения данной части штампа необходимо минимизировать. Это возможно сделать зная относительное удлинение перьевой части. Данное удлинение можно рассчитать используя полученную нами формулу, исходя из этого можно считать проведённое нами исследование актуальным и необходимым для данного типа процессов.

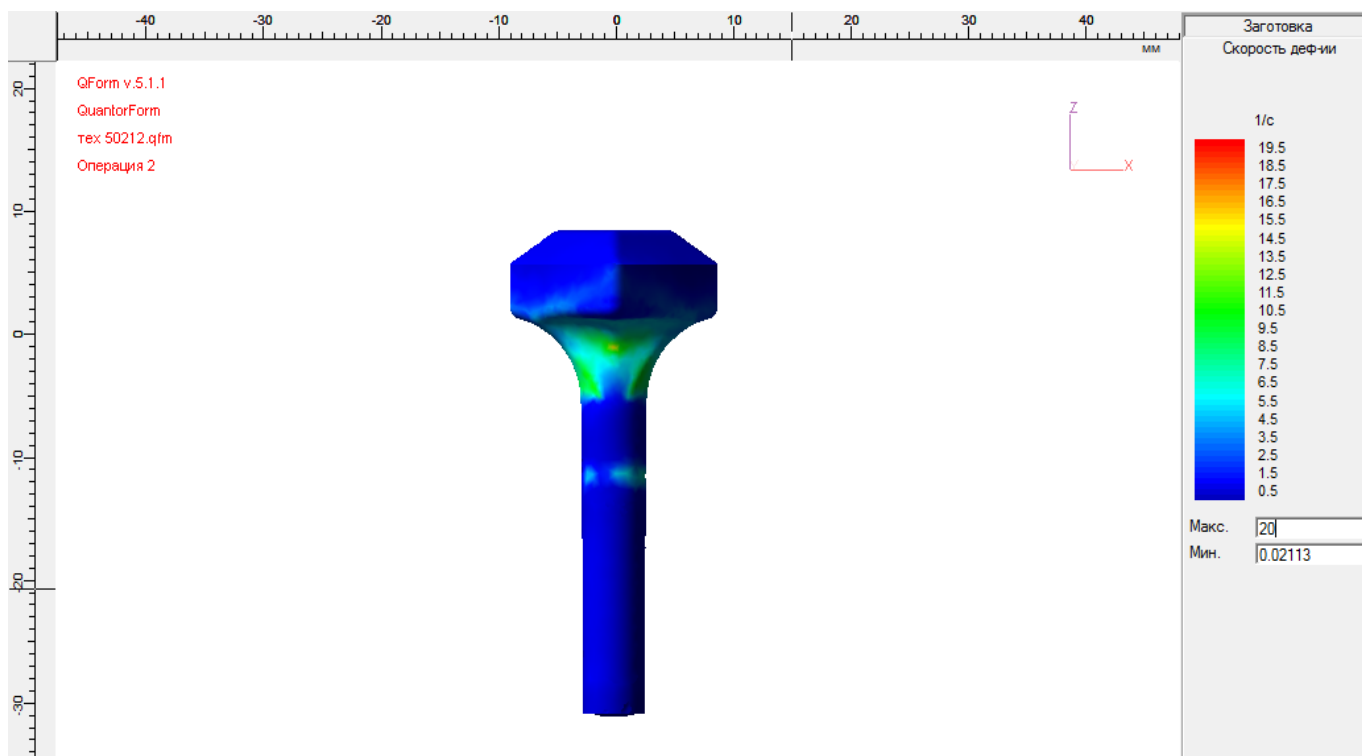


Рисунок 3.19– Распределение скоростей деформации в поковке с высаженной замковой частью.

На анализе технологических параметров высадки замковой части с одновременным истечением металла в компенсатор можно сделать вывод, что такая технология осуществима, однако необходимо знать относительное удлинение перьевой части, для поэтапного расчета технологии.

3.13 Экспериментальное исследование относительного удлинения перьевой части поковки в процессе высадки. Сравнение результатов исследования и результатов, полученных моделированием

Экспериментальное исследование относительного удлинения поковки в процессе высадке с одновременным истечением металла в перьевую часть проводились на свинцовых образцах. Испытания были осуществлены на Учебно-испытательной машине УИМ-40. Перед началом экспериментов, заготовку для образцов, прессовали на требуемый диаметр, это не только позволило получать различные заготовки, но так же гарантировало сплошность и отсутствие дефектов металла во время эксперимента. На первом этапе у заготовки выдавливалась перьевая часть. Затем производилось поэтапное высаживание замковой части (рисунок 3.20). Высадка производилась постепенно, что бы можно было обнаружить момент заполнения полости замковой части штампа. Целями и задачами исследования были:

1. Провести экспериментальное исследование относительного удлинения перьевой части поковки;
2. Сравнить данные полученные экспериментальным путем с результатами моделирования;
3. Оценить адекватность полученных зависимостей.

Все полученные результаты были занесены в таблицу 3.9. Используемые обозначения размеров соответствуют рисунку 3.2 Размеры D_3 и H_3 – диаметр и высота заготовки перед выдавливанием перьевой части.. $\Delta l/l_{экс}$, $\Delta l/l_{расч}$ – относительное удлинение перьевой части поковки полученные экспериментально и при помощи формулы. Δ – разница между значениями относительного удлинения полученного экспериментальным и расчетным методами.



а

б

в

г

Рисунок 3.20– Экспериментальное исследование относительного удлинения. а – заготовка, б – поковка после операции выдавливания, в – окончание стадии осадки, начало стадии доштамповки, г – конец стадии доштамповка.

Таблица 3.9 – Экспериментальное исследование удлинение перьевой части поковки.

$D_з$, мм	$H_з$, мм	$D_л$, мм	H , мм	R , мм	l , мм	d , мм	L , мм	D , мм	h , мм	r_1 , мм	α , град	$\Delta l/l_{экс}^*$ 100%	$\Delta l/l_{расч}^*$ 100%	Δ ,%
9	27	10	11,7	4,5	29	5,5	31	20	4	1	1	6	3	3
9	32	10	11,7	4,5	25	7,5	27,8	20	4,1	1	1	11	9	2
27	60	35	34	5	45	7,5	36,1	50	18,2	1	1	3	1	2
27	70	35	34	5	58	7,5	62,1	50	17,8	1	1	6	2	4
Среднее значение ошибки														2,75

Анализируя полученные данные можно сделать вывод, что зависимости, полученные в результате аппроксимации результатов моделирования, позволяют весьма точно рассчитывать относительно удлинение перьевой части поковки на операции высадки. Расхождение между экспериментальными значениями и расчётными составляла от 2 до 4%. Данную ошибку можно объяснить тем, что

высадка производилась поэтапно, и нельзя зафиксировать момент заполнения штампа мгновенно.

Выводы по разделу

1. Установлены 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.

2. Получена общая зависимость объединившая влияние всех исследуемых факторов на относительное удлинение и позволившая рассчитывать величину удлинения перьевой части поковки на данной операции.

3. Исследованы температурные поля после операции высадки и установлено, что в ходе данного процесса не происходит критического разогрева металла, который мог бы привести к образованию α' -, α'' -, ω -фаз, следовательно механические свойства металла не ухудшатся.

4. Рассмотрены также распределение средних напряжений и скоростей деформации и установлено, что наиболее интенсивно истекает метал в перьевую часть именно на стадии доштамповки замковой части.

5. Проведены эксперименты подтвердившие адекватность предложенных зависимостей. Ошибка между экспериментальными данными и результатами полученными по зависимостям составила от 2 до 4%.

4 Разработка технологического режима штамповки

4.1 Разработка чертежа поковки лопатки на последнем переходе штамповки

По чертежу детали разрабатываем чертёж поковки (листы 3, 4), назначая следующие припуски:

- по граням замка – 1,3мм;
- по полкам замка – 1,0мм;
- по подошве замка – 1,3мм;
- по кромке пера – 1,0мм;
- по толщине пера – 0,15мм эквидистантно.

Допуск на толщину пера по всем сечениям $\pm 0,1$ мм. Допуск на грани замка $\pm 0,5$ мм. На остальные размеры допуск назначаться не будет, данные размеры обеспечиваются штампом. Учитывая, что перо поковки плавно переходит в облой и имеет приблизительно равную с ним толщину, то на конце необходимо предусмотреть технологическую бобышку.

Во время штамповки в окончательном ручье допускается:

- смещение штампов по оси лопатки до 0,2мм;
- остаток облоя по замку до 0,3мм;
- разнотолщинность кромок по всем сечениям не более 0,1мм;
- разность отклонений толщины в направлении оси Z не более 0,2мм.

Между сечениями плавный переход.

Базами для механической обработки являются:

- грани замка;
- грани технологической бобышки;
- профиль пера со стороны спинки, на контролируемом участке.

На поверхности замка не должно быть заковов, забоин, трещин, расслоений. На замке допускаются дефекты глубиной до 0,5 фактического припуска на механическую обработку.

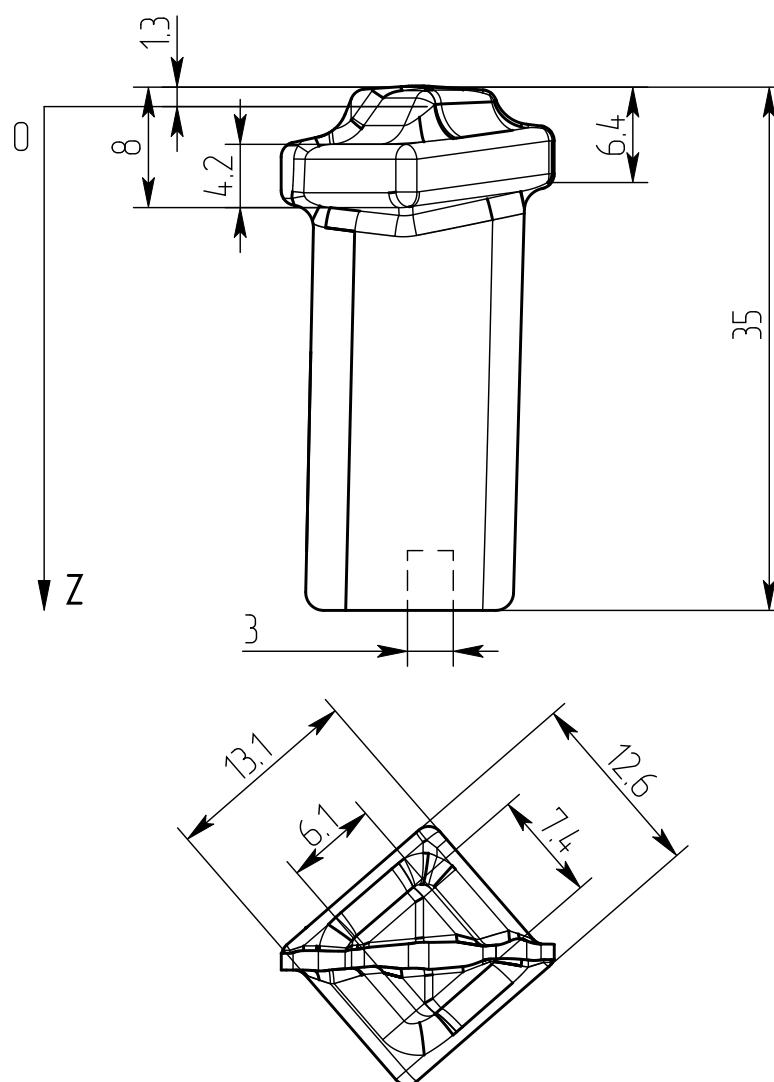


Рисунок 4.1 – Эскиз поковки лопатки 7 ступени.

4.2 Разработка чертежей заготовительных переходов штамповки

Согласно с выбранной последовательностью переходов, необходимо по чертежу поковки (рис. 4.1) рассчитать заготовку с высаженной замковой частью, а затем с предварительно выдавленной частью.

Длина заготовки с предварительно высаженной замковой частью принимается равной длине поковки лопатки. Диаметр стержневой части можно найти по формуле:

$$d = \sqrt{\frac{F_n \cdot k \cdot 4}{\pi}},$$

где

$F_{\text{л}}$ – площадь максимального сечения пера лопатки, у данной лопатки $F_{\text{л}}=17,5\text{мм}^2$ (определено при помощи программы t-flex);

k – коэффициент учитывающий расход металла в облой (из производственных данных $k=1,2$).

$$d = \sqrt{\frac{17,5 \cdot 1,2 \cdot 4}{3,14}} = 5,2\text{мм}$$

Поскольку размеры полок замка приблизительно равны, то целесообразно сделать высаженную заготовку с квадратным поперечным сечением по полкам и подошве замка равными наибольшему из размеров (для полок 13,1мм, для подошвы 7,4мм). Для правильного размещения заготовки с высаженной замковой частью в ручье окончательного штампа замок сделан немного короче (длина замка составляет 7мм). Это позволяет заготовке разместиться в ручье штампа без перекосов под действием силы тяжести.

Учитывая, что уклон полок после окончательной штамповки мал, то в высаженной заготовке грани полок данного уклона иметь не будут, но для извлечения поковки из штампа предусмотрены штамповочные уклоны в 3° .

Длину поковки с высаженной замковой частью берём равной длине поковки с учётом всей технологической бобышкой. Это позволит добиться полного заполнения ручья и избежать дефектов на гранях бобышки.

Радиус перехода от стержневой части к замковой в плоскости разъёма штампа выбираем учитывая, что металл будет течь и от стержневой части и от замковой, а следовательно может образовываться заков. Этого можно избежать в том случае, если данный радиус рассчитать по формуле:

$$R_1 = \frac{b-d-2 \cdot L_3 \cdot \text{tg}\alpha}{2},$$

где

b – диагональ замка, $b=18,5\text{мм}$,

L_3 – длина стержня до замка, $L=30\text{мм}$,

α – угол наклона стержня, $\alpha=30'$

$$R_1 = \frac{18,5 - 5,2 - 2 \cdot 30 \cdot \text{tg} 30'}{2} = 6,4\text{мм}$$

Для простоты изготовления штампа принимаем $R_1=7\text{мм}$.

