Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Липецкий государственный технический университет»

На правах рукописи

ТЕЛЕГИН ИГОРЬ ВИКТОРОВИЧ

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ГОРЯЧЕЙ ОБЪЕМНОЙ ШТАМПОВКИ КРУГЛЫХ В ПЛАНЕ ПОКОВОК НА КРИВОШИПНЫХ ПРЕССАХ

Специальность 05.02.09 – Технологии и машины обработки давлением

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
доктор технических наук, профессор
Володин Игорь Михайлович

Липецк 2017

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ 6

1. СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ 15

1.1. Технологические схемы изготовления круглых в плане поковок на кривошипных прессах ……..... 16

1.1.1. Вопросы классификации поковок 16

1.1.2. Оценка эффективности технологических схем штамповки 17

1.1.3. Традиционные схемы штамповки круглых в плане поковок и их совершенствование 20

1.2. Современные методы моделирования технологических процессов ГОШ 27

1.3. Динамические процессы в механизмах кривошипных прессов 31

1.4. Задачи исследования 37

2. АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ РЕАЛИЗАЦИИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ГОШ НА КГШП 39

2.1. Структура данных формы детали и чертёж поковки 40

2.2. Металлоёмкость технологического процесса ГОШ …..... 44

2.2.1. Исследование металлоёмкости операций отрезки и нагрева заготовок из сортового проката круглого сечения ……..... 45

2.2.2. Анализ влияния на металлоёмкость технологического процесса ГОШ геометрии поковок 52

2.3. Допускаемое усилие на ползуне пресса 57

2.4. Влияние точности заготовок на эффективность ГОШ 60

2.5. Исследование влияния технологического процесса ГОШ на динамику КГШП 64

2.5.1. Моделирование динамических процессов в механизмах КГШП 64

2.5.2. Оценка влияния технологического процесса ГОШ на динамику КГШП 74

2.5.3. Система компьютерного моделирования динамики КГШП 77
2.6. Выводы 80

3. РАЗРАБОТКА РЕСУРСОСБЕРЕГАЮЩЕЙ ТЕХНОЛОГИИ ШТАМПОВКИ КРУГЛЫХ В ПЛАНЕ ПОКОВОК НА КГШП 81
3.1. Технологические схемы ГОШ поковок с выступами, формируемыми на предварительном переходе 82
3.1.1. Моделирование процесса формирования на предварительном переходе выступов способом закрытой штамповки 83
3.1.2. Моделирование процесса формирования на предварительном переходе выступов способом открытой штамповки 84
3.1.3. Анализ результатов исследования различных схем штамповки круглой в плане поковки с формируемыми на предварительном переходе технологическими выступами 86
3.2. Расчётная модель геометрии выступа, формируемого на предварительном переходе ГОШ 89
3.3. Разработка методики расчёта геометрии гравюр штампов, предназначенных для реализации технологических процессов ГОШ с выступами на предварительном переходе..... 92
3.3.1. Проектирование геометрии поковки предварительного перехода из условия её бездефектной штамповки на окончательном переходе 93
3.3.2. Проектирование гравюр закрытых штампов предварительного перехода 96
3.3.3. Проектирование гравюр открытых штампов предварительного перехода 99
3.4. Автоматизация процесса расчёта геометрии гравюр штампов, формирующих выступы на поковках предварительного перехода 101
3.5. Экспериментальное исследование процессов ГОШ поковок с выступами, формируемыми на предварительном переходе 104

3.5.1. Исследование процесса изготовления круглой в плане поковки с формируемым в закрытом штампе предварительного перехода технологическим выступом 106
3.5.2. Исследование процесса изготовления круглой в плане поковки с формируемыми на предварительном переходе в открытом штампе технологическими выступами 109
3.6. Выводы 112

4. ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ПРИМЕНЕНИЯ МЕТОДИК ПРОЕКТИРОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СХЕМ ГОШ НА КГШП КРУГЛЫХ В ПЛАНЕ ПОКОВОК 114
4.1. Анализ эффективности традиционной технологической схемы ГОШ на КГШП поковки детали “Каретка синхронизатора” 115
4.1.1. Исследование металлоёмкости ГОШ на КГШП в зависимости от конфигурации поковки 115
4.1.2. Исследование влияния точности заготовки, применяемой для штамповки поковки, на эффективность технологического процесса ГОШ 118
4.1.3. Исследование эффективности технологического процесса ГОШ в зависимости от условий работы КГШП 121
4.2. Совершенствование традиционной технологической схемы ГОШ на КГШП поковки детали “Каретка синхронизатора” 125
4.2.1. Технологическая схема ГОШ с выступом на внешней стороне полуфабриката поковки, формируемым на предварительном переходе 126
4.2.2. Повышение эффективности технологической схемы ГОШ на КГШП с выступом на внешней стороне полуфабриката поковки, формируемым на предварительном переходе 129
4.2.3. Результаты внедрения усовершенствованной технологической схемы ГОШ на КГШП поковки детали “Каретка синхронизатора” 132

4.3. Разработка и исследование технологической схемы ГОШ на КГШП поковки детали “Каретка синхронизатора” в открытых штампах предварительного и окончательного переходов 134
4.3.1. Моделирование технологического процесса ГОШ на КГШП К8542 в открытых штампах предварительного и окончательного переходов 134
4.3.2. Исследование эффективности применения КГШП К8542 для ГОШ в открытых формообразующих штампах поковки детали “Каретка синхронизатора” 136
4.3.3. Экспериментальное исследование процесса изготовления поковки детали “Каретка синхронизатора” с выступами, формируемыми на предварительном переходе способом открытой штамповки 138
4.4. Разработка и исследование технологической схемы ГОШ на КГШП поковки детали “Каретка синхронизатора” в закрытом штампе предварительного и открытом штампе окончательного переходов 141
4.5. Анализ полученных результатов 146
4.6. Выводы 151

ЗАКЛЮЧЕНИЕ 153

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ 157

ПРИЛОЖЕНИЕ А 177
ПРИЛОЖЕНИЕ Б 179
ПРИЛОЖЕНИЕ В 181
ПРИЛОЖЕНИЕ Г 183
ПРИЛОЖЕНИЕ Д 185
ПРИЛОЖЕНИЕ Е 187
ПРИЛОЖЕНИЕ Ж 189
ПРИЛОЖЕНИЕ З 191

ВВЕДЕНИЕ

Горячая объёмная штамповка (ГОШ) является одним из основных технологических процессов производства поковок с высокими эксплуатационными свойствами для последующей, как правило, механической обработки.

При реализации ГОШ на кривошипных горячештамповочных прессах (КГШП) эффективность технологических процессов характеризуется рядом показателей, в числе которых коэффициенты использования металла, точности заготовки, поковки и другие (ГОСТ 18970-84). При разработке вариантов технологических схем ГОШ важен анализ геометрии детали, для изготовления которой предназначена поковка, определение её элементов, на которых можно достичь эффекта снижения металлоемкости проектируемого процесса.

Эффективность изготовления поковок, напрямую связанная с долговечностью дорогостоящих КГШП, во многом зависит, как от величины технологических сил, необходимых для пластической деформации поковок, так и интенсивности динамических процессов, возникающих в КГШП и являющихся одним из основных факторов, определяющих условия его работы. При сравнении различных технологических схем необходимо рассматривать возникающие при их реализации как статические, так и динамические нагрузки в прессе.

Созданная в России технологическая схема бесподпорной штамповки позволяет решить задачу снижения сил пластического деформирования, однако требует дальнейшего совершенствования, поскольку не всегда позволяет обеспечить формообразование поковки с уменьшенными радиусами закруглений наружных углов.

Диссертационная работа выполнялась в рамках гос. задания №11.9505.2017/БЧ на выполнение проекта по теме «Развитие теории и практики проектирования технологических процессов машиностроительных производств».

Степень разработанности. Теоретические основы теории ГОШ были заложены в трудах таких отечественных учёных как А.Н. Брюханов, О.А. Ганаго, В.Л. Колмогоров, А.Н. Леванов, А.Г. Овчинников, Я.М. Охрименко, А.А. Поздеев, М.В. Сторожев, Е.И. Семенов, И.Я. Тарновский и др.

Дальнейшее развитие их работ связано с исследованиями И.М. Володина, В.А. Голенкова, С.А. Головина, А.М. Дмитриева, Е.Н. Сосёнушкина, С.А. Стебунова, С.П. Яковлева и др.

Известное программное обеспечение для математического моделирования процессов обработки металлов давлением (QForm, компания ООО «КванторФорм», Россия) даёт возможность с высокой степенью достоверности моделировать процессы ГОШ, основываясь на данных о конфигурации формируемой поковки и других параметрах технологии и оборудования (материал, нагрев, смазка, силовые и кинематические параметры пресса). Есть возможность смоделировать процесс ГОШ на КГШП, но отсутствует комплексная методика оценки полученных результатов в зависимости от различных вариантов конфигурации поковок, сформированных на различных формообразующих переходах, а также влияния на эти результаты точности исходной заготовки.

Новые технологические схемы ГОШ, в частности, основанные на принципе бесподпорной штамповки, позволяют заметно снизить силы пластического деформирования, что в отдельных случаях даёт возможность использовать для выполнения операций штамповки КГШП с меньшим номинальным усилием. Однако применение таких схем приводит к трудностям формирования поковок с малыми наружными радиусами закруглений и, как следствие, снижению показателей металлоёмкости. Известен способ решения подобных проблем – формирование на предварительном переходе технологического выступа в проблемном месте с последующей деформацией его на окончательном переходе. Методы расчёта параметров, определяющих конфигурацию подобных выступов, неизвестны.