Аналогичный радиус перехода, но в плоскости перпендикулярной плоскости разреза штампа, выбираем из условия, что на момент начала деформации замка ручей штампа со стороны пера должен упёреться в данный радиус скругления (рис 4.2.). Если этого не произойдёт то будет образовываться заков на месте перехода «перо-замок».

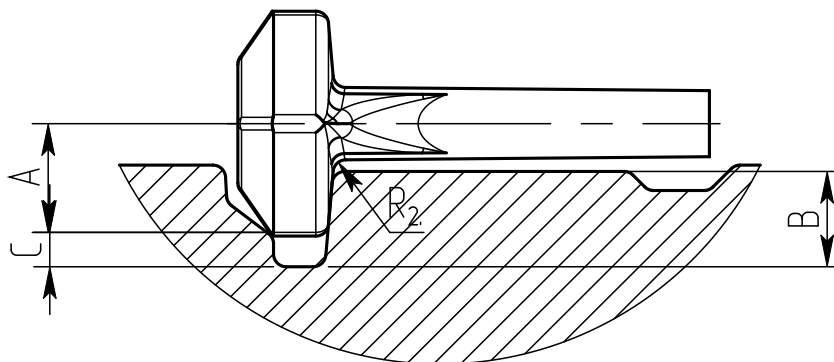


Рисунок 4.2 – Требуемое расположение заготовки в ручье окончательного штампа с обозначением размеров. A – расстояние от оси до угла заготовки; B – глубина ручья; C – расстояние от точки соприкосновения заготовки со штампом до наиболее глубокой точки ручья; R_2 – радиус в плоскости перпендикулярной плоскости разреза штампа.

Из рисунка 4.2 видно, что искомый радиус можно найти по формуле:

$$R_2 = A + C - B - \frac{d}{2} - L_3 \cdot \text{tg} \alpha$$

Из чертежа поковки находим требуемые значения:

$A=9,1\text{мм}$;

$B=7,5\text{мм}$;

$C=3,5\text{мм}$.

Подставив значения в формулу (3) получили:

$$R_2 = 9,1 + 3,5 - 7,5 - \frac{5,2}{2} - 30 \cdot \text{tg}30' = 2,24\text{мм}$$

Принимаем значение $R_2=2,5\text{мм}$.

Что бы обеспечить центрирование поковки в штампе, предусматриваем уклон стержневой части равный $30'$.

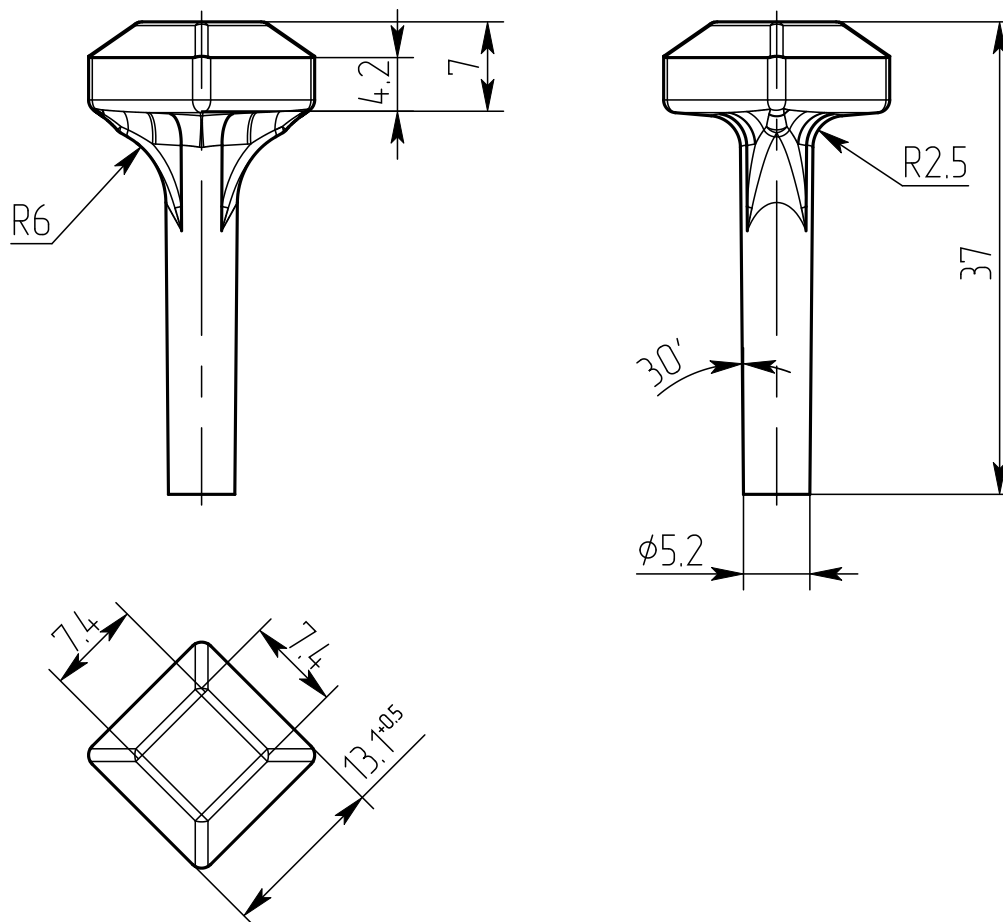


Рисунок 4.3 – Заготовка с высаженной замковой частью.

Чертёж высаженной заготовки представлен на листе 5.

Допуски:

по граням замка $\pm 0,5\text{мм}$;

допуск на диаметр стержневой части $\pm 0,1\text{мм}$.

Учитывая что неравномерное распределение радиусов скругления на стержневой части приведёт к закову необходимо добавить ещё один переход в котором будет сформирована замковая часть, но радиус скругления стержневой

части будет постоянен и равен минимальному радиусу скругления (1 мм), так же необходимо предусмотреть зазор между заготовкой и штампом (1 мм). Рассчитаем высоту полок на данном этапе по формуле:

$$H = \frac{(V_{\text{выс}} - V_{\text{ст}} - V_{\text{р}} - V_{\text{т}})}{F_{\text{замка}}}$$

где

$V_{\text{выс}}$ – объём высаженной поковки рассчитывается при помощи программы t-flex;

$V_{\text{ст}}$ – объём стержня;

$V_{\text{р}}$ – объём металла расходуемого на участке скругления стержневой части;

$V_{\text{т}}$ – объём торцевой усеченной пирамиды;

$F_{\text{замка}}$ – площадь поперечного сечения замка на данном переходе (146,41мм²)

$V_{\text{выс}} = 1814,89 \text{ мм}^3$;

Объём стержня рассчитывается по формуле:

$$V_{\text{ст}} = \frac{\pi \cdot d^2 \cdot L}{4}$$

где

L – длина стержня без учёта длины радиуса скругления

$$V_{\text{ст}} = \frac{\pi \cdot 5,2^2 \cdot 29}{4} = 615,57 \text{ мм}^3$$

Учитывая что радиус скругления мал то объём металла на этом участке можно рассчитать по формуле (5) учитывая что длина участка будет равна радиусу:

$$V_{\text{ст}} = \frac{\pi \cdot 5,2^2 \cdot 1}{4} = 21,23 \text{ мм}^3$$

Объём торцевой пирамиды так же можно рассчитать по формуле:

$$V_{\text{т}} = \frac{1}{3} h \left(F_1 + \sqrt{F_1 \cdot F_2} + F_2 \right)$$

где

h – длина данного участка, рассчитывается по формуле;

F_1, F_2 – площади пирамиды ($F_1=146,41\text{мм}^2, F_2=54,76\text{мм}^2$)

$$V_T = \frac{1}{3} \cdot 2,8 \cdot (46,41 + \sqrt{146,41 \cdot 54,76} + 54,76) = 271,33\text{мм}^3$$

Подставив полученные значения в 4 получим:

$$H = \frac{(1814,89 - 615,57 - 21,23 - 271,33)}{146,41} = 6,2\text{мм}$$

На плоскостях полок перпендикулярных оси стержня предусмотрены уклоны в 3° .

Допуски:

по граням замка $\pm 0,5\text{мм}$;

допуск на диаметр стержневой части $\pm 0,1\text{мм}$.

Для того чтобы рассчитать размеры заготовки и выдавленной поковки необходимо рассчитать степень деформации на заготовительных переходах, а чтобы механические свойства во всех частях поковки были равны, зададим степень деформации в процессе высадки равную степени деформации в процессе выдавливания. Поэтому степень деформации можно будет рассчитать по формуле:

$$\varepsilon = 1 - \sqrt{1 - \varepsilon_\Sigma},$$

где

ε_Σ – суммарная степень деформации.

$$\varepsilon_\Sigma = 1 - \frac{F_{CT}}{F_3},$$

где

F_{CT} – площадь поперечного сечения стержня, $21,2\text{мм}^2$;

F_3 – площадь поперечного сечения замка, $171,61\text{мм}^2$.

$$\varepsilon_{\Sigma} = 1 - \frac{21,2}{171,61} = 0,88.$$

$$\varepsilon = 1 - \sqrt{1 - 0,88} = 0,65.$$

Диаметр заготовки можно рассчитать по формуле:

$$D_3 = \frac{d}{\sqrt{1 - \varepsilon}}.$$

$$D_3 = \frac{5,2}{\sqrt{1 - 0,65}} = 8,8 \text{ мм}$$

Принимаем $D_3 = 9 \text{ мм}$.

Рассчитаем полученные степени деформации.

Для выдавливания:

$$\varepsilon_{\text{ВЫД}} = 1 - \frac{d^2}{D_3^2}$$

$$\varepsilon_{\text{ВЫД}} = 1 - \frac{5,2^2}{9^2} = 0,67$$

Для высадки:

$$\varepsilon_{\text{ВЫС}} = 1 - \frac{D_3^2 \cdot \pi}{4 \cdot F_3}$$

$$\varepsilon_{\text{ВЫС}} = 1 - \frac{9^2 \cdot 3,14}{4 \cdot 171,61} = 0,63$$

Так как для сплава ВТ8 при температурековки критической является степень деформации порядка 0,75, то выбранные геометрические параметры не приведут к превышению степени деформации, а следовательно разрушения металла при штамповке не будет.

Для того, что бы заготовка свободно входила в высадочный ручей предусматриваем зазор в 1мм, следовательно диаметр высаживаемой части (D_1) будет равен 10мм.

Радиус скругления дна матрицы можно рассчитать по формуле:

$$r_1 = \frac{D_1 - d}{2} - L \cdot \operatorname{tg} \alpha - R$$

где:

R – наименьший из радиусов скругления стержня на поковке после операции высадки, $R=R_2=1$ мм.

$$r_1 = \frac{10 - 5,2}{2} - 30 \cdot \operatorname{tg} 0,5 - 1 = 1,14 \text{ мм}$$

Принимаем $r_1=2$ мм.

Длину стержневой части рассчитаем по формуле:

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

где:

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

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

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

z рассчитывается по формуле:

$$z = \left(0,029 - 0,007n + \frac{0,008 - 0,01\xi_R}{\xi_R + 0,268} - 0,009\alpha + 0,2235 \cdot \varepsilon_{\text{ВЫС}}^3 - 0,0734 \cdot \varepsilon_{\text{ВЫС}}^2 + 0,0237 \cdot \varepsilon_{\text{ВЫС}} + \frac{0,001 - 0,004f}{f + 0,026} \right)$$

где:

m – отношение длины стержневой части к диаметру, рассчитывается по

формуле $m = \frac{l}{d}$,

n – относительный диаметр высаженной части, рассчитывается по формуле

$$n = \frac{D^2}{d^2},$$

ρ – относительный радиус скругления стержневой части, рассчитывается по

формуле $\rho = \frac{R}{d}$,

ξ_1 – относительный радиус скругления дна матрицы, рассчитывается по

формуле $\xi_1 = \frac{r_1}{d}$,

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

α – угол наклона стержневой части,

f – коэффициент трению

$$z = \left(0,029 - 0,007 \cdot 7,99 + \frac{0,008 - 0,01 \cdot 1,15}{1,15 \cdot +0,268} - 0,009 \cdot 0,5 + 0,2235 \cdot 0,63^3 - 0,0734 \cdot 0,63^2 + \right. \\ \left. + 0,0237 \cdot 0,063 + \frac{0,001 - 0,004 \cdot 0,3}{0,3 + 0,026} \right) = 0,1179$$

$$a = 1 + 0,1179 - 0,046 = 1,0719;$$

$$b = 0,439 \cdot 5,2 \cdot (1 + 0,1179 + 1,032) - 30 = -25,09;$$

$$c = 5,2 \cdot 30 \cdot 0,439 = 68,484$$

$$l = \frac{25,09 + \sqrt{(-25,09)^2 + 4 \cdot 1,0719 \cdot 68,484}}{2 \cdot 1,0719} = 25,9 \text{ мм}$$

Учитывая то, что будет использоваться штамп с разъемными матрицами, уклона на стержневой части не будет.

Длину высаживаемой части найдём по формуле:

$$H = \frac{4 \cdot (V_{\text{выс}} - V_{\text{СТ}} - V_{\text{Р}})}{\pi \cdot D_1^2}$$

где

$V_{\text{выс}}$ – объём высаженной поковки рассчитывается при помощи программы t-flex;

$V_{ст}$ – объём стержня;

V_p – объём металла расходуемого на участке скругления стержневой части;

$$V_{выс} = 1814,89 \text{ мм}^2.$$

Объём стержня рассчитывается по формуле:

$$V_{ст} = \frac{\pi \cdot d^2 \cdot l}{4}$$

$$V_{ст} = \frac{\pi \cdot 5,2^2 \cdot 25,9}{4} = 549,76 \text{ мм}^3$$

При расчёте объёма металла расходуемого на участке скругления стержневой части, будем считать, что данный участок имеет форму усеченного конуса, тогда этот объём можно найти по формуле:

$$V_p = \frac{1}{12} \pi H_p (D_1^2 + D_1 \cdot d + d^2)$$

где

H_p – длина данного участка, рассчитывается по формуле:

$$H_p = \sqrt{(R + r_1)^2 - \left(R + r_1 - \frac{D_1 - d}{2} \right)^2}$$

$$H_p = \sqrt{(3 + 2)^2 - \left(3 + 2 - \frac{10 - 5,2}{2} \right)^2} = 2,94 \text{ мм}$$

$$V_p = \frac{1}{12} \cdot 3,14 \cdot 2,94 (10^2 + 10 \cdot 5,2 + 5,2^2) = 137,74 \text{ мм}^3$$

Подставив полученные значения в (11) получим

$$H = \frac{4 \cdot (1814,89 - 549,76 - 137,74)}{3,14 \cdot 10^2} = 14,36 \text{ мм}$$

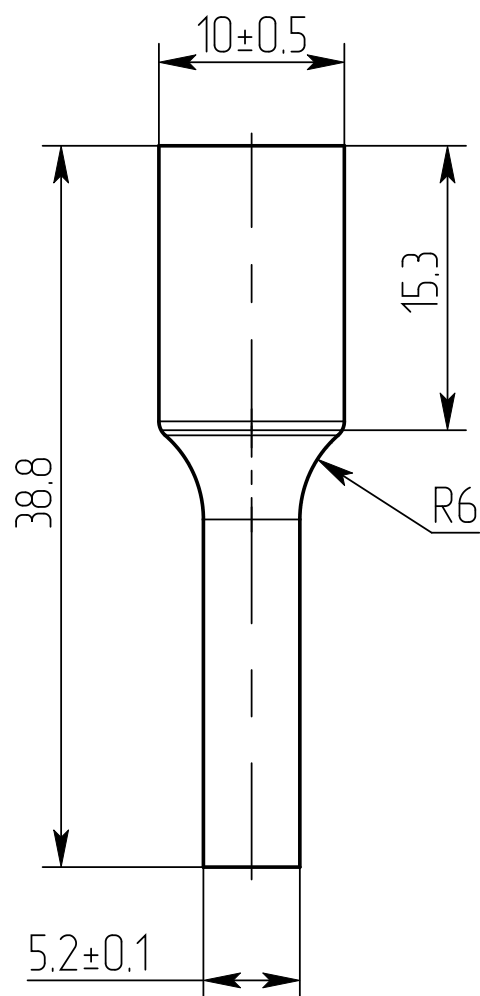


Рисунок 4.4 – Предварительно выдавленная заготовка.

Общую длину предварительно выдавленной поковки можно рассчитать по формуле:

$$L_{\text{ВВД}} = l + H + H_p$$

$$L_{\text{ВВД}} = 25,9 + 2,94 + 14,36 = 43,17 \text{ мм}$$

Допуски:

на диаметр стержневой часть $\pm 0,1$ мм;

на диаметр высаживаемой части $\pm 0,5$ мм;

остальные размеры обеспечиваются штампом.

Эскиз предварительно выдавленной заготовки представлен на рисунке 4.4.

4.3 Расчёт геометрических размеров заготовки

Учитывая что нагрев будет производиться в электропечи примем объём металла расходуемый на угар при нагреве равный 1,5%. Тогда объём заготовки можно рассчитать по формуле:

$$V_3 = V_{\text{п+об}} \cdot 1,03$$

где

$V_{\text{п+об}}$ – объём поковки с обломом, равен объёму высаженной поковки.

$$V_{\text{п+об}} = 1814,89 \text{ мм}^3.$$

$$V_3 = 1814,89 \cdot 1,03 = 1869,3 \text{ мм}^3$$

Зная диаметр заготовки и её объём найдём длину заготовки по формуле:

$$L_3 = \frac{4V_3}{\pi D_3^2}$$

$$L_3 = \frac{4 \cdot 1869,3}{3,14 \cdot 9^2} = 29,4 \text{ мм}$$

Принимаем длину заготовки равной 30мм.

4.4 Выбор температурного режима.

Согласно рекомендациям, заготовку из титанового сплава диаметром 9мм необходимо греть не менее 10 минут, а максимальное время 15 минут. Из [60] следует что температура началаковки сплава ВТ8 1020°C, температура концаковки 850°C. Нагрев будет производиться в электропечи сопротивления, перепад температур в разных зонах печи не должен превышать 20°C.

Необходимо установить нужен ли дополнительный подогрев высадкой, для этого промоделируем предложенный технологический процесс в программе QForm 2d/3d и посмотрим распределение температурных полей в заготовке после операции высадки.

Как видно из рисунка 4.5 после выдавливания часть которую необходимо высаживать немного вышла из температурного интервала, но поскольку во время деформации металл нагреется то подогрев между этими операциями производиться не будет.

Из рисунка 4.6 видно что к окончанию высадки температура металла замковой части находится в допустимом температурном интервале, поэтому решении об исключения подогрева между операциями выдавливания и высадки было верно. Стоит отметить, что как при процессе высадки, так и при выдавливании не происходит критического разогрева металла, а следовательно фазовых превращений, которые повлекут за собой снижение стойкости лопатки не будет.

Учитывая, что во время высадки металл будет затекать в зазор между пуансоном и матрицей, то после этой операции необходимо будет произвести зачистку торцевого заусенца, поэтому перед штамповкой в окончательном ручье штампа заготовку необходимо будет ещё раз нагреть.

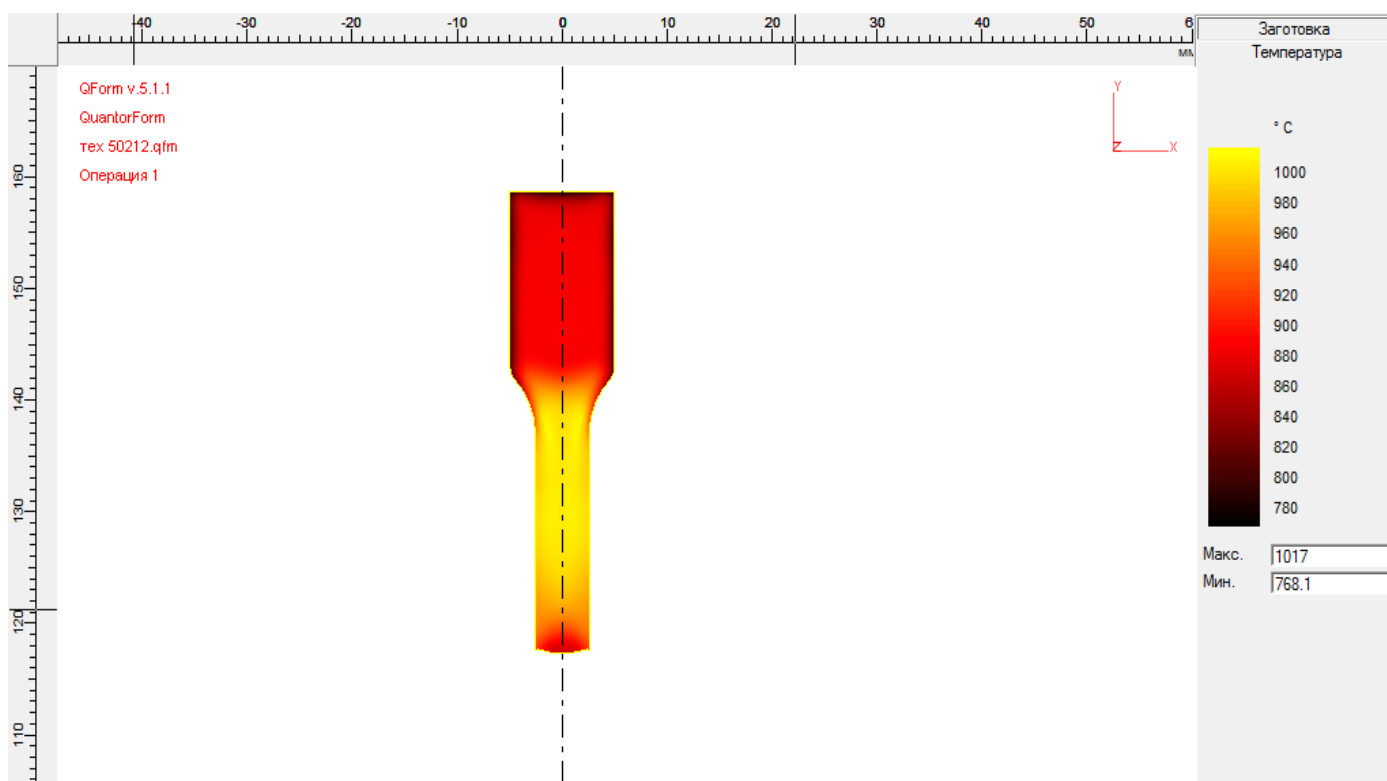


Рисунок 4.5 – Распределение температурных полей в предварительно выдавленной заготовке.

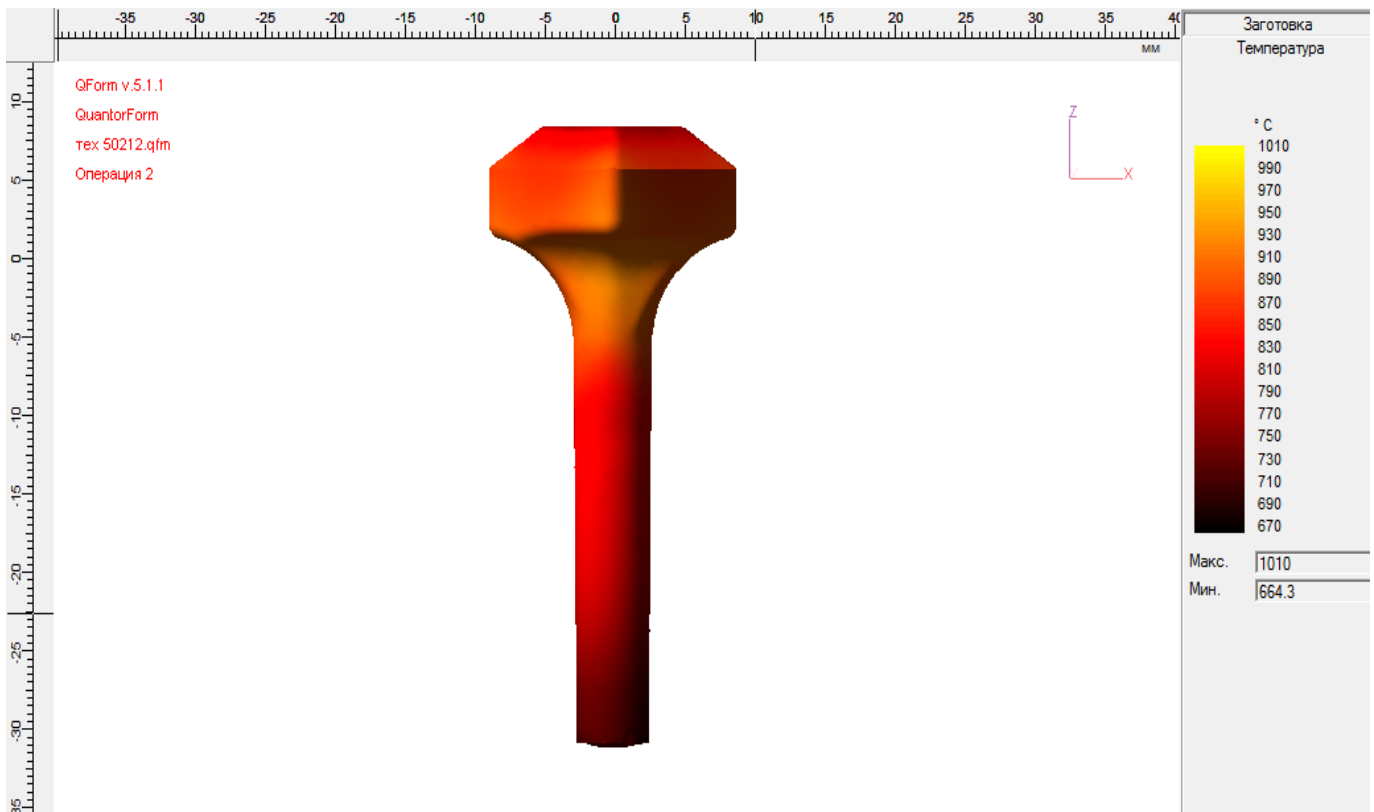


Рисунок 4.6 – Распределение температурных полей в заготовке с высаженной замковой частью.

4.5 Блок-схема математической модели расчета поковки по переходам от конечной поковки к первоначальной заготовке

Одной из конечных целей нашего исследования была разработка математической модели процесса изготовления поволок компрессорных лопаток со значительным перепадом площадей поперечного сечения. Наиболее удобно изобразить математическую модель в виде блок-схемы, это не только позволяет наглядно увидеть порядок выполнения расчётов, но и позволяет при необходимости написать программу для осуществления данного расчета. Однако перед блок схемой необходимо дать основные переходы штамповки с условными обозначениями, а также, а так же ряд формул необходимых для расчёта размеров для поковки лопатки. На рисунках 4.7-4.9 представлены эскизы переходов с указанием условных обозначений (окончательный переход, высадка замковой части, выдавливание первой части соответственно).