Другая проблема появляется при переводе процесса ГОШ на КГШП с меньшим номинальным усилием. В этом случае значения сил штамповки, как правило, оказываются в опасной близости к предельным, определяемым графиком допустимых усилий на ползуне кривошипного пресса, а вследствие динамических процессов, и превышать их. Анализу динамики кривошипных прессов посвящены работы А.В. Власова, В.И. Власова, Е.Н. Ланского, Ю.А. Миропольско-

го, Г.А. Навроцкого и др. Для более точной оценки динамических сил, возникающих в элементах КГШП при выполнении операций ГОШ, осуществляемых преимущественно в конце рабочего хода ползуна пресса, требуется усовершенствование методик расчёта его динамики, связанное с одновременным учётом крутильных, изгибных и деформаций растяжения-сжатия деталей пресса. Работы, посвящённые исследованию эффективности технологической схемы ГОШ в зависимости от уровня динамических процессов в КГШП, неизвестны.

Цель работы. Повышение эффективности процессов горячей объёмной штамповки круглых в плане поковок путем увеличения коэффициента использования металла и улучшения условий работы КГШП, на основе научно обоснованного выбора геометрических параметров, определяющих конфигурации технологических переходов.

Задачи исследования:

1. Определить систему показателей эффективности ГОШ для оценки различных вариантов технологических схем штамповки.

2. Установить зависимости для исследования влияния на коэффициент использования металла данных о минимальном объёме поковки, способах отрезки и нагрева заготовки, диаметра и точности сортового проката круглого сечения, из которого заготовка изготовляется.

3. Установить зависимости для исследования влияния на коэффициент точности поковки значений припусков, напусков, допусков, и радиусов закруглений наружных углов поковки, назначенных на основе геометрии детали, получаемой из поковки.

4. Определить показатель, определяющий возможность реализации разработанной технологической схемы ГОШ на КГШП, и зависимости для его расчета.

5. Разработать методику расчёта динамических и статических процессов, протекающих в КГШП, позволяющую учесть особенности, связанные с выполнением операций ГОШ, и исследовать влияние технологической схемы ГОШ на динамические процессы и статические нагрузки в деталях пресса.

6. Разработать методику расчёта геометрических параметров штампа, реализующего бесподпорную технологию ГОШ с уменьшенными радиусами закругления наружных углов поковки и сниженными технологическими нагрузками за счёт формирования на предварительном переходе выступов на торцевых поверхностях полуфабриката поковки.

7. Разработать и исследовать новые высокоэффективные технологические схемы штамповки поковки детали каретки синхронизатора 2-ой и 3-ей передачи автомобиля «КАМАЗ».

Объект исследования. Операции открытой и закрытой горячей объёмной штамповки круглых в плане поковок, реализуемые на КГШП.

Предмет исследования. Влияние геометрических параметров заготовки, полуфабриката поковки, полученной на предварительном переходе и готовой поковки, сформированной на окончательном переходе, на эффективность процесса ГОШ на КГШП.

Научная новизна работы:

1. Получены зависимости для расчёта металлоёмкости ГОШ на КГШП круглой в плане поковки, при изменении геометрических параметров ручьёв штампов формообразующих переходов, способа отрезки и нагрева заготовки, диаметра и точности сортового проката круглого сечения из которого изготавливается заготовка.

2. Разработана система уравнений для расчета динамических сил в элементах КГШП с учетом изгибающих и крутильных колебаний в главном вале пресса, упругих деформаций станины, шатуна и ползуна, а также зазоров в кинематических парах при одиночном и автоматическом режимах работы пресса.

3. Определены уравнения образующей углового элемента гравюры штампа предварительного перехода, формирующей технологический выступ с целью уменьшения наружных радиусов закруглений поковки на окончательном переходе без увеличения технологической силы ГОШ.

Практическая значимость работы состоит в возможности применения полученных результатов при проектировании технологических процессов ГОШ на КГШП круглых в плане поковок, отличающихся высоким коэффициентом использования металла, коэффициентом точности поковки, низкими значениями технологических сил на окончательном переходе, улучшенными условиями работы кривошипного пресса. Конкретно:

1. В разработке методики расчёта коэффициента использования металла и выбора на его основе рациональных параметров сортового проката, способов отрезки и нагрева заготовки.

2. В разработке методики расчёта коэффициента точности поковки на основе геометрии детали, и выбора наиболее эффективной схемы штамповки.

3. В полученной зависимости, позволяющей рассчитать коэффициент, определяющий возможность реализации разработанной технологической схемы ГОШ на КГШП.

4. В разработке новых высокоэффективных технологических схем ГОШ на КГШП, позволяющих за счёт формирования выступов на торцевых гранях поковок сформировать на окончательном переходе поковки с минимальными радиусами закруглений наружных углов, уменьшенными припусками на механическую обработку при снижении технологической силы штамповки.

5. В разработке методики оценки влияния варианта технологической схемы ГОШ на уровень динамических нагрузок и условия эксплуатации КГШП.

Соответствие диссертации паспорту научной специальности. Работа соответствует формуле специальности 05.02.09 «Технологии и машины обработки давлением». В работе исследуются и разрабатываются технологии горячей объемной штамповки круглых в плане поковок на КГШП, что соответствует пункту 3 паспорта специальности 05.02.09.

Методы исследования. Исследование процесса ГОШ выполнены на основе теории пластического деформирования методом МКЭ в программе QForm. Исследование динамики кривошипного пресса проводились на основе его многомас-

совой модели, разработанной автором для расчёта колебательных процессов во всех элементах пресса, возникающие при деформациях растяжения-сжатия, изгиба и кручения. При проведении экспериментальных исследований использовались методы физического моделирования.

Результаты, выносимые на защиту:

1. Система показателей эффективности ГОШ для оценки различных вариантов технологических схем штамповки.

2. Установленные зависимости, позволяющие рассчитать коэффициент использования металла на основании данных о минимальном объёме поковки, способах отрезки и нагрева заготовки, диаметра и точности сортового проката круглого сечения, из которого заготовка изготовляется.

3. Установленные зависимости, позволяющие рассчитать коэффициент точности поковки на основании данных о значениях припусков, напусков, допусков, и радиусов закруглений наружных углов поковки, назначенных на основе геометрии детали, получаемой из поковки.

4. Установленная зависимость, позволяющая рассчитать коэффициент, определяющий возможность реализации разработанной технологической схемы ГОШ на КГШП.

5. Методика, позволяющая оценить условия работы КГШП при выполнении операции ГОШ на основе расчёта изгибающих и крутильных колебаний в главном вале пресса, упругих деформаций станины, шатуна и ползуна КГШП.

6. Разработанная методика расчёта геометрических параметров штампа, реализующего бесподпорную технологию ГОШ с уменьшенными радиусами закругления наружных углов поковки и сниженными технологическими нагрузками за счёт формирования на предварительном переходе выступов на торцевых поверхностях полуфабриката поковки.

7. Новые высокоэффективные технологические схемы ГОШ на КГШП поковки детали каретка синхронизатора 2-ой и 3-ей передачи автомобиля «КАМАЗ» с уменьшенными припусками на механическую обработку и сниженными технологическими силами штамповки.

Достоверность результатов обеспечивается:

1. Использованием современных методов компьютерного и физического моделирования.

2. Сходимостью результатов, полученных теоретически и экспериментально.

3. Апробацией новой технологической схемы, разработанной на основе методик автора, в производственных условиях.

Реализация работы.

1. Полученные результаты, принятые к использованию КЗ ПАО «КАМАЗ»:

- описание способов проектирования технологических переходов горячей объёмной штамповки круглых в плане поковок;
- описание способов расчёта показателей эффективности технологической схемы ГОШ;
- примеры проектирования технологических переходов (поковка детали «Каретка синхронизатора 2-ой и 3-ей передачи»);
- программа для ЭВМ, позволяющая автоматизировать процесс вычислений при проектировании гравюр штампов предварительного перехода в соответствии с данной методикой.

2. Полученные результаты, внедрённые в учебный процесс кафедры «Оборудование и процессы машиностроительных производств» ФГОБУ ВО «Липецкий государственный технический университет». Специальность «Машины и технологии процессов ОМД» (курсовое проектирование, дипломное проектирование и СНИР):

- система показателей эффективности для оценки различных вариантов технологических схем штамповки;
- модель для исследования на ЭВМ ресурсов снижения металлоёмкости технологического процесса ГОШ на КГШП круглой в плане поковки на основе геометрии изготавливаемой из неё механической обработкой детали;
- модель для исследования на ЭВМ точности изготовления заготовки и исследования её влияния на эффективность процесса ГОШ;

- модель для исследования на ЭВМ влияния технологической схемы ГОШ на динамические процессы и статические нагрузки в деталях КГШП;
- модель для расчёта на ЭВМ геометрических параметров технологических схем горячей объёмной штамповки, позволяющих при снижении сил пластического деформирования на окончательном переходе, изготовить поковки с минимальными значениями радиусов закругления наружных углов и уменьшенными припусками на механическую обработку.

Апробация работы. Основные положения и результаты работы доложены и обсуждены на международной научно-практической конференции «Общество, современная наука и образование: проблемы и перспективы», Тамбов 2012; на VIII Міжнар. наук.-практ. конф., «Наукові дослідження в технічних галузях», Дніпропетровськ 2013; на IV Международной научно-практической конференции «Современные тенденции развития науки и технологий», Белгород 2015; на международной конференции «Современная металлургия нового тысячелетия», ЛГТУ, г. Липецк 2015; на международной научно-практической конференции «Инновационные технологии развития», Тюмень 2016; на IV Международной научно-практической конференция "Современные проблемы развития фундаментальных и прикладных наук", Praha, Czech Republic 2016; на 6-ой Международной научно-практической конференции «Современные тенденции развития науки и технологий», Курск 2016; на 3-й Международной молодежной научно-технической конференции «Прогрессивные технологии и процессы», Курск 2016; на IV Международной научно-практической конференции «Современные тенденции развития науки и производства: сборник материалов», Кемерово 2016; на международной научно-технической конференции «Проблемы и перспективы развития машиностроения», Липецк 2016; на областном фестивале НТТМ – Диплом 1 степени, Липецк, 2014; на XIV Всероссийской выставке НТТМ, 2014, Москва; на областном конкурсе «Инженер года - 2016» (диплом победителя в категории «Профессиональные инженеры», номинация «Машиностроение и металлообработка»), Липецк, 2016.