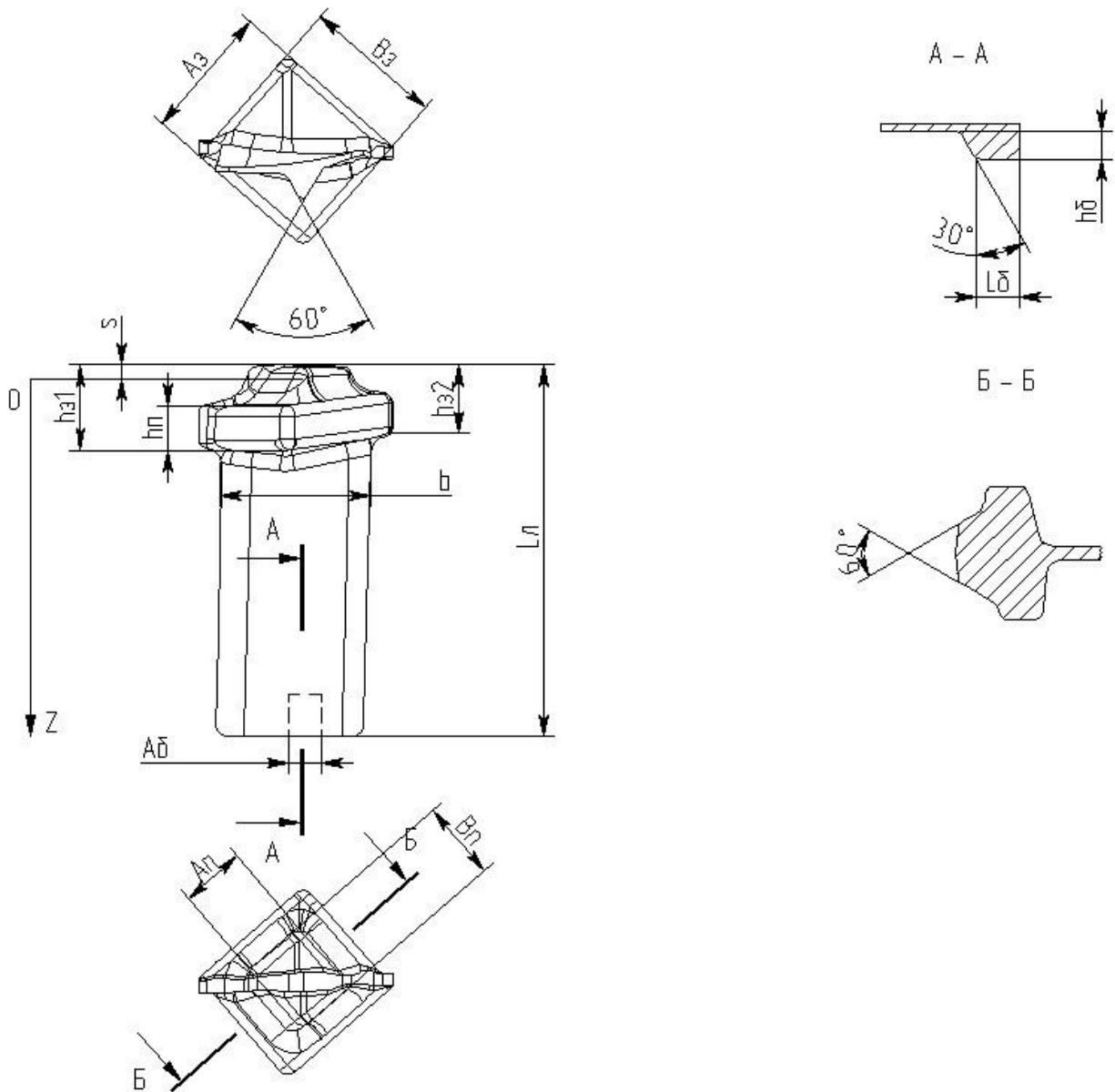


Рисунок 4.7 – Эскиз поковки лопатки с основными размерами

A_3 – ширина замка;

B_3 – толщина замка;

h_{31} – длина замка до дальней точки верхней поверхности полки;

h_{32} – длина замка до ближней части верхней поверхности полки;

h_n – толщина полки;

s – расстояние от подошвы замка до начала координат;

A_n – ширина подошвы замка;

B_n – толщина подошвы замка;

$L_{л}$ – длина лопатки;

b – ширина пера лопатки;

$A_б$ – ширина бобышки;

$B_б$ – толщина бобышки;

$L_б$ – длина бобышки.

Объём всей лопатки можно найти по формуле:

$$V_{л} = V_з + V_{п} + V_б$$

где

$V_з$ – объём замка;

$V_{п}$ – объём пера;

$V_б$ – объём бобышки.

Объём замка найдём по формуле:

$$V_з = \frac{h_{п}(A_з^2 + (h_{31} - h_{32})^2)}{A_з} \cdot B_з + A_{п} + 0,58(h_{32} - h_{п})$$

Объём бобышки найдём по формуле:

$$V_б = \frac{1}{2} h_б \cdot A_б \cdot L_б$$

При определении объёма пера лопатки будем считать, что зависимость площади поперечного сечения пера лопатки от координаты z имеет линейный вид, то есть поперечное сечение пера лопатки можно найти по формуле:

$$F_{л} = kz + b$$

где

k и b – коэффициенты определяющие положение прямой на координатной плоскости, определяются по заданным условиям.

$$k = \frac{F_1 - F_2}{z_1 - z_2}$$

где

z_1 и z_2 – координаты по оси z ;

F_1 и F_2 – площади поперечного сечения пера лопатки в координатах z_1 и z_2 соответственно.

$$b = F_1 - \frac{F_1 - F_2}{z_1 - z_2} \cdot z_1$$

Из приложения определённого интеграла следует:

$$V_{II} = \int_{h_{31}}^{L_{II}-s} F(z) dz$$

В нашем случае формула (7.8) имеет вид:

$$V_{II} = \int_{h_{31}-s}^{L_{II}-s} kz + b dz$$

Решив определённый интеграл (7.9), и упростив получили:

$$V_{II} = (L_{II} - h_{31}) \left[\frac{1}{2} (L_{II} - h_{31} - 2s) k + b \right]$$

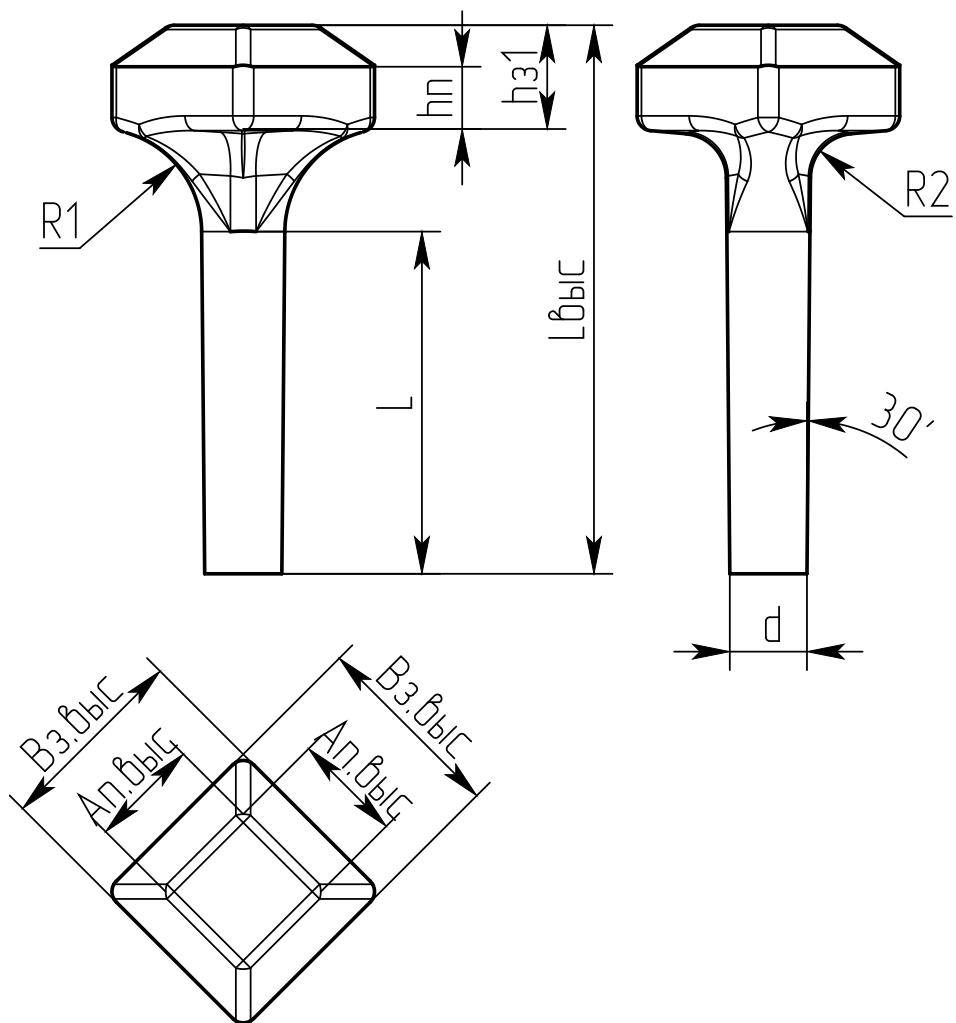


Рисунок 4.8 – Эскиз поковки с высаженной замковой частью

Размеры $h_{з1}$, $h_{п}$, соответствуют размерам окончательной поковки;

$В_{з.выс}$ – поперечный размер замка при операции высадке;

$А_{п.выс}$ – поперечный размер подошвы замка при операции высадке;

L – длина стержня после операции высадки;

d – диаметр стержневой части;

R_1 – радиус скругления стержневой части в плоскости разъёма штампа;

R_2 – радиус скругления стержневой части в плоскости перпендикулярной плоскости разъёма штампа

Учитывая, что у рассматриваемых лопаток размеры поперечные размеры замка (длина и ширина замка), а также аналогичные размеры для подошвы замка приблизительно равны, то для большей технологичности процесса, было принято решение делать на операции высадке данные размеры равными.

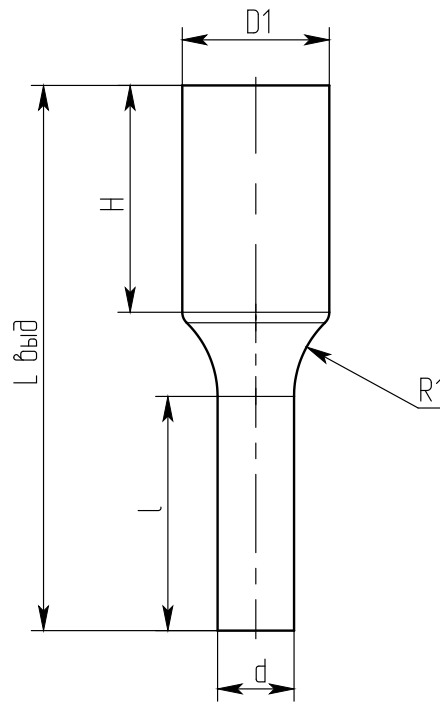


Рисунок 4.9 – Эскиз поковки с выдавленной стержневой частью

Размеры d , R соответствуют размерам поковки с высаженной замковой частью;

H – длина высаживаемой части;

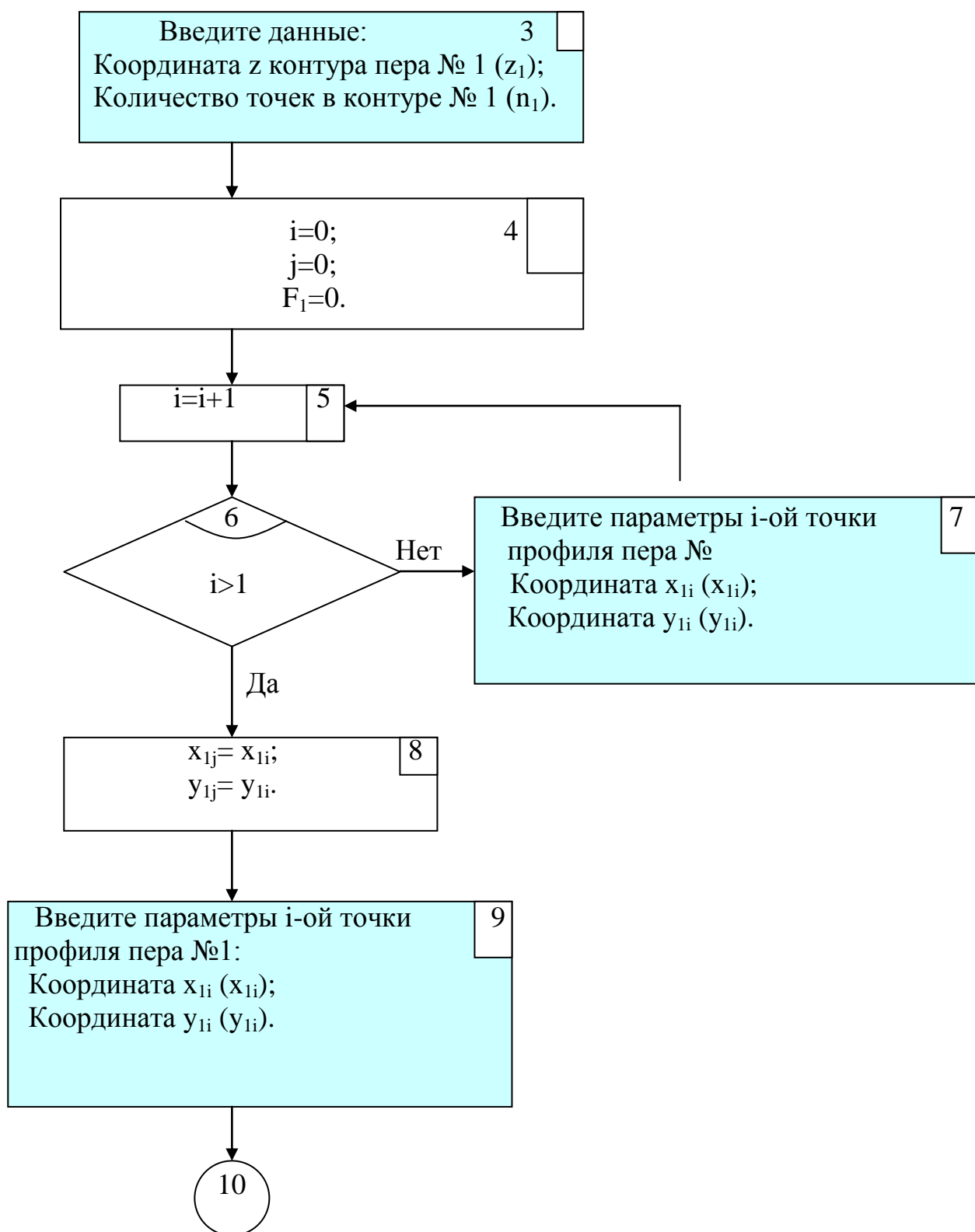
D_1 – диаметр высаживаемой части;

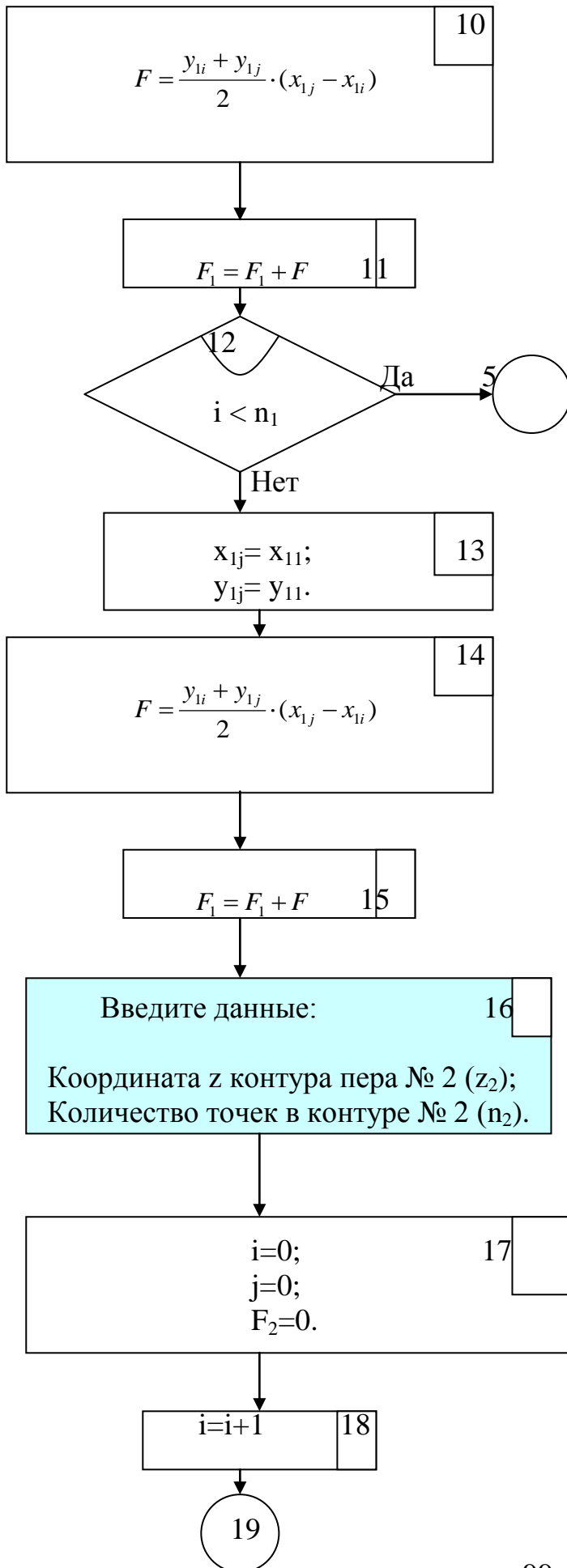
l – длина стержневой части после операции выдавливание;

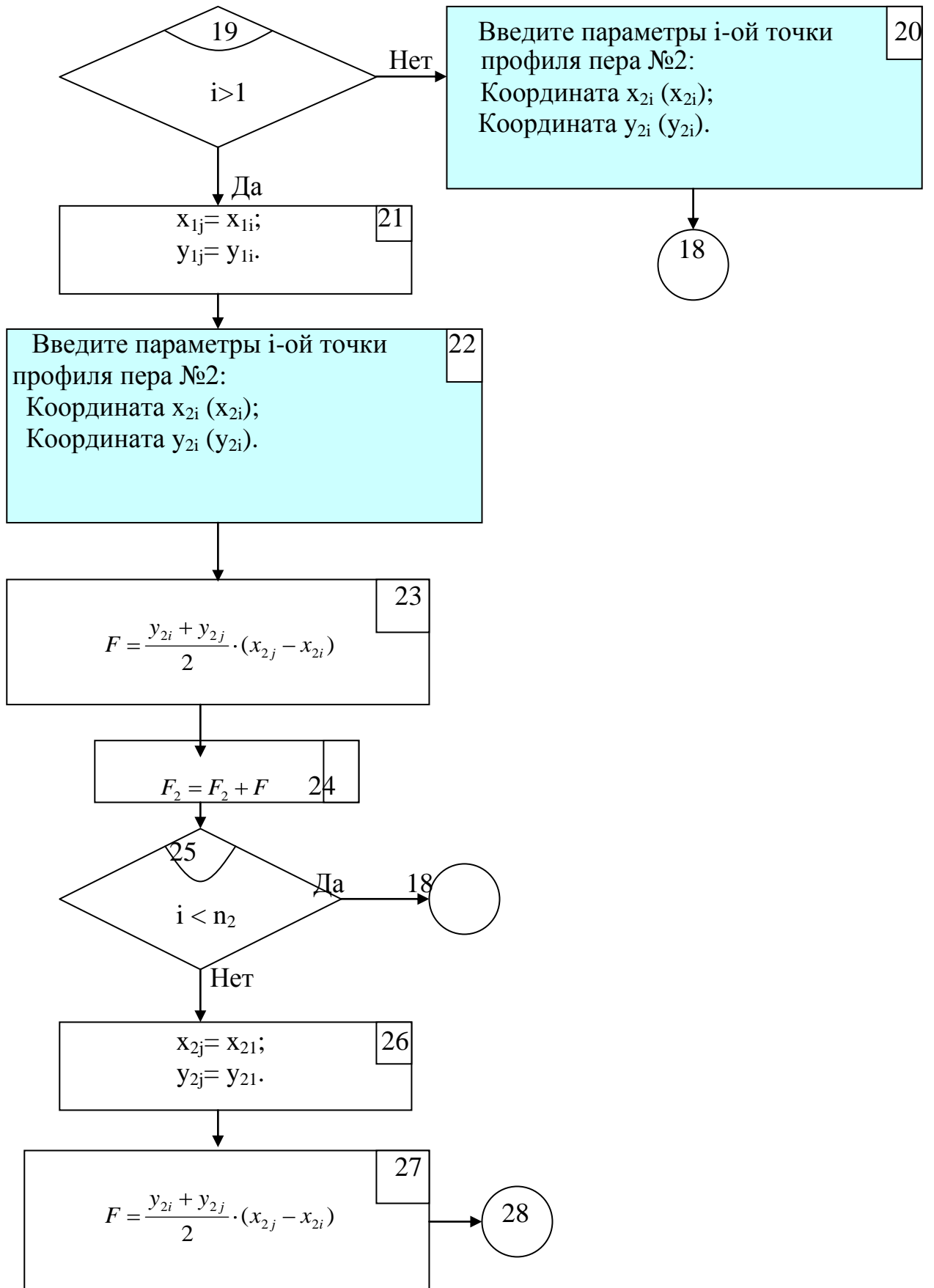
$L_{\text{выс}}$ – длина всей поковки после операции высадки.

Введите параметры	1
Ширина замка, мм (A_3)	
Толщина замка, мм (B_3)	
Длина замка до дальней точки верхней поверхности полки, мм (h_{31})	
Длина замка до ближней части верхней поверхности полки, мм (h_{32})	
Толщина полки, мм ($h_{\text{п}}$)	
Расстояние от подошвы замка до начала координат, мм (s)	
Ширина подошвы замка, мм ($A_{\text{п}}$)	
Толщина подошвы замка, мм ($B_{\text{п}}$)	
Длина лопатки, мм ($L_{\text{л}}$)	
Ширина пера лопатки, мм (b)	
Радиуса скруглений кромок замка, мм (r_1)	
Ширина бобышки, мм (A_6)	
Толщина бобышки, мм (B_6)	
Длина бобышки, мм (L_6)	
Коэффициент трения (f)	

2







$$F_2 = F_2 + F \quad 28$$

$$k = \frac{F_1 - F_2}{z_1 - z_2}, \quad 29$$

$$b = F_1 - \frac{F_1 - F_2}{z_1 - z_2} \cdot z_1,$$

$$V_{II} = (L_{II} - h_{31}) \cdot [L_{II} - h_{31} - 2s] \cdot k + b,$$

$$V_3 = \frac{h_{II} (A_3^2 + (h_{31} - h_{32})^2)}{A_3} \cdot B_3 + A_{II} + 0,58(h_{32} - h_{II}),$$

$$V_B = \frac{1}{2} h_B \cdot A_B \cdot L_B,$$

$$V_{II} = V_3 + V_{II} + V_B,$$

$$F_{KII} = k(L_{II} - s) + b + \frac{1}{2} h_B \cdot A_B$$

$$F_3 = k \cdot (h_3 - s) + b$$

31

$$F_{KII} > F_3$$

Нет

F_{CT}

$$F_{KII} \quad 32$$

Да

$$F_{CT} = F_{KII} \quad 33$$

$$d = \sqrt{\frac{F_{CT} \cdot 1,2 \cdot 4}{\pi}}, \quad 34$$

$$A_{3.6blc} = A_3 + I,$$

$$A_{n.6blc} = A_n + I,$$

$$R_1 = \frac{b - d - 2 \cdot L_3 \cdot \operatorname{tg} \alpha}{2},$$

$$R_2 = A + C - B - \frac{d}{2} - L_3 \cdot \operatorname{tg} \alpha$$

$$L = L_{II} - h_{31} - R_1$$

35

$$V_{3.БЫС} = h_{\Pi} \cdot A_{3.БЫС}^2 + \frac{1}{3} A_{\Pi.БЫС}^2 \cdot (h_{31} - h_{\Pi}), \quad 35$$

$$V_{R.БЫС} = \frac{2\sqrt{2}}{3} R \cdot d \cdot A_{\Pi.БЫС},$$

$$V_{CT.БЫС} = \frac{1}{12} \pi L (r_1^2 + d_{R1} \cdot d + d^2),$$

$$V_{БЫС} = V_{3.БЫС} + V_{R.БЫС} + V_{CT.БЫС},$$

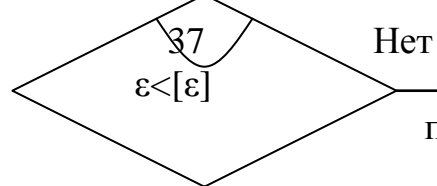
$$F_{3.БЫС} = B_{3.БЫС} \cdot A_{\Pi.БЫС},$$

$$F_{CT} = \frac{\pi d^2}{4},$$

$$D = \sqrt{\frac{4 \cdot F_{3.БЫС}}{\pi}}$$

$$\varepsilon_{\Sigma} = 1 - \frac{F_{CT}}{F_3} \quad 36$$

$$\varepsilon = 1 - \sqrt{1 - \varepsilon_{\Sigma}}$$



Степень деформации ε 38
превышает допустимую $[\varepsilon]$

Да

$$D_3 = \frac{d}{1 - \varepsilon} \quad 39$$

$$D_1 = D_3 + 1$$

$$n = \frac{D^2}{d^2},$$

$$m = \frac{l}{d},$$

$$\xi_R = \frac{R}{d},$$

$$\xi_1 = \frac{r_1}{d},$$

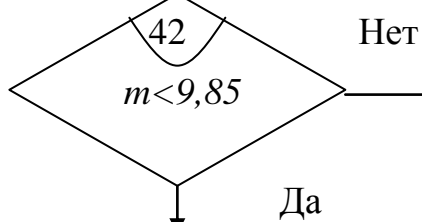
$$m = \frac{L}{d},$$

$$\alpha = 0,5$$

40

41

$$z = \left(0,029 - 0,007n + \frac{0,008 - 0,01\xi_R}{\xi_R + 0,268} - 0,009\alpha + 0,2235 \cdot \varepsilon_{BЫC}^3 - 0,0734 \cdot \varepsilon_{BЫC}^2 + \right. \\ \left. + 0,0237 \cdot \varepsilon_{BЫC} + \frac{0,001 - 0,004f}{f + 0,026} \right)$$



$$l = \frac{L}{1+z} \quad 43$$

$$a = 1 + z - 0,046, \quad 44 \\ b = 0,439d(1 + z + 1,032) - L, \\ c = d \cdot L \cdot 0,439, \\ l = \frac{-b + \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a}$$

$$V_{CT} = \frac{\pi \cdot d^2 \cdot l}{4} \quad 45 \\ H_R = \sqrt{R \left(\frac{D_1 - d}{4} \right)^2} \\ V_R = \frac{1}{12} \pi H_P \left(D_1^2 + D_1 \cdot d_{BЫД} + d_{BЫД}^2 \right) \\ H = \frac{4 \cdot (V_{BЫC} - V_{CT} - V_R)}{\pi \cdot D_1^2} \\ L_{BЫД} = l + H + H_P$$

$$V_3 = V_{BЫC} \cdot 1,0225 \quad 46 \\ L_3 = \frac{4V_3}{\pi D_3^2}$$

47

Расчётные параметры		47
Поперечный размер замка при операции высадке	(A _{з.выс})мм	
Поп. размер подошвы замка при операции высадке	(A _{п.выс})мм	
Длина стержня после операции высадки	(L)мм	
Диаметр стержневой части	(d)мм	
Радиуса скругления стержневой части	(R ₁ , R ₂)мм	
Длина высаживаемой части	(H)мм	
Диаметр высаживаемой части	(D)мм	
Диаметр усечённого конуса	(D _к)мм	
Длина усечённого конуса	(h _к)мм	
Длина стержневой части после операции выдавливание	(l)мм	
Длина всей поковки после операции высадки	(L _{выс})мм	
Диаметр заготовки	(D _з)мм	
Длина заготовки	(L _з)мм	

При построении блок схемы подкрашенными обозначены блоки в которых необходимо либо вводить информацию либо получать её.