Публикации. Основное содержание диссертации опубликовано в 25 работах, из которых 6 статей из Перечня ВАК РФ, 2 в престижных зарубежных изданиях, 2 статьи в других изданиях, 3 зарегистрированные программы для ЭВМ, 10 докладов на международных конференциях.

Структура и объём диссертации. Диссертация содержит введение, четыре главы, заключение, список используемой литературы и приложения. Общий объём диссертации 194 с., в том числе 155 с. основного текста, 110 рисунков, 11 таблиц, список литературы из 199 наименований, 8 приложений на 18 страницах.

1. СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ

Одним из основных требований, предъявляемым к изделиям современного производства Российской Федерации является их конкурентоспособность. Другими словами, процесс изготовления изделия должен быть высокопроизводителен, требовать минимума потребления энергии и материалов. Готовое изделие должно отвечать требованиям работоспособности, надёжности и долговечности.

Данная работа посвящена производству изделий (поковок) способом горячей объёмной штамповки (ГОШ), широко применяемых в серийном и массовом производстве.

В последние десятилетия в России и в развитых зарубежных странах для осуществления процессов ГОШ используют кривошипные горячештамповочные прессы (КГШП). Объясняется это с тем, что, несмотря на высокую стоимость, например, в сравнении с молотами, реализация на КГШП процессов ГОШ проще поддаётся автоматизации, оказывается более высокопроизводительной, например, в сравнении с гидравлическими прессами, а также требует меньших затрат металла.

Процесс пластического деформирования металлов, к числу которых относится горячая объёмная штамповка, теоретически очень сложен. Начало развития его теории можно отнести к началу 19-го века. Однако окончательно основы математической теории пластичности были разработаны только к середине 20-го века в трудах целого ряда как отечественных [1 – 14], так и зарубежных [15 – 18] учёных.

В настоящее время развитие теории пластического деформирования металлов, в частности применительно к процессам кузнечно-прессового производства, в том числе и ГОШ, связано с трудами таких известных учёных как Семёнов Е.И. [19, 20], Сосёнушкин Е.Н. [21– 24], Колмогоров В.Л. [25 – 28], Дмитриев А.М. [29], Голенков В.А. [30], Яковлев С.П. [31, 32] и многих других [33 – 45 и др.].

1.1. Технологические схемы горячей объёмной штамповки круглых в плане поковок на кривошипных прессах

1.1.1. Вопросы классификации поковок

Известно несколько схем классификации поковок [14, 19, 35], наибольшее распространение среди которых получила классификация, приведённая в работах [19, 46]. Согласно ей все поковки, в зависимости от конфигурации, делятся на пять групп, каждая из которых в своём составе имеет по три подгруппы. Поковки круглые в плане относятся, согласно данной классификации, к первой группе, представляющей собой тело вращения с осью, совпадающей с направлением движения деформирующего инструмента (или ползуна пресса).

Кроме указанных в работах [14, 19, 35, 46] классификаций форм поковок, существуют и другие способы представления информации не только о форме, но и размерах поковок [47, 48, 49], связанных с именами таких учёных, как А.В. Ребельский, К.С. Гинзборг, и М.Н. Дну, М.Э Гуревич, О. Крузе, С. Моргенштернц (Германия), В.А. Найт (Англия) А. Шамуа (Франция), Е.Н. Сосёнушкин, Г.П. Тетерин и П.И. Полухин (Россия), созданные специально для решения конкретных задач автоматизации проектирования технологических процессов штамповки или разработки инструмента (штампов). Однако, в силу разнообразия форм поковок, абсолютных величин размеров и их соотношений, построение однозначных зависимостей, связывающих параметры детали, поковки и варианта оптимальной технологической схемы штамповки – в общем виде не представляется возможным.

В основе задачи исследования технологической схемы ГОШ на КГШП круглой в плане поковки, которой посвящена данная работа, лежат форма и размеры детали, которая не обязательно является телом вращения, например, шестерня. При этом в качестве исходных данных предлагается рассматривать форму детали (не поковки), упрощённую до набора тел вращения, а также структуру числовых параметров, определяющих размеры и взаимное расположение этих тел. По мнению автора, такой подход актуален при решении задач исследования ГОШ

на КГШП поковок первой группы [19, 46] при его применении совместно с методикой обработки указанной структуры числовых параметров, позволит спрогнозировать массу поковки, исследовать абсолютные и относительные её потери при формировании отдельных элементов поковки, определить соотношение геометрических размеров, для которых выполняются исследования.

1.1.2. Оценка эффективности технологических схем штамповки

Для сравнительной оценки любых систем [50, 51], включая технологические процессы изготовления изделий [52, 53, 54], используют термин эффективность, под которым понимается результат выполнения операции (или операций), в рамках исследуемой системы, направленной на достижение определённой цели (или целей) с учётом затрат ресурсов и времени. Для количественного определения эффективности используют термины показатели и критерии эффективности.

Показатели эффективности применяют для количественного измерения результатов, получаемых вследствие принятия тех или иных решений. В задачах исследования технологических процессов ГОШ на КГШП, рассматриваемых в данной работе, это могут быть, например, изменения массы поковки, работы и сил её пластического деформирования, полученные в результате изменений в конструкциях штампов, технологических схемах штамповки, смазки, параметров заготовки и других факторов.

Критерий эффективности это один из показателей, иногда нескольких, связанных определённой зависимостью, на основании которого делается выбор приемлемого варианта решения, окончательного или промежуточного, из множества возможных.

Основными показателями эффективности технологических схем ГОШ на КГШП поковок, в том числе и круглых в плане, являются:

- металлоёмкость технологического процесса;
- технологическое усилие штамповки;
- условия работы кривошипного пресса.

Актуальность задачи снижения металлоёмкости технологических процессов изготовления изделий машиностроения не вызывает сомнения [55, 56, 57].

Общее определение металлоёмкости изделий машиностроения дано в ГОСТ 27782-88 [58], согласно которому металлоёмкость изделия определяется как общий расход металла, необходимого для производства и технической эксплуатации изделия. Конкретно, для изделий машиностроения, производство которых осуществляется методами обработки металлов давлением (ОМД) ГОСТ 18970-84 (изменения № 344 от 29.03.91) [59] дополнительно вводит следующие показатели эффективности использования металла (применительно для ГОШ):

- коэффициент использования металла ($К_И$) – отношение массы детали к норме расхода материала на одну деталь;
- коэффициент раскроя ($К_Р$) – отношение массы заготовок к массе материала, используемого для их изготовления;
- коэффициент точности заготовки ($К_З$) – отношение массы поковок, изготовленной из одной заготовки, к массе заготовки;
- коэффициент точности поковки ($К_П$) – отношение массы деталей, изготовленной из одной поковки, к массе поковки;
- коэффициент выхода годных поковок ($К_Г$) – отношение массы поковки к норме расхода металла на детали, изготовленные из одной поковки;

Очевидно, что данные показатели предназначены, в первую очередь, для исследования эффективности системы, которую можно определить как производственный процесс штамповки поковок, осуществляемый на предприятии в целом, или отдельном его цехе.

Для решения задачи исследования металлоёмкости конкретной технологической схемы, когда требуется изучение причин потерь металла на различных этапах изготовления поковки, включая её пластическое формообразование при заполнении гравюр штамповых вставок даже в рамках одного технологического перехода, требуется иная система показателей эффективности. При этом, как представляется автору, важна связь показателей эффективности, определяющих

металлоёмкость технологического процесса ГОШ на КГШП с формой и размерами детали, для изготовления которой предназначена поковка.

Известно, что заполнение гравюр штамповых вставок при формировании поковок часто заканчивается уже после частичного образования облоя или, при закрытой штамповке, полости компенсатора. Это требует дополнительного увеличения массы заготовки [46], которая в принципе не является постоянной величиной и в дополнении к сказанному зависит ещё от точности изготовления сортового проката, способов отрезки и нагрева заготовки [20, 55, 60]. В связи с этим одной из задач, требующих решения при разработке системы показателей эффективности, определяющих металлоёмкость технологического процесса ГОШ, являются исследования влияния точности изготовления заготовки из сортового проката на эффективность процесса ГОШ на КГШП.

Вторая группа показателей эффективности устанавливает связь параметров технологической схемы штамповки с технологическим усилием штамповки. В настоящее время вместо аналитических формул расчёта усилия штамповки [9, 12, 61, 62] применяются численные методы, реализуемые в программах специального назначения [63, 64]. Наиболее известными среди таких программных продуктов являются QForm (ООО «КванторФорм» – Россия) [65 – 68], DEFORM^{TM}-3D (SFTS – США) [69 - 72] и ряд других: MSC/Superforqe (MSC – США), FORGE (TRANVALOR – Франция).

Рис. 1.1. Снижение стоимости процессов ГОШ при использовании КГШП с меньшим технологическим усилием

Точный расчёт технологического усилия штамповки и повышение эффективности ГОШ на КГШП актуально не только в связи с увеличением сроков службы штампов, штамповочного оборудования, но и с экономической точки зрения.

На рис. 1.1 приведена диаграмма [46], подтверждающая возможное снижение себестоимости ГОШ на КГШП за счёт использования более дешёвых прессов с меньшим номинальным усилием при замене традиционных технологий ГОШ на новые, требующие для штамповки меньших технологических усилий.