Представленный алгоритм позволяет рассчитывать размеры заготовки по переходам, кроме того блоки с № 2-29 позволяют определить площадь сложной формы пера лопатки и найти наибольшее поперечное сечение. В случае если данные площади известны, то данную математическую модель можно использовать с блока 30.

4.6 Сравнение базовой и предложенной технологий

Наиболее адекватно позволяет сравнить данные технологии выход годного, который можно найти по формуле:

$$\eta = \frac{G_{дет}}{G_{заг}} \cdot 100$$

где

G_{дет} – масса детали 4г.;

G_{заг} – масса заготовки, рассчитывается по формуле:

$$G_{заг} = V_{заг} \cdot \rho \cdot 10^{-3}$$

где

ρ – плотность, для титана 4,5г/см³

Для наглядности занесём данные в таблицу 3.1

Таблица 3.1 – Сравнение исходной и базовой технологий

Параметр	Базовая 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%
Структура металла	 <p>Рисунок 4.10 – Распределение лагранжевых линий в базовом варианте</p>	 <p>Рисунок 4.11 – Распределение лагранжевых линий в предложенном варианте</p>

Как видно из рисунков 4.10 и 4.11 предложенная технология позволяет получить более качественную структуру металла по перу лопатки с лучшими прочностными характеристиками. Так как заковов на переходе «перо-замок»

отсутствуют то можно сделать вывод, что радиуса скругления стержневой части на заготовительных операциях были выбраны правильно.

Так же как видно из рисунков 4.12 и 4.13 предложенная технология позволяет снизить силу штамповки в окончательном штампе на 35%.

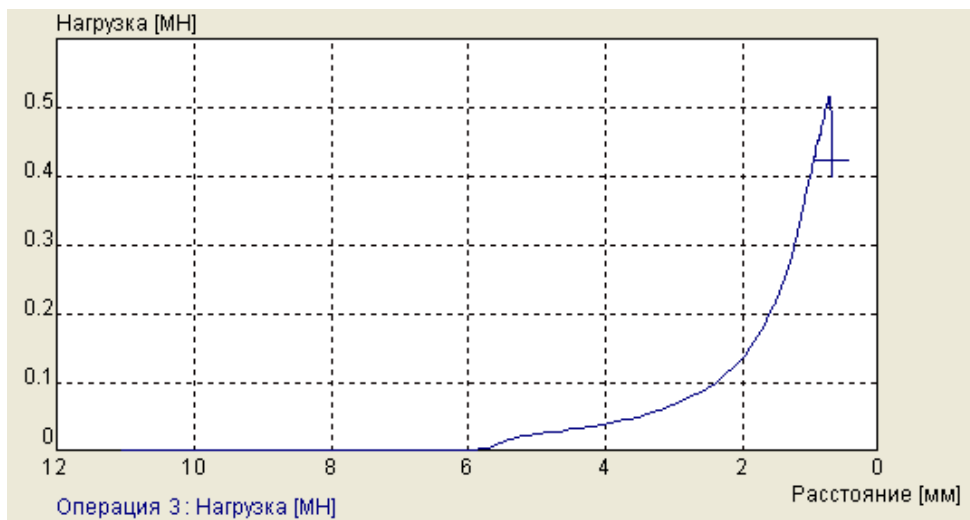


Рисунок 4.12 – Зависимость усилия от расстояния между штампами в предложенном варианте.

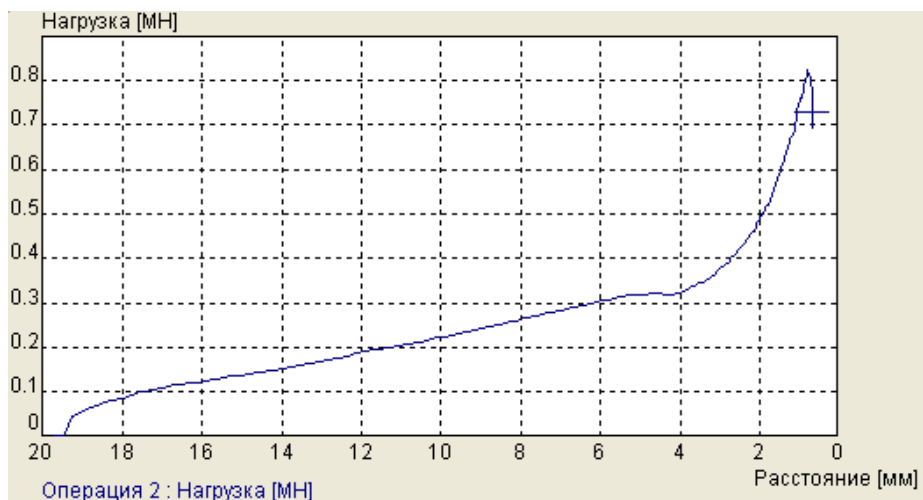


Рисунок 4.13 – Зависимость усилия от расстояния между штампами в базовом варианте.

Как видно из рисунков 4.14 и 4.15 контактное давление на ручей окончательного штампа в предложенной технологии меньше базового почти на 25%, что позволяет сделать вывод о том, что стойкость штампа увеличится. А следовательно увеличится их срок службы. Кроме исходя из величины контактного давления, можно сделать вывод что увеличится также и точность поковок, но для

точного анализа этого параметра необходимо рассмотреть величину смещения контура штампа.

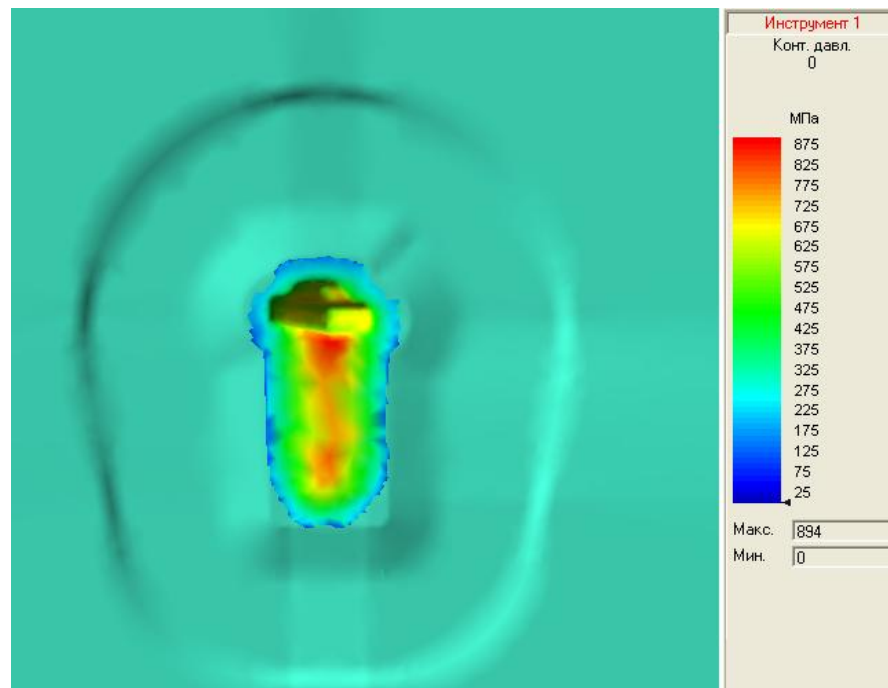


Рисунок 4.14 – Контактное давление на ручей окончательного штампа в предложенной технологии

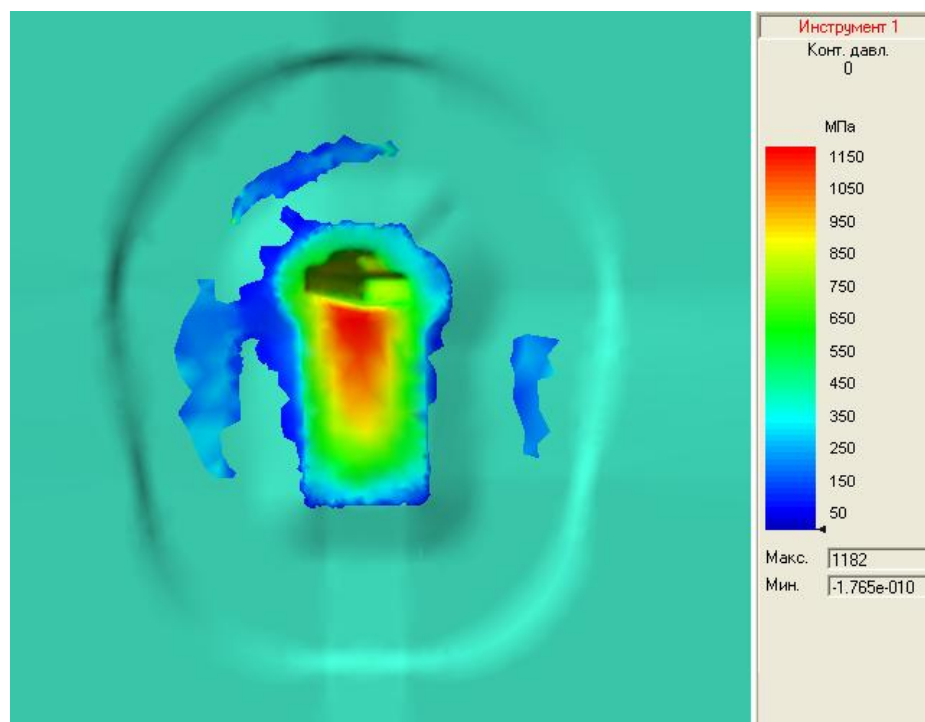


Рисунок 4.15 – Контактное давление на ручей окончательного штампа в базовой технологии

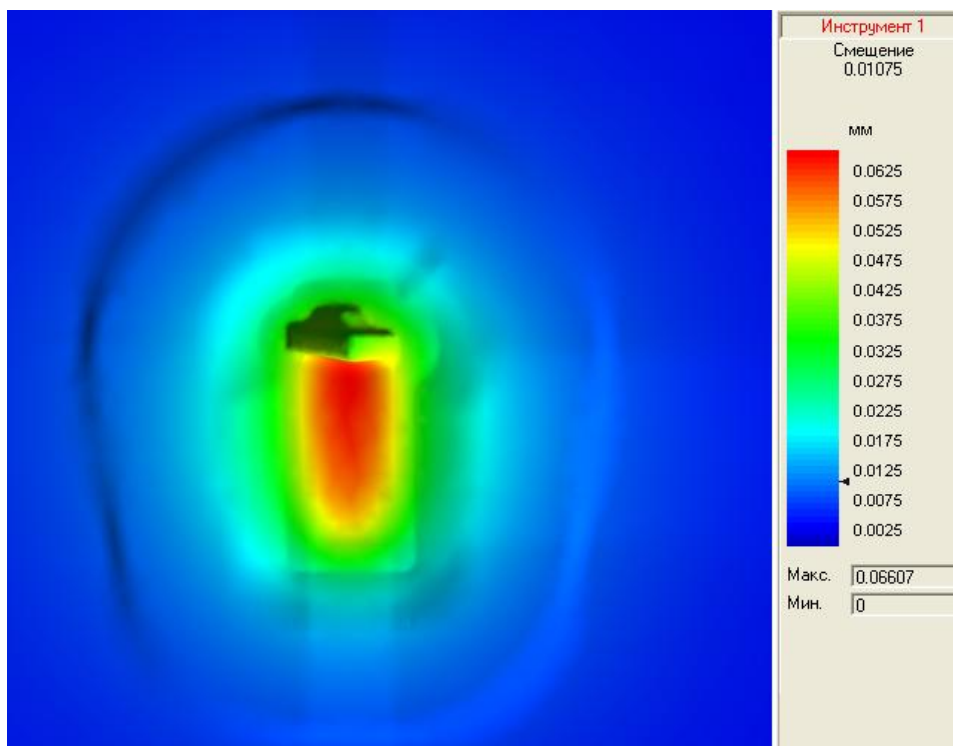


Рисунок 4.16 – Смещение контура ручки окончательного штампа в предложенной технологии

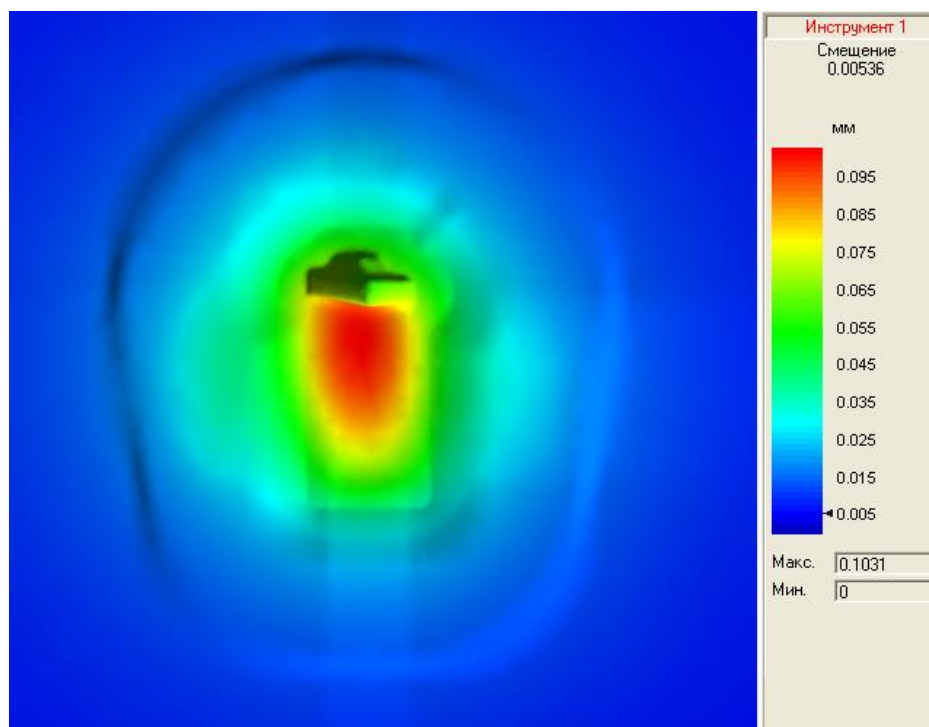


Рисунок 4.17 – Смещение контура ручки окончательного штампа в базовой технологии

Анализ рисунков 4.16 и 4.17 позволяет сделать вывод о том, что точность поковок, изготавливаемых по предложенной технологии будет выше, так как смещение контура штампа меньше чем в базовой на 35%.