Третья группа показателей связана с условиями работы КГШП. Одним из основных условий, определяющих возможность применения КГШП для выполнения им технологической операции штамповки, не превышение текущего значения технологического усилия некоторого критического, заданного предприятием изготовителем в виде графика допускаемого усилия на ползуне пресса в зависимости от угла поворота его главного вала [73 – 75]. Однако, учитывая достаточно высокую скорость работы КГШП, десятки ходов в минуту и большие массы его подвижных частей, неизбежно развитие в системах пресса динамических процессов, снижающие эксплуатационные характеристики оборудования [76 – 79].

Вторая и третья группы показателей эффективности ГОШ на КГШП отражают статические и динамические усилия, возникающие в элементах системы штамп – пресс. Задачи их математической формулировки и разработки методик расчёта актуальны и являются одной из тем исследований диссертации.

1.1.3. Традиционные схемы штамповки круглых в плане поковок и их совершенствование

Согласно рекомендациям, приведённых в работах [14, 19], для формирования круглых в плане поковок из предварительно осаженной заготовки применяют:

- для поковок подгруппы **1*а*** один формообразующий (окончательный) переход;
- для поковок подгруппы **1*б*** два формообразующих перехода (предварительный и окончательный);

- для поковок подгруппы **1*в*** два или три формообразующих перехода (два предварительных и один окончательный).

Достаточно распространены технологические схемы, в которых осадка выполняется не в плоских, а специальных формовочных ручьях [19, 20, 46].

Штамповка поковок первой группы может выполняться как в открытых, так и закрытых штампах. Формирование поковки осуществляется, как правило, или преимущественно осадкой, или с преобладанием выдавливания [14, 19].

На рисунке 1.2 приведен пример открытой штамповки поковки детали “Шестерня привода” [80, Черт. 14 и 15] группы 1*а*.

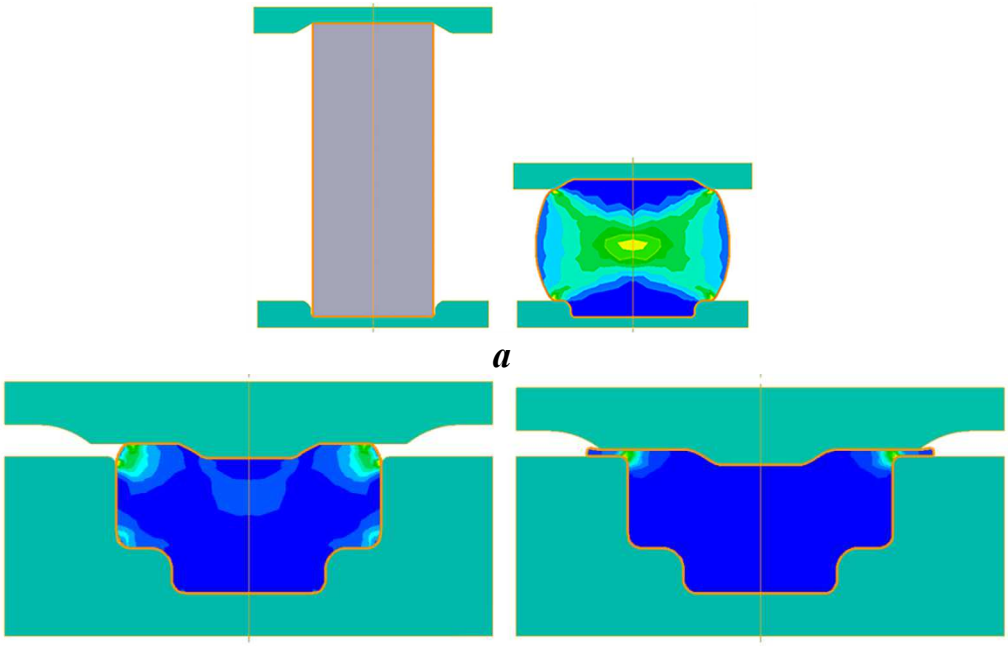
а ***б*** ***в***

Рисунок 1.2 – 3D-модели детали “Шестерня приводная” (***а***)
и её готовых поковок до обрезки облоя (***б***) и после обрезки облоя (***в***)

Рассмотрим несколько вариантов изготовления поковки детали “Шестерня привода” (см. рисунок 1.2*в*). Их разработка выполнена на базе традиционных теоретических методов проектирования технологических процессов ГОШ на КГШП [14, 19, 20, 34, 35, 80]. Моделирование осуществлено в программе QForm.

1. Классический вариант изготовления поковки из заготовки, диаметр которой практически совпадает с минимальным диаметром поковки (см. рисунок 1.3). Однако для данной конкретной поковки отношение высоты заготовки к её диаметру оказалось равным 2.4, что близко к максимально допускаемому значению 2.5 [20, 55]. Для осадки, в данном случае, применены специальные формовочные ручьи. Технологическое усилие, с учётом образования облоя – 3.4 МН. Причём

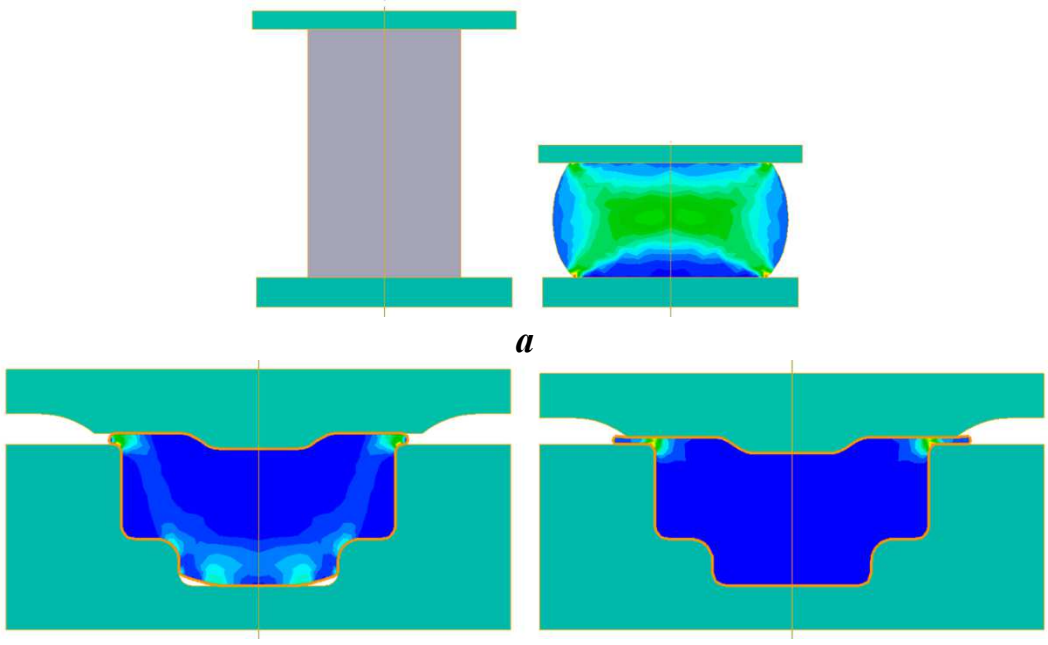
для формирования самой поковки (см. рисунок 1.3*б*) технологическое усилие штамповки составило 1.56 МН.



а

б ***в***

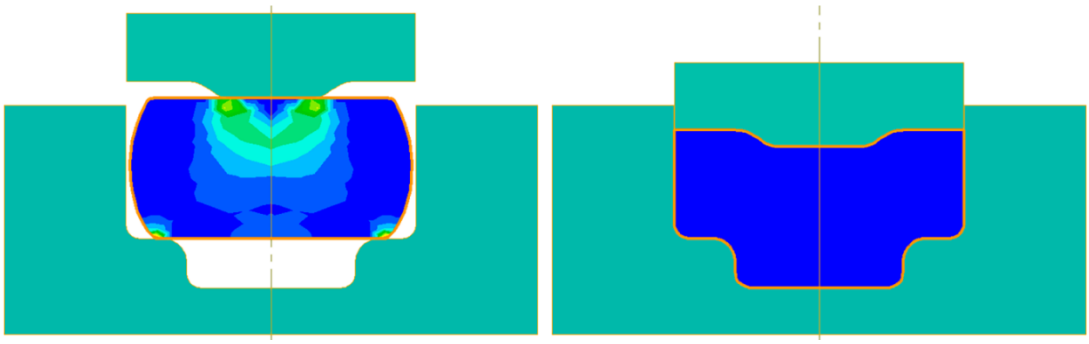
Рисунок 1.3 – Открытая штамповка поковки детали “Шестерня приводная”: а – осадка; б – окончательные переход, штамповочные радиусы сформированы; в – окончательные переход, завершение операции штамповки



а

б ***в***

Рисунок 1.4 – Открытая штамповка поковки детали “Шестерня приводная”: ***а*** – осадка; ***б*** – окончательные переход, штамповочные радиусы сформированы; ***в*** – окончательные переход, завершение операции штамповки



а ***б***

Рисунок 1.5 – Закрытая штамповка поковки детали “Шестерня приводная”:

а – окончательные переход, начало операции штамповки;

б – окончательные переход, завершение операции штамповки

Вариант №1 можно рассматривать как близкий к идеальному, но не всегда реализуемый, по крайне мере, за один штамповочный переход. Так, например, в данном случае, даже незначительное уменьшение диаметра нижней цилиндрической части поковки, или увеличений объёма её верхней цилиндрической части, не позволило бы изготовить заготовку, пригодную для осадки.

2. Осаженная в плоских ручьях заготовка (см. рисунок 1.4*а*) при её размещении в матрице окончательного ручья, центрируется по большему диаметру (см. рисунок 1.5*а*). В этом, более распространённом случае, формирование поковки оказывается ещё не закончено при начале образования облоя (см. рисунок 1.4*б*). В результате для получения окончательно сформированной поковки (см. рисунок 1.4*в*) требуется заготовка большей массы. Технологическое усилие штамповки 3.8 МН. Его значение, как и при реализации 1-го варианта, определяется геометрическими параметрами облойной канавки [55] и, в некоторой степени увеличивается при увеличении массы заготовки.

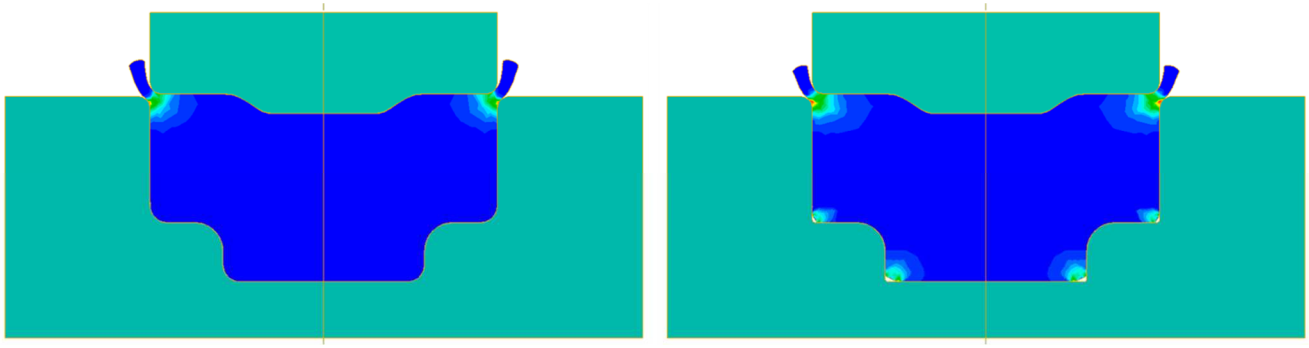
3. Осаженная в плоских ручьях заготовка (см. рисунок 1.4*а*), формируется в поковку в закрытом штампе (рисунок 1.5). Если объём заготовки точно совпадает с объёмом поковки, то готовая поковка полностью формируется при технологическом усилии равном 2.5 МН. На практике изготовление “точной” заготовки вряд ли возможно. Даже небольшое увеличение объёма заготовки от расчётного ведёт к резкому росту технологического усилия. В тоже время путём применения спе-

циальных компенсаторов [81] в конструкциях закрытых штампах, а при небольших массах поковок за счёт упругих деформаций элементов пресса, данная технологическая схема находит практическое применение.

Анализ рассмотренных технологических схем штамповки (см. рисунки 1.3 – 1.5) и литературных источников [81 – 89], позволяет определить направления совершенствования технологических схем ГОШ на КГШП, которые могут быть сформированы в виде системы из тринадцати принципов проектирования процессов ГОШ, сформированных И.М. Володиным [82, 83]. В рамках задач исследования, решению которых посвящена данная работа, обозначим лишь некоторые из них:

- принцип отложенной корректировки;
- принцип поэлементной штамповки;
- принцип расположения поковки преимущественно в одной половине штампа;
- принцип свободных поверхностей;
- принцип бесподпорной штамповки;
- принцип совмещения операций.

На рисунке 1.6 показаны результаты применения принципов ГОШ, определяющих пути её совершенствования. В частности принцип бесподпорной штамповки.



а ***б***

Рисунок 1.6 – Применение принципа бесподпорной штамповки для совершенствования процесса изготовления поковки детали “Шестерня приводная”:

а – совершенствование традиционной технологии;

б – попытка уменьшить штамповочные радиусы

В качестве базовой, использовалась технологическая схема ГОШ, показанная на рисунке 1.4. Результат – снижение технологического усилия с 3.8 МН до 2.1 МН. Следующий шаг, снижение массы поковки за счёт уменьшения штамповочных радиусов и, соответственно припусков на механическую обработку боковых и торцевых поверхностей поковки. На рисунке 1.6*б* приведены результаты этой попытки, к сожалению, неудачные. Задача создания методики проектирования и расчёта технологических схем ГОШ на КГШП, позволяющей снизить массу поковок за счёт уменьшения значений штамповочных радиусов, очевидно актуальна, и её решению посвящена значительная часть данной работы.

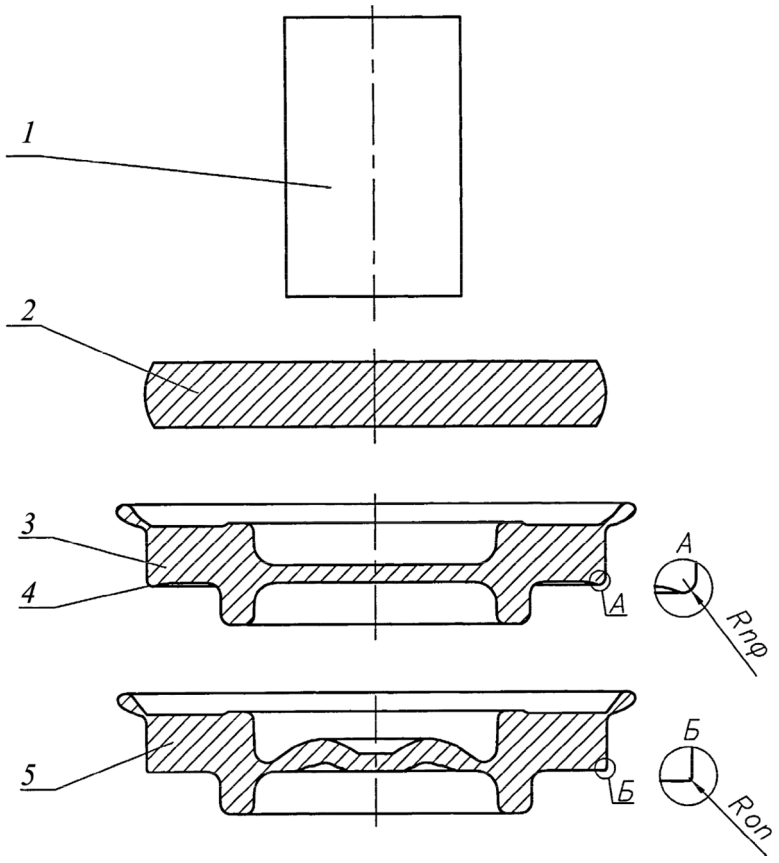
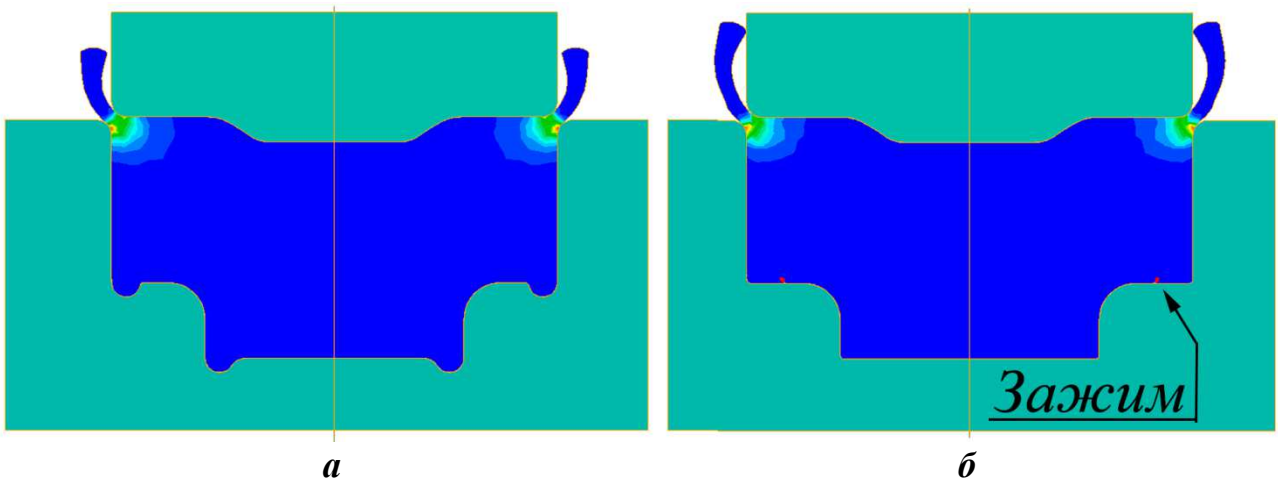


Рисунок 1.7 – Технологические переходы штамповки (Патент РФ № 2275271): 1 и 2 – исходная и осаженная заготовка, 3 – поковка после предварительного перехода, 4 – выступ, 5 – поковка после окончательного перехода

На рисунке 1.7 представлена технологическая схема [86], позволяющая уменьшить значение радиуса скругления *Ron*, сформированного на окончатель-

ном переходе. Данный результат – следствие формирования на предварительном переходе выступа радиусом *Rnф* (*Rnф* ≥ *Ron*).



а ***б***

Рисунок 1.8 – Технологические переходы штамповки детали “Шестерня приводная” с формированием выступов на предварительном переходе: предварительный (***а***) и окончательный (***б***) переходы

На рисунке 1.8 показаны результаты варианта моделирования штамповки поковки детали “Шестерня приводная” в два перехода, с двумя выступами, формируемыми на предварительном переходе. Радиус выступа *Rnф* принят равным 2 мм, радиусы сопряжений 0.5 и 2 мм. Высота заготовки увеличена в сравнении с предыдущим вариантом (см. рисунок 1.6) на 2 мм с целью гарантированного заполнения гравюр штампа, формирующих выступы на предварительном переходе, и формирования облоя. Технологические усилия на обоих переходах и данного варианта штамповки и предыдущего примерно одинаковы, поскольку их значение определяет геометрические размеры элементов, формирующих облой.

Как следует из рисунка 1.8, результаты штамповки зависят от геометрии выступов, определяющей их форму и размеры. Таким образом, идея, заложенная в патенте [86], на взгляд автора данной работы, достаточно продуктивна, но требует выполнения специальных исследований, связанных с созданием отсутствующей в настоящее время методики расчёта геометрических параметров выступов и особенностями проектирования соответствующих технологических схем ГОШ.