Выводы по разделу

1. Предложена технология производства поковок компрессорных лопаток с большим перепадом площадей поперечного сечения путём поэлементного формированием объёмов замка и пера лопатки.

2. Разработана методика расчёта технологии для поэлементного формирования поковок компрессорных лопаток.

3. Предложена последовательность выбора радиусов скругления, позволяющая избежать заковок на переходе замок-перо, как в полости штампа, так и в перпендикулярной ей плоскости

4. Промоделирован процесс штамповки поковки компрессорных лопаток, на основании данного моделирования был выбран температурный режим и количество подогревов, что очень важно для титановых сплавов, в связи с образованием альфирированного слоя при нагреве данных сплавов.

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. Исследованы контактные давление и смещение контура окончательного штампа, как в базовой технологии так и в действующей. Установлено что в предложенной технологии величина контактного давления снизилась на 35%, а смещение контура штампа на 25%.

Заключение

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 литературы

1. Семенов, Е.И. Ковка и штамповка: справочник. Т.2 / Под редакцией Е.И. Семенова. – М. Машиностроение, 2010 – 720с.
2. ASM Metals Handbook. Metalworking: Bulk Forming, V. 14A, ASM International, Materials Park, OH, 2005.
3. Вакалов, А.А. Применение компьютерного моделирования при разработке процессов горячей штамповки поковок лопаток / А.А. Вакалов // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. – 2012. – № 1. – С. 36-41
4. Фетисов, Г.П. Материаловедение и технология материалов. / Г.П. Фетисов, М.Г. Карпман, В.М. Матюнин и др. – ГУП «Издательство «Высшая школа», 2001 – 39,2 печ. л.
5. Охрименко, Я.М. Технология кузнечно-штамповочного производства / Я.М. Охрименко – М.: Машиностроение 1976. – 560 с.
6. Володин, А.И. Повышение качества круглых в плане поковок на основе совершенствования технологии штамповки дис. канд. техн. наук 05.02.09/ Володин Александр Игоревич – Липецк 2010. – 166 с.
7. Сторожев, М.В. Ковка и объемная штамповка стали: справочник в 2-х т. / Под ред. М.В. Сторожева – М.: Машиностроение, 1967. Т. 2 – 448 с.
8. Тетерин, Г.П. Основы оптимизации и автоматизации проектирования технологических процессов горячей объемной штамповки / Г.П. Тетерин, П.И. Полухин– М.: Машиностроение, 1979 – 284 с.
9. Акаро, И.Л. Классификация поковок и технологических переходов горячей штамповки. / И.Л. Акаро // Кузнечно-штамповочное производство. – 1988. – №1. – С. 8-11.
10. Дальский, А.М., Технология конструкционных материалов / А.М. Дальский, Т.М. Барсуков, Л.Н. Бухарин и др. – М.: Машиностроение, 2004 – 512с.

- 11.Атрошенко, А.П., Штамповка на кривошипных горячештамповочных прессах и горизонтально-ковочных машинах. / А.П. Атрошенко, Е.П. Булат, В.Д. Спиринов – Л.: Машиностроение, 1983 – 95с.
- 12.Челноков, Н.М. Технология горячей обработки материалов. / Н.М. Челноков, Л.К. Власьевнина, Н.А. Адамович – М. Высш. школа, 1981. – 295с.
- 13.Брюханов, А.Н. Ковка и объёмная штамповка. / А.Н. Брюханов– М.: Машиностроение, 1975 – 215с.
- 14.ГОСТ 18970-84.Обработка металлов давлением. Термины и определения.
- 15.Ребельский, А.В. Основы проектирования процессов горячей объёмной штамповки. / А.В. Ребельский – М.: «Машиностроение», 1965.
- 16.Ребельский, А.В. Объёмная штамповка и выдавливание. / А.В. Ребельский // Сб. «Состояние кузнечно-штамповочного производства». Под ред. В. Т. Мещерина. М.: – ВИНТИ, 1961.
- 17.Перлин, И.Л. Теория прессования металлов. / И.Л. Перлин, Л.Х. Рейтберг – М.: Металлургия, 1975. – 447 с.
- 18.Амбарцумян, А.А., Управление технологическими процессами на основе событийных моделей / А.А. Амбарцумян, Д.Л. Казанский // Автоматика и телемеханика. – 2001. – №10. – С. 188-203.
- 19.Томсен, Э. Механика пластической деформации при обработке металлов / Э. Томсен, Ч. Янг, Ш. Кобаяши – М.: Машиностроение, 1969.- 504 с.
- 20.Unckel. Uber die Fließbewging plastischen Materials. Berlin., Verl Springer, 1928.150 s.
- 21.Овчинников, А.Г. Основы теории штамповки выдавливание на прессах / А.Г. Овчинников – М.: Машиностроение, 1983 – 220с.
- 22.Корсаков, В.С. Технология изготовления заготовок в машиностроении. / Под редакцией В.С.Корсакова – М. Машиностроение 1971 г – 223с.
- 23.Дрель, О.Ф. Штамповка выдавливанием поковок с боковыми отроутками и фланцами / О.Ф. Дрель, А.Г. Овчинников, И.С. Поляков // Кузнечно-штамповочное производство. 1979 – №4 – с. 10-13.

- 24.Сторожев, М.В. Теория обработки металлов давлением: Учебник для вузов. Изд. 4-е, перераб. и доп. / М.В. Сторожев, Е.А. Попов – М.: Машиностроение, 1977. - 423 с.: ил.
- 25.Гришин, В.М. К вопросу о кинематическом и напряжённом состоянии металла при прессовании прутков прямым истечением. / В.М. Гришин, М.Ф. Захаров, А.Г. Овчинников // Машины и технология обработки металлов давлением. Труды МВТУ, № 335. – 1980 – с. 145-155.
- 26.Гун, Г.Я. Теоретические основы обработки металлов давлением / Г.Я. Гун– М.: Металлургия, 1980 – 456с.
- 27.Журавлёв А.З. Основы теории штамповки в закрытых штампах. / Журавлёв А.З. – М.: Машиностроение, 1973 – 225с.
- 28.Шубин, И.Н. Определение усилия раскрытия матриц при боковом выдавливании. / И.Н. Шубин // Машины и технология обработки металлов давлением. Труды МВТУ, № 229. – 1976 – с. 82-87.
- 29.Львов, Д.А. О фасонировании заготовок для штамповки поковок лопаток ГТД. / Д.А. Львов // XII Международная научно-техническая Уральская школа-семинар металлургов — молодых ученых.: сборник трудов — Екатеринбург : УрФУ, 2011. — С. 170-172.
- 30.Штейберг, В.М. Кузнечно-штамповочное производство Волжского автомобильного завода / В.М. Штейберг, И.Л. Акаро – М.: Машиностроение, 1977 – 302 с.
- 31.Салтыков, В.А. Машины и оборудование машиностроительных предприятий. / В.А. Салтыков, В.П. Семенов, В.Г. Семин, В.К. Федюкин – БХВ-Петербург, 2012 – 288с.
- 32.Николаев, Г.К. Штамповка многоступенчатых валов на ГКМ. / Г.К. Николаев, А.Е. Воробей // Кузнечно-штамповочное производство, 1964, №5 с. 41-43.
- 33.Корсаков, В.С. Основы технологии машиностроения / Под ред. В.С. Корсакова – М.: Машиностроение, 1977 – 416с.

34. Бойцов, В.В. Горячая объемная штамповка / В.В. Бойцов, И.Д. Трофимов – М. Высшая школа 1982г – 270с.
35. Сатель, Э.А. Проблемы развития технологии машиностроения. / Под ред. Э.А. Сателя. – М.: Машиностроение, 1967 – 592с.
36. Гурин, Ф.В. Технология автотракторостроения / Ф.В. Гурин, В.Д. Клепиков, В.В. Рейн – М.: Машиностроение, 1981 – 295с.
37. Юсипов, З.И. Обработка металлов давлением и конструкции штампов / З.И. Юсипов, Ю.И. Капин – М.: Машиностроение, 1981 – 272с.
38. Чумаченко, Е.Н. Проблемы промышленного использования сверхпластичности металлов и сплавов при обработке металлов давлением / Е.Н. Чумаченко, Н.Н. Грунин // *Металлург* – 2005 – №11 – с 32-37.
39. Чумаченко, Е.Н. Проектирование и оптимизация режимов деформирования титановых оболочек в условиях сверхпластичности / Е.Н. Чумаченко, И.В. Логашина, В.И. Малый // *Металлург* – 2007 – №2 – с.26-31.
40. Кайбышев, О.А. Пластичность и сверхпластичность металлов / О.А. Кайбышев – М.: Сеталлургия, 1975 – 280с.
41. Фиглин, С.З. Изотермическое деформирование металлов. / С.З. Фиглин, В.В. Бойцов, Ю.Г. Калпин и др. – М.: Машиностроение. 1978. – 239 с.
42. *Metal Progr.* 1980. Vol. 18. No. 11. P. 34–36.
43. *Mech. Des.* 1975. Vol. 47. No. 11. P. 86–88.
44. Конструкционные и жаропрочные материалы для новой техники: Сб. трудов института мет. Им. А.А. Байкова. – М.: Наука, 1978.
45. Гунин, Н.Н. Особенности работы инструмента для горячего изотермического деформирования. / Н.Н. Гунин // *Кузнечно-штамповочное производство* – 1981 – №7 – с.4-6.
46. Самсонов, Г.В. Физико-химические свойства окислов: Справочник. / под ред. Г.В. Самсонов – М.: Metallurgia, 1978 – 472с.
47. Грунин, Н.Н. Средства нагрева инструмента и конструкции гидропривода прессов для горячего изотермического деформирования. / Н.Н. Грунин // *Кузнечно-штамповочное производство* – 1988 – № 10 – С. 7–10.

48. Романов, К.И. Механика горячего формоизменения металлов / К.И. Романов – М.: Машиностроение. 1993 – 240 с.
49. Васин, Р.А. Введение в механику сверхпластичности / Р.А. Васин, Ф.У. Еникеев – Уфа: Гилем, 1998 – 278 с.
50. Шур, И.А. Технологическое оборудование для прессования металлов / И.А. Шур – М.: Metallurgy, 1979. – 215 с.
51. Коровский, Ш.Я. Летающие металлы / Ш.Я. Коровский – М.: Машиностроение 1967. – 255с.
52. Головкин, П.А. Перспективы повышения надёжности изделий из титановых сплавов в летательных аппаратах. / П.А. Головкин, С.А. Валиахметов, С.А. Фесенко // Технология металлов – 2011 – №9 – с. 16-22.
53. Маквиллэн, А.Д. Титан / А.Д. Маквиллэн, М.К. Маквиллэн– М.: Машиностроение, 1957 – 459 с.
54. Паршин, А.М. Предотвращение преждевременных разрушений формированием определенной структуры металла / А.М. Паршин, А.Н. Тихонов, Г.Г. Бондаренко // М.: Металлы. – 1999. – № 5. – С. 87—92.
55. Галкин, В.И. Получение осесимметричных штампованных поковок из титановых сплавов горячей объёмной штамповкой-вытяжкой. / В.И. Галкин, П.А. Головин, С.А. Валиахметов, С.А. Фесенко // Технология металлов – 2011 – №10 – с 19-24.
56. Ежов, А.А. Разрушение металлов / А.А. Ежов, Л.П. Герасимова – М.: Наука, 2004 – 400с.
57. Носова, Г.И. Фазовые превращения в сплавах титана / Г.И. Носова – М.: Metallurgy, 1968г – 180с.
58. Головин, П.А. Комплексное исследование влияния параметров деформации на сопротивление усталости и СРТУ материалов Ш-образных поковок из титановых сплавов. / П.А. Головин, С.А. Валиахметов, С.А. Фесенко // Технология материалов – 2011 – №9 – с. 16-28

- 59.ОСТ 1.90006-86 Заготовки из титановых сплавов для изготовления лопаток. Технические требования. 30с.
- 60.Дубинин, Г.Н. Авиационное материаловедение. Учебник для высших учебных заведений гражданской авиации / Г.Н. Дубинин, А.И. Тананов – М.: Машиностроение, 1988. – 320с.
- 61.ОСТ 1.90013-81 Сплавы титановые. Марки. 7с.
- 62.Корнеев, Н.И. Ковка и штамповка цветных металлов. Справочник / Н.И. Корнеев, В.М. Ажаков – М.: Машиностроение. 1972 – 230с.
- 63.Полухин, П.И. Сопротивление пластической деформации металлов и сплавов / П.И. Полухин, Г.Я. Гун, А.М. Галкин – М.: Metallurgy, 1976, – 488с.
- 64.Головкин, П.А. Управление деформацией как инструмент обеспечения заданных структуры и свойств поковок из титановых сплавов / П.А. Головкин, С.А. Фесенко // Технология машиностроения – 2008 – № 8 – с. 15-19.
- 65.Колачев, Б. А. Титановые сплавы разных стран. Справочник / Б.А. Колачев, И.С. Полькин, В. Д. Талалаев – М.: ВИЛС, 2000. 316 с.
- 66.Хандримайлов, А.А. Метод конечных элементов / А.А. Хандримайлов–ХНАДУ. 2013 – 31 с.
- 67.Иванов, К.М. Математическое моделирование процессов обработки давлением / К.М. Иванов, А.В. Лясников, Л.А. Новиков и др. Под общ. ред. Лясникова. А.В. – СПб.: ТОО «Инвентекс», 1997 – 268 с.
- 68.Гун, Г.Я. Математическое моделирование процессов обработки металлов давлением / Г.Я. Гун – М.: Metallurgy, 1983. – 352с.
- 69.Тетерин, Г.П. Основы оптимизации и автоматизации проектирования технологических процессов горячей объемной штамповки / Г.П. Тетерин, П.И. Полухин. – М.: Машиностроение, 1979. – 284 с.
- 70.Болтало Я.М. Разработка технологии штамповки осесимметричных деталей с фланцем с применением комбинированного трехстороннего выдавливания: дис. канд. техн. наук 05.02.09/ Болтало Ярослав Николаевич – М., 2011. – 142с.