1.2. Современные методы моделирования технологических процессов ГОШ

Традиционные методы разработки технологических процессов ГОШ (см. раздел 1.1.3), построены на основе зависимостей, полученных аналитически и уточнённых экспериментально [3, 4, 9, 12, 14, 45, 61, 62 и др.], или полностью построенных на основе экспериментальных данных [47, 48], например, с помощью методов планирования эксперимента [90, 91].

В основе современных способов разработки технологических процессов горячей объёмной штамповки лежат методы конечных элементов (МКЭ) [92 – 95], реализованные в виде программ специального назначения [65 – 72, 96 – 100], реализуемых на ЭВМ. Здесь под термином МКЭ понимается не только традиционный метод конечных элементов, но и другие методы дискретного анализа. В настоящее время наибольшее распространение для исследования процессов ГОШ получили программы QForm (ООО «КванторФорм» – Россия) [65 – 68]. Достаточно широкое применение находит мощный и более универсальный программный комплекс DEFORMTM-3D (SFTS – США) [69 - 72]. Кроме QForm, среди российских программных разработок следует упомянуть и такие программы, как РАПИД [97, 98], Forming [96], SPLEN-S [99], применение которых известно в производстве и научных исследованиях [88, 101]. В данной работе моделирование процессов ГОШ на КГШП выполнялось в программе QForm 8.06, лицензией на использование которой обладает Липецкий государственный технический университет (ЛГТУ), предприятии в котором выполнена диссертация.

Теоретической основой решения задач, связанных с моделированием процессов деформации металлов, служат основные положения механики сплошной среды и теории пластичности [8, 26, 27, 45, 102, 103]. С математической точки зрения в общем случае требуется решить краевую задачу из 29 дифференциальных уравнений в частных производных. Результат решения – значения напряжений и деформаций в каждой точке тела при его формоизменении. Существуют следующие проблемы:

- огромный объём вычислений, реализация которых даже при использовании современных методов вычислительной математики на современных ЭВМ требует значительных временных ресурсов;
- не всегда точно известные значения свойств сплошной среды, например, связанные между собой температура, скорость деформации и предел текучести (σ_s), а также непостоянство этих свойств;
- граничные условия, определяемые как геометрическими параметрами, например, штамповочных ручьёв, так и рядом других свойств, например, свойствами смазки, шероховатостью поверхности инструмента.

Способ решения – упрощение объекта исследования, переход от реального объекта к его модели или нескольким моделям разной сложности. В программе QForm это может быть 3D, 2D осесимметричная и 2D плоская задача.

Для решения 2D осесимметричных задач, связанных с исследованием процессов ГОШ круглых в плане осесимметричных поковок, нет необходимости в применении 3D-моделей, что резко сокращает объём и время вычислений, а также упрощает подготовку исходных данных, без снижения точности модели.

Свойства сплошной среды – это свойства стали, в первую очередь величина сопротивления деформации при различной степени деформации и температуры, а также плотность, теплопроводность и теплоёмкость, необходимые для расчёта изменения температуры в каждой точке поковки при её охлаждении.

Эти значения для многих марок материала хранятся в базах данных QForm, доступны и, при необходимости, могут быть изменены (см. рисунок 1.9).

При высокой стоимости штамповой оснастки и, соответственно, более высоких требованиях к точности результатов моделирования, разработчики QForm предлагают свойства стали, используемой для изготовления поковок, определять экспериментально. Соответствующие рекомендации и методики в руководстве пользователя QForm [75] и работах [12, 104 – 108].

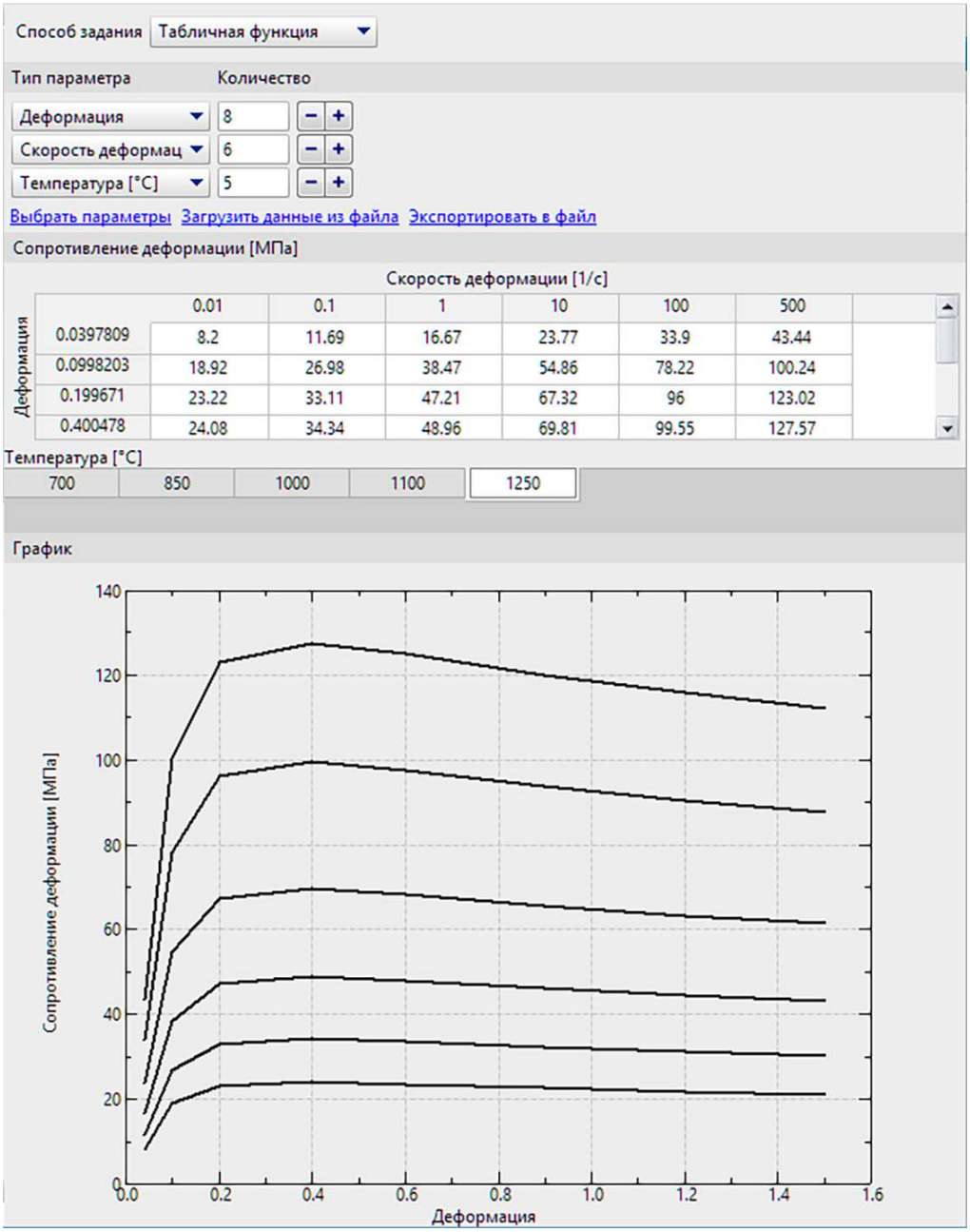


Рисунок 1.9 – Кривые упрочнения стали марки 50ХГ при температуре 1250°С

Граничные условия – это, в первую очередь, параметры трения, которые могут быть установлены в соответствии с законами Леванова, Зибеля, Кулона или другим способом (см. рисунок 1.10). В работах [65, 105, 109, 110] предлагается методика определения параметров трения для отсутствующей в базе QForm смазки, или уточнения существующей.

Очевидно, что неточные значения, определяющие параметры материала и граничных условий, могут привести к искажениям результатов моделирования.

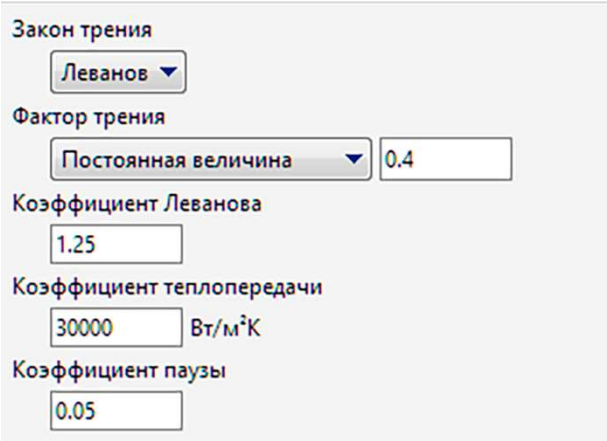
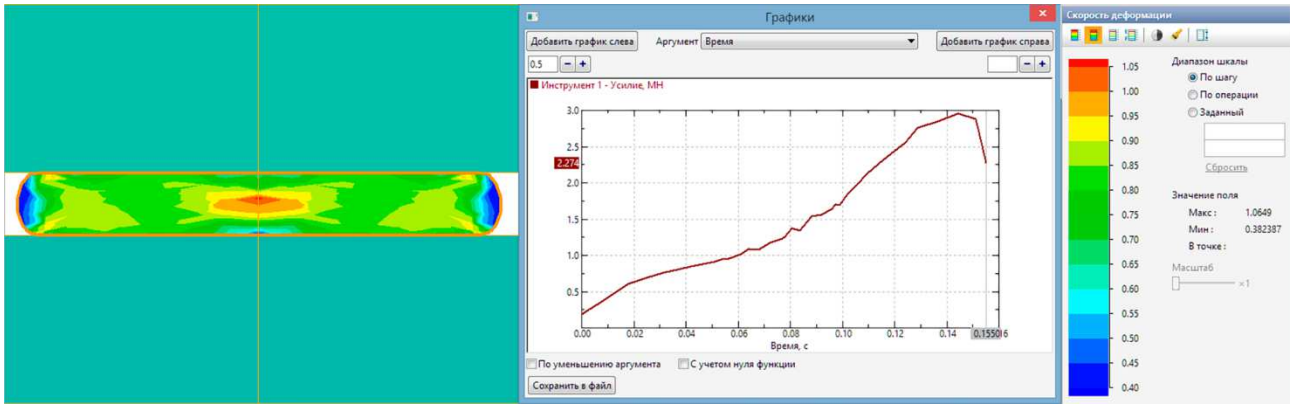


Рисунок 1.10 – Параметры трения в соответствии с законом Леванова для смазки графит + вода

На рисунке 1.11 показан процесс осадки цилиндрической заготовки на КГШП. Вопреки законам физики, технологическое усилие (см. рисунок 1.11*б*) на завершающем этапе операции осадки резко снизилось. Данная погрешность связана с особенностями работы кривошипно-ползунного механизма. Скорость ползуна пресса при приближении его к крайнему нижнему положению падает от некоторого значения до нуля. Соответственно уменьшается до нуля и скорость деформации металла, а вместе с ней сопротивление деформации. Такая ситуация не критична, но тем не менее имеет место быть.



а ***б*** ***в***

Рисунок 1.11 – Осадка цилиндрической заготовки из стали марки 50ХГ, температура 1200°С:

а – осаженная заготовка, ***б*** – график изменения технологического усилия, ***в*** – шкала значений полей деформаций

Замечание. *В дальнейшем, если специально не оговорено, на поковках при моделировании процесса их формообразования всегда будут отображены поля скоростей деформации.*

К сожалению, точно построить график изменения технологического усилия можно лишь экспериментально. В этом случае, согласно методике [65] (см. также раздел 3.5), возможно точное определение, как параметров материала, так и граничных условий. Полученные данные применимы для совершенствования реального технологического процесса ГОШ.

Процесс формообразования поковки, течения её материала при пластическом деформировании в меньшей степени зависит от неточностей (погрешностей) параметров среды и граничных условий. Соответственно моделирование процессов ГОШ, по крайне мере на начальном этапе проектирования и сравнительного анализа различных технологических схем оправдано, но требует подтверждения достоверности получаемых результатов. Одним из способов такого подтверждения являются эксперименты на физических моделях [46, 88, 101, 111, 112].

Процесс исследования ГОШ в среде специализированной программы для ЭВМ (QForm, DEFORM или какой-то другой) является его численной имитацией.

Имитационное моделирование широко распространено практически во всех отраслях науки и техники. Методики имитационного моделирования [113 – 117] достаточно универсальны, и широко используются автором при решении задач исследования и совершенствования технологических схем ГОШ на КГШП.

1.3. Динамические процессы в механизмах кривошипных прессов

Реализацию операции ГОШ на КГШП можно условно представить в виде системы трёх объектов: деформируемая поковка, инструмент и пресс. Объекты этой системы взаимосвязаны, то есть в той или иной степени влияют друг на друга. Характер и степень этого влияния во многом определяют эффективность системы, в рассматриваемом случае, – ГОШ на КГШП круглых в плане поковок. Каждый из объектов системы обладает множеством свойств и способов взаимо-

действия с другими объектами. При исследовании эффективности любой системы, её реальную сущность подменяют моделью. В данной работе ограничено количество свойств и взаимовлияний объектов:

1. Деформируемая поковка испытывает однонаправленное воздействие со стороны инструмента, определяемое его геометрией, смазкой и скоростью деформирующего инструмента (пуансона); учитываются следующие свойства: объём, начальная геометрия, температура и свойства материала, заданными кривыми упрочнения.
2. Инструмент испытывает однонаправленное воздействие со стороны деформируемой поковки (технологическое усилие штамповки); учитываются следующие свойства: температура предварительного нагрева, параметры смазки, материал из которого изготовлены штамповые вставки и идеальная (без учёта упругих колебаний и деформаций деталей пресса) скорость перемещения пуансона КГШП.
3. Пресс испытывает воздействие со стороны инструмента (технологическое усилие штамповки); учитываются упруго-инерционные, диссипативные свойства его деталей и кинематические особенности их соединений, зазоры в кинематических парах, скорость электродвигателя, определяющая скорость работы пресса (число ходов его ползуна в минуту).

Анализ степени разработки вопросов, обозначенных выше в первых двух пунктах, выполнен в предыдущих разделах данной главы диссертации.

Исследованиям динамических процессов в механизмах машин посвящены работы, как зарубежных [118 – 120], так и российских учёных [121 – 134], среди которых Артоболевский И.И., Кожевников С.Н., Левитский Н.И., Вейц В.Л., Кочура А.Е., Вульфсон И.И., Кобринский А.Е., Кобринский, А.А., Решетов Л.Н. и многие другие.

Работы, посвящённые исследованию динамических процессов, возникающих в КГШП при выполнении технологических операций, достаточно многочисленны [135 – 148 и др.]. Их авторство связано с именами Сторожева М.В., Зимина А.И., Навроцкого Г.А., Ланского Е.Н., Власова В.И., Живого Л.И. и других учёных.

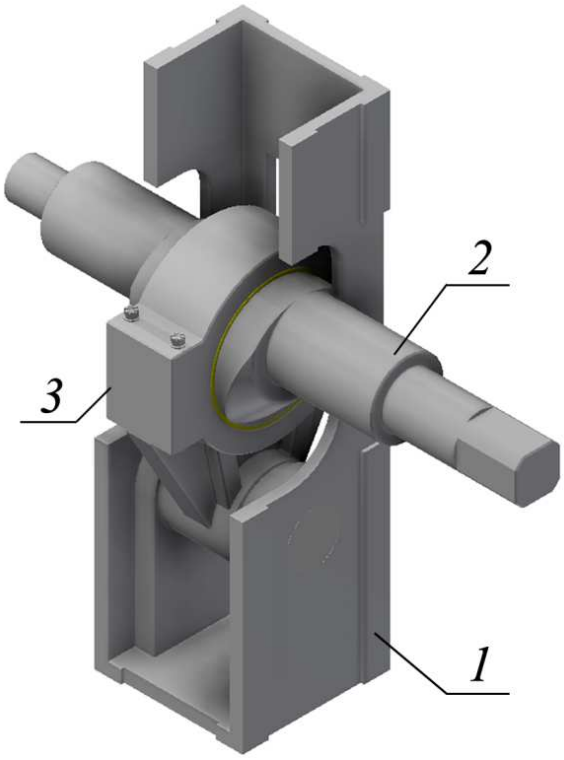


Рисунок 1.12 – Кривошипно-ползунный механизм КГШП:
1 – ползун (с хвостовиком), 2 – главный (эксцентриковый) вал, 3 – шатун

Термин “Исследование динамики механизма” имеет несколько различных толкований, которые рассмотрим на примере кривошипно-ползунного механизма КГШП (см. рисунок 1.12):

1. Каждая из деталей кривошипно-ползунного механизма обладает инерционными свойствами – массой (моментом инерции) и считается недеформируемыми телами, соединёнными между собой без зазоров и перемещающихся в параллельных плоскостях со скоростями и ускорениями, в соответствии с уравнениями, описывающими кинематику и статику кривошипно-ползунного механизма [46, 74, 137, 138, 143]. Такая модель кроме, статических нагрузок, воздействующих на детали механизма, позволяет рассчитать дополнительную динамическую составляющую, как произведение массы этой детали на её ускорение. В некоторых программах твердотельного моделирования, например, Autodesk Inventor Professional [149, 150], лицензией, на использование которой обладает ЛГТУ, существуют модули (“Динамическое моделирование” в Autodesk Inventor Professional), позволяющие выполнить подобные расчёты на основе 3D-модели механизма.

2. В некоторых программах 3D-моделирования, в том числе и Autodesk Inventor Professional, существуют модули прочностных расчётов [150] (“Анализ напряжений” в Autodesk Inventor Professional), позволяющий выполнить, как прочностной, так и частотный анализ [151, 152] любого изделия, корректная твердотельная модель которого (см. рисунок 1.11) предварительно создана.
3. Расчёт колебательных процессов в механизме, модель которого представляет собой систему сосредоточенных в точках или сечениях масс, соединённых между собой идеальными, стационарными, голономными, упруго-диссипативными, кинематическими связями. Внешние нагрузки прикладываются в точках или сечениях сосредоточения масс [79, 126].
4. Известны динамические модели механизмов отдельные элементы которых представляют собой объекты с распределёнными массами [153, 154]. В задачах исследования динамики КГШП такие модели распространения не получили [46].

Полагая, что одной из задач исследований модели, описывающей поведение системы ГОШ – КГШП, является оценка уровня динамических (колебательных) процессов в КГШП, будем использовать динамическую модель, обозначенную в приведённой выше классификации под номером три. Известны многочисленные исследования кривошипных прессов, основанные на динамических моделях в виде системы масс, соединённых между собой различной сложности связями [46, 77 – 79, 139 – 142 и др.]. Количество сосредоточенных масс этих моделей колеблется от одной до десяти и больше. Так в одной из последних работ, посвящённых исследованию динамики КГШП [46], использовалась двенадцати массовая модель, массы которой соединялись нелинейными, кусочно-непрерывными связями, позволяющими учесть зазоры в кинематических парах кривошипно-ползунного механизма пресса [79] и смоделировать режимы его разгона при включении [155].

Очевидно, что для моделирования динамических процессов в одном и том же механизме возможно применение динамических моделей различной сложности. На рис. 1.13 показана типовая динамическая модель кривошипно-ползунного механизма пресса (см. рисунок 1.12) [46, 156], содержащая семь масс: 2 массы – ползун, 2 массы – шатун и 3 массы – главный вал пресса. Движение масс модели

описывается, в данном случае, системой семи нелинейных дифференциальных уравнений 2-го порядка, полученных или на основе уравнений Лагранжа 2-го рода [79, 126, 155] или методов компонентного моделирования [147, 157].