- 71.Алиев, Ч.А. Система автоматизированного проектирования технологии горячей объемной штамповки / Ч.А. Алиев, Г.П. Тетерин.- М.: Машиностроение, 1987. – 224 с.
- 72.Biswas S.K., Knight W.A. Towards Integrated Design and Production System for Hot Forging Dies. Internationals Journal Production Research, 1976, N 1. P.
- 73.Subramanian T. L., Altan T., Bougler F. W. Application of Computer-Aided Techniques to Precision Closed-Die Forgings // CIRP, Ann. 1978. N 1. P. 123-127.
- 74.Altan T., Akgerman N. Tecniche CAD/CAM per stampi ed alter superfici complesse // Tranciatura stampaggio. 1982. N 2-3. P. 81-86.
- 75.Altan T., Nadpal V. Impression and closed-die forging // International Metals Reviews. 1977, N 12. P. 322-341.
- 76.Chan Y. K., Mullineux G., Knight W. A Computer-aided Design and Manufacture of Forging Dies // Metallurgy. 1980. N 1. P. 24-28, 30.
- 77.Губкин, С.И. Теория обработки металлов давлением / С.И. Губкин - М.: Metallurgizdat, 1947. - 532 с.
- 78.Охрименко, Я.М. Теория процессовковки: учебное пособие для вузов / Я.М. Охрименко, Б.А. Тюрин. – М.: Высш. школа, 1977.- 295 с.
- 79.Иксов, Е.П. Инженерные методы расчета усилий при обработке металлов давлением / Е.П. Иксов. М.: Машгиз, 1955 – 280с.
- 80.Тарновский, И.Я. Деформации и усилия при обработке металлов давлением / И.Я. Тарновский, А.А. Поздеев, О.А. Ганадго. - М.: Машгиз 1959. – 304С.
- 81.Унсков В.П. Теория пластических деформации металлов / В.П. Унсков, У.Джонсон, В.Л. Колмогоров и др. – М.: Metallurgiya, 1953. – 600 с.
- 82.Колмогоров, В.Л. Механика обработки металлов давлением: 2-е изд перераб. и доп. / В.Л. Колмогоров. – Екатеринбург: Издательство Уральского государственного университета - УПИ, 2001. – 836 с.
- 83.Соколовский, В.В. Теория пластичности / В.В. Соколовский – М.: Высшая школа, 1969. – 608 с.
- 84.Джонсон, У. Теория пластичности для инженеров / У. Джонсон,Н.Б. Меллор // Пер. с англ. А.Г. Овчинников. – М.: Машиностроение, 1979. – 567 с.
- 85.Прагер, В. Теория идеально пластических тел / В. Прагер, Ф.Г. Ходж. – М.: Издательство иностранной литературы, 1956. – 398 с.
- 86.Северденко, В.П. Теория обработки металлов давлением / В.П. Северденко. – Минск: Высшая школа, 1966. – 224 с.
- 87.Евстратов, В.А. Теория обработки металлов давлением / В.А.Евстратов – Харьков: Вища школа, 1981. – 248 с.

88. Няшин Ю.И. Исследование напряженно-деформируемого состояния при прокатке высоких полос с помощью метода конечных элементов / Ю.И. Няшин, А.Н. Скороходов, И.Н. Ананьев, Н.В. Трусов. // Обработка металлов давлением. – Свердловск. – 1974. – №2. – С. 5-3.
89. Kudo H. and Matsubara S. The use of finite element method in the analysis of plastic deformation of some metal forming processes, Annals of the CIRP, 23-2 (1974), P. 219-225.
90. Трусов Н.В. Две модификации методов решения задач теории обработки металлов давлением / Н.В. Трусов, Ю.Л. Няшин, А.Н. Скороходов, И.А. Соленников // Обработка металлов давлением. – 1986.- № 3.- С. 9-12.
91. Малинин, Н.Н. Решение задач горячего формоизменения методом конечных элементов / Н.Н. Малинин, К.И. Романов // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. – 1977. – № 8. – С. 127-131.
92. Сегал, В.М. Технологические задачи теории пластичности (методы исследования) / В.М. Сегал. – Минск: Наука и техника, 1977. – 254 с.
93. Osakada K. A review of finite element analysis of metal forming, Proc. 4 th Int. Conf. Prod. Engg., Tokyo, (1980), P. 44-49.
94. Биба, Н.В. Математическое моделирование процесса прокатки с применением метода конечных элементов: автореф. дис. канд. техн. наук / Н.В. Биба. – Москва, 1983. – 26 с.
95. Чумаченко, Е.Н. К вопросу о применении метода конечных элементов в задачах о деформировании несжимаемых сред / Е.Н. Чумаченко, А.И. Скороходов, А.И. Александрович // Известия Вузов. Черная металлургия. – 1985. – № 9. – С. 89-92.
96. Пруцков, Р.Н. Компьютерное моделирование влияния различных факторов на точность штамповки поковок на КГШП / Р.Н. Пруцков, В.И. Балаганский, Л.М. Смольянинова и др. // Кузнечно-штамповочное производство. – 2002. – № 12. – С. 18-27.
97. Бочаров, Ю.А. Решение технологических задач обработки давлением с применением метода конечных элементов [Текст] / Ю.А. Бочаров, А.В. Власов // Известия Вузов. Машиностроение. - 1988.- № 6.- С. 110-113.
98. Логинов, Ю.Н. Исследование штамповки шаров из цилиндрических заготовок [Текст] / Ю.Н. Логинов, С.П. Буркин, Н.Ю. Луканихин // Известия Вузов. Черная металлургия. – 2001. – № 10. – С. 34-37.
99. Полищук, Е.Г. Система расчета пластического деформирования «Рапид» / Е.Г. Полищук, Д.С. Жиров, Р.А. Вайсбурд // Кузнечно-штамповочное производство. – 1997. – № 8. – С. 16-18.

100. Биба, Н.В. Эффективность применения моделирования для разработки технологии штамповки / Н.В. Биба, А.И. Лишний, С.А. Стебунов // Кузнечно-штамповочное производство. – 2001. – № 5. – С. 39-44.
101. Моделирование и расчет течения металла при штамповке на RUIG с использованием вычислительного комплекса SPLEN-S / Е.Н. Чумаченко, Л.Э. Рогалевич, М.Б. Свешников и др. // Кузнечно-штамповочное производство. – 2000. – № 4. – С. 37-42.
102. Томленов А.Д. В кн.: Пластическое деформирование металлов. – М.:Наука, 1974 – с. 5-14.
103. Резников, Ю.Д. Расчет формы и размеров заготовок в процессах объемной штамповки методом верхней оценки / Ю.Д. Резников // Известия вузов. Черная металлургия. – 1979. – №2. – С.64-70.
104. Смирнов-Аляев, Г.А. Сопротивление материалов пластическому деформированию/Г.А. Смирнов-Аляев. – Л: Машиностроение, 1978. – 368с.
105. Hill R. The Mathematical Theory of Plasticity. Oxford University Press (1950)
106. Rowe G.W. Principles of Industrial Metalworking. Edward Arnold, London (1977)
107. Jonson W. Kudo H. The Mechanics of Metal Extrusion, Manchester Univ.Press (1962)
108. Kudo H Soseigaku (Theory of Plasticity), Morikita Shuppan, Tokyo (1968) (J)
109. Колмогоров, В.Л. Численное моделирование больших пластических деформаций и разрушения металлов [Текст] / В.Л. Колмогоров // Кузнечно-штамповочное производство. – 2003 . – № 2. – С. 4-16.
110. Поздеев, А.А. К расчету усилий при прессовании прутков из алюминиевых сплавов. Цветная металлургия / А.А. Поздеев, И.Я. Тарногвский, Р.А. Вайсбурд, С.Н. Орлов – М: Машиностроение, 1962. – с. 145.
111. Джонсон, У. Механика процесса выдавливания металлов. Пер с англ. / У. Джонсон, Х. Кудо – М.: Металлургия, 1965 – 174 с.
112. Степанский, Л.Г. Пластическое течение металла при двухсторонней закрытой прошивке./ Л.Г. Степанский– Кузнечно-штамповочное производство – 1964 – №6 – с. 8.
113. Ландграф, Г. Напряженное состояние и деформирующее усилие при осесимметричной осадке цилиндра / Г. Ландграф, Г. Кирххюбель // Кузнечно-штамповочное производство – 1975 – № 11 – с 19-28.
114. Сегал, В.М. Технологические задачи теории пластичности / В.М. Сегал Минск: Наука и техника, 1977 – 254 с.

115. Степанский, Л.Г. Расчеты процессов обработки металлов давлением. / Л.Г. Степанский – М.Машиностроение, 1979 – 213 с.
116. Ильюшин, А.А. Деформация вязко-пластического тела / А.А.Ильюшин // Учен. зап. МГУ. Механика. – 1970. – вып.39. – С. 3-81.
117. Марков, А.А. О вариационных принципах в теории пластичности / А.А. Марков // ПММ. – 1947. – Т.2 – с.239-250.
118. Роботнов, Ю.Н. Основы механики деформируемого тела / Ю.Н.Роботнов. – М.: Наука, 1979. – 744 с.
119. Седов, Л.И. Механика сплошной среды: Т.1, 2. 4-е изд. / Л.И.Седов – М.: Наука, 1984. – 560с.
120. Крауч, С. Методы граничных элементов в механике твердого тела. / С. Крауч, А. Старфилд– М.:Мир. 1987 – 328 с.
121. Бреббия, К. Методы граничных элементов / К. Бреббия, Ж. Теллес, Л. Вроубел – М.: Мир 1987. – 524 с.
122. Аксенов, Л.Б. Прочность сложнопрофильного деформирующего инструмента / Л.Б. Аксенов, Л.В. Виноградов // Кузнечно - штамповочное производство – 1988. – №9 – С. 6-9.
123. Чер, Л., Применение математического моделирования процессов пластического деформирования при решении технологических задачи / Л. Чер, К.Шофмай // Кузнечно- штамповочное производство. – 1978. – №3. – С. 13-17.
124. Аксенов, Л.Б. Современные методы проектирования процессов горячей объемной штамповки: Учебное пособие / Л.Б. Аксенов, К.Н. Богоявленский – Л.: ЛИИ, 1982. – 74 с.
125. Keife H. A new technique for determination of preforms dosed die forging of axi-simmetrie products wenty/ H. Keife //Fifth International Machine Tool Desiq and search Conference, 22-24 April – 1985 Birmingham. – P 473-475
126. Osman F.H, Forqing and deform design using UBET / F.H. Osman, A.N. Bramley, M.I. Ghobrial //Advanced Technology of osicity - Vol.1. - Tomuo, 1984. – P.563 -568
127. Чернявский, А. О. Метод конечных элементов. Основы практического применения [Электронное ресурс] / А. О. Чернявский – 2003. – 106с.
128. Шимановский, А.О. Применение метода конечных элементов в решении задач прикладной механики / А.О. Шимановский, А.В. Пустято – Гомель. БГУТ. 2008. – 61с.

129. Зенкевич, О. Метод конечных элементов в технике. / О. Зенкевич – М.: Мир. 1975 – 541 с.
130. Степанский, Л.Г. Расчёты процессов обработки металлов давлением. / Л.Г. Степанский – М.: Машиностроение, 1979 – 215с.
131. Biba, N. Material forming simulation environment based on QForm 3D software system. / N. Biba, S. Stebunov, A. Vlasov //12th International Conference Metal Forming – 2008 – Vol. 2 – p. 611–616.
132. Borowikow, A. Simulation of Thermo-Mechanical Treatment in Industrial Manufacturing Processes. / A. Borowikow, D. Wehage, N. Biba // 10th International Conference on Technology of Plasticity. Aachen, Germany – 2011. – p. 826–831.
133. QForm 2D/3D Программа моделирования объемной штамповки. Учебное пособие./ ООО «КванторФорм». 2008. – 62 с.
134. Либер, В.С. Изотермическая штамповка заготовок деталей ГТД из труднодеформируемых жаропрочных сплавов. / В.С. Либер, А.В. Скругорев, Н.В. Моисеев, Д.А. Понаморенко // Сборник докладов международного научно-технического конгресса ОМД 2014. «Фундаментальные проблемы. Инновационные материалы и технологии» – 2014г. – с.193
135. Сосенушкин, Е.Н. Прогнозирование образования поверхностных дефектов фланцевой части поковок при горячей объемной штамповке. / М.В. Бильчук, Е.Н. Сосенушкин // Вестник МГТУ Станкин. – 2012. – № 4 (23). – С. 44-48.
136. Артес, А.Э. Применение безоблойной штамповки в разъемных и полузакрытых штампах. / А.Э. Артес, В.В. Третьюхин, М.В. Бильчук // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2012. – Т. 14. № 4-5. – С. 1199-1201.
137. Сосенушкин, Е.Н. Разработка инновационных технологий горячей объемной штамповки / А.М. Володин, В.А. Сорокин, Н.П. Петров, Е.Н. Сосенушкин, А.Э. Артес, В.В. Третьюхин // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. – 2010. – № 7. – С.11-15.