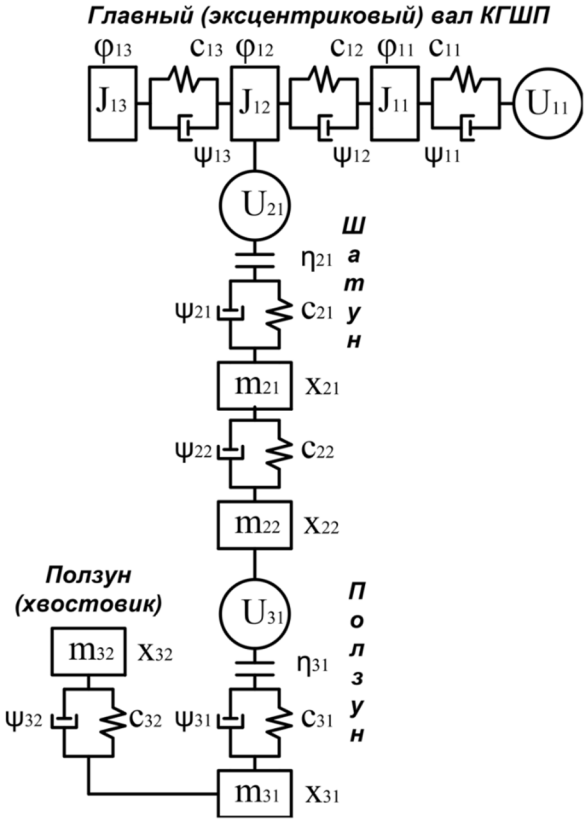


Рисунок 1.13 – Динамическая модель кривошипно-ползунного механизма КГШП:
$\boldsymbol{U_{ij}}$ – функция положения, $\boldsymbol{x_{ij}}$ – реальное перемещение, $\boldsymbol{J_{ij}}$ – момент инерции,
$\boldsymbol{m_{ij}}$ – масса, $\boldsymbol{c_{ij}}$ – жёсткость, $\boldsymbol{\psi_{ij}}$ – коэффициент диссипации, $\boldsymbol{\eta_{ij}}$ – зазор;
j = 1…3 – номер детали (вал, шатун и ползун), **i** – номер массы

Структура данной модели позволяет достаточно точно описать динамические процессы в кривошипно-ползунном механизме, а при известной модификации [46, 77 – 79, 155, 156 и др.], и в элементах его привода. Однако, при штамповке невысоких деталей, что характерно для поковок 1-ой группы, при воздействии на ползун пресса технологического усилия, крутящий момент на главном вале определяется лишь силами трения в его подшипниках. Какой бы сложной не была динамическая модель структуры, представленная на рисунке 1.13 (в плане количества степеней свободы – числа масс и математического описания свойств связей), вся динамика пресса на заключительном этапе штамповки, когда ползун

приближается к своему крайнему нижнему положению, сводится к колебаниям растяжения-сжатия ползуна и шатуна. На самом деле на протяжения всего промежутка времени, когда выполняется технологическая операция ГОШ, главный вал пресса испытывает деформации изгиба, при деформации растяжения-сжатия станины, в которой он закреплён.

С появлением ЭВМ предпринимаются попытки автоматизации расчёта динамики и кинематики механизмов с упругими звеньями, которые можно определить следующими направлениями:

1. Создание программ, позволяющих описать движение 3D-модели механизма и колебательные процессы в нём под действием приложенных к нему сил.
2. Автоматизация процесса разработки динамической модели механизма и исследование её движения с помощью ЭВМ.

Работы по первому направлению ведутся ведущими фирмами, разрабатывающими программные комплексы, позволяющими моделировать различные физические процессы при проектировании изделий, в том числе и на основе 3D-моделей: Autodesk Simulation Mechanical, SolidWorks Simulation, MSC.ADAMS, ANSYS [158 – 162]. Однако в полном объёме задача исследования динамики механизмов с учётом инерционных свойств, возможности деформаций, рассеяния энергии и зазоров пока не решена. Кроме того, все перечисленные системы не только сложны в эксплуатации, но и имеют высокую стоимость.

Второе направление – автоматизация процессов исследования отдельных механизмов, или в универсальных системах математического моделирования, например, MATLAB, AMESim [163, 164], или в автономных программных решениях [165 – 167]. Особенность исследований динамики, связанных с этим направлением, – разработка для решения оригинальных задач, моделей механических систем.

Из сказанного следует, что для решения задачи исследования влияния технологического процесса ГОШ на условия работы КГШП, требуется:

- разработка динамической модели новой структуры, позволяющей учесть, как деформации растяжения-сжатия в кривошипно-ползунном механизме и крутильные деформации валов, так и деформации, возникающие вследствие изгиба главного вала и растяжения-сжатия станины;

- конкретизация известных методов математического описания движения масс новой динамической модели, применительно к её кинематике, динамике и статике;
- выбор и обоснование показателей эффективности работы пресса, разработка методики их расчёта и программы её реализации на ЭВМ.

1.4. Задачи исследования

Исследования, связанные с повышением эффективности реализации технологических процессов ГОШ на КГШП, и разработкой корректных методик оценки показателей этой эффективности, задача, безусловно, актуальная, как в плане повышения качества поковок, так и с точки зрения сбережения дорогостоящих ресурсов, в первую очередь, затрат на металл, штамповую оснастку, кузнечно-штамповочное оборудование и его обслуживание. Различные варианты её решения нашли отражение в многочисленных научных работах, выполненных в течение последних десятилетий. Их анализ позволил сформулировать основные направления этих работ:

- уменьшение затрат металла на изготовление поковок;
- уменьшение технологического усилия штамповки, позволяющее не только повысить долговечность инструмента и оборудования, но и в отдельных случаях применить прессы с меньшим номинальным усилием;
- снижение уровня динамических процессов в механизмах кузнечно-прессового оборудования;
- разработка программного обеспечения, позволяющего повысить производительность и качество проектирования и исследования систем, включающих технологический процесс, инструмент и оборудование кузнечно-прессового производства.

Учитывая, что конфигурация значительной доли поковок, производимых на предприятиях отечественной промышленности методом ГОШ на КГШП, являются круглыми в плане, цель диссертационной работы определим, повышение эф-

фективности процессов горячей объёмной штамповки круглых в плане поковок путем увеличения коэффициента использования металла и улучшения условий работы КГШП, на основе научно обоснованного выбора геометрических параметров, определяющих конфигурации технологических переходов.

Задачи исследования, соответствующие поставленной цели, сформулируем следующим образом:

1. Определить систему показателей эффективности ГОШ для оценки различных вариантов технологических схем штамповки.

2. Установить зависимости для исследования влияния на коэффициент использования металла данных о минимальном объёме поковки, способах отрезки и нагрева заготовки, диаметра и точности сортового проката круглого сечения, из которого заготовка изготовляется.

3. Установить зависимости для исследования влияния на коэффициент точности поковки значений припусков, напусков, допусков, и радиусов закруглений наружных углов поковки, назначенных на основе геометрии детали, получаемой из поковки.

4. Определить показатель, определяющий возможность реализации разработанной технологической схемы ГОШ на КГШП, и зависимости для его расчета.

5. Разработать методику расчёта динамических и статических процессов, протекающих в КГШП, позволяющую учесть особенности, связанные с выполнением операций ГОШ, и исследовать влияние технологической схемы ГОШ на динамические процессы и статические нагрузки в деталях пресса.

6. Разработать методику расчёта геометрических параметров штампа, реализующего бесподпорную технологию ГОШ с уменьшенными радиусами закругления наружных углов поковки и сниженными технологическими нагрузками за счёт формирования на предварительном переходе выступов на торцевых поверхностях полуфабриката поковки.

7. Разработать и исследовать новые высокоэффективные технологические схемы штамповки поковки детали каретки синхронизатора 2-ой и 3-ей передачи автомобиля «КАМАЗ».

2. АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ РЕАЛИЗАЦИИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ГОШ НА КГШП

Эффективность технологического процесса изготовления изделия с заданными параметрами, определяется, в соответствии с рисунком 2.1, его стоимостью.

Рисунок 2.1 – Составляющие стоимости изделия машиностроения

Данная работа посвящена совершенствованию технологических процессов изготовления поковок методом ГОШ на КГШП. Основное внимание в ней сосредоточено на минимизации таких составляющих стоимости готовых деталей, полученных путём механической обработки поковок, как

- стоимость металла (металлоёмкость);
- тип оборудования, условия его работы, обслуживание и ремонт (статические и динамические усилия в КГШП и штамповых вставках);
- энергетические затраты, связанные с работой сил пластического деформирования на кривошипных прессах.

На рисунке 2.1 эти составляющие стоимости выделены зелёным цветом.

2.1. Структура данных формы детали и чертёж поковки

В рамках данного исследования будем рассматривать поковки осесимметричные или круглые в плане, которые, по классификации, предложенной в работе [19], относятся ко всем подгруппам группы I и подгруппам 1 и 3 группы V. Это осесимметричные поковки, часто именуемые как круглые в плане [14].

На рисунках 2.2 и 2.3 представлены варианты построения некоторых структурных схем деталей, получаемых из осесимметричных поковок.

Строительными блоками при создании внешних форм являются кольца, с внутренним диаметром D_{i-1} и наружным – D_i. Высота кольца – H_i, размер, определяющий его положение – L_i. Начальная или исходная форма – цилиндр диаметром D_0 и высотой H_0.Теоретически количество колец неограниченно, на практике $0 \le i \le 3$. Количество вариантов внешних форм деталей достаточно велико: при $i = 0 - 1$, $i = 1 - 4$, $i = 2 - 16$, $i = 3 - 64$.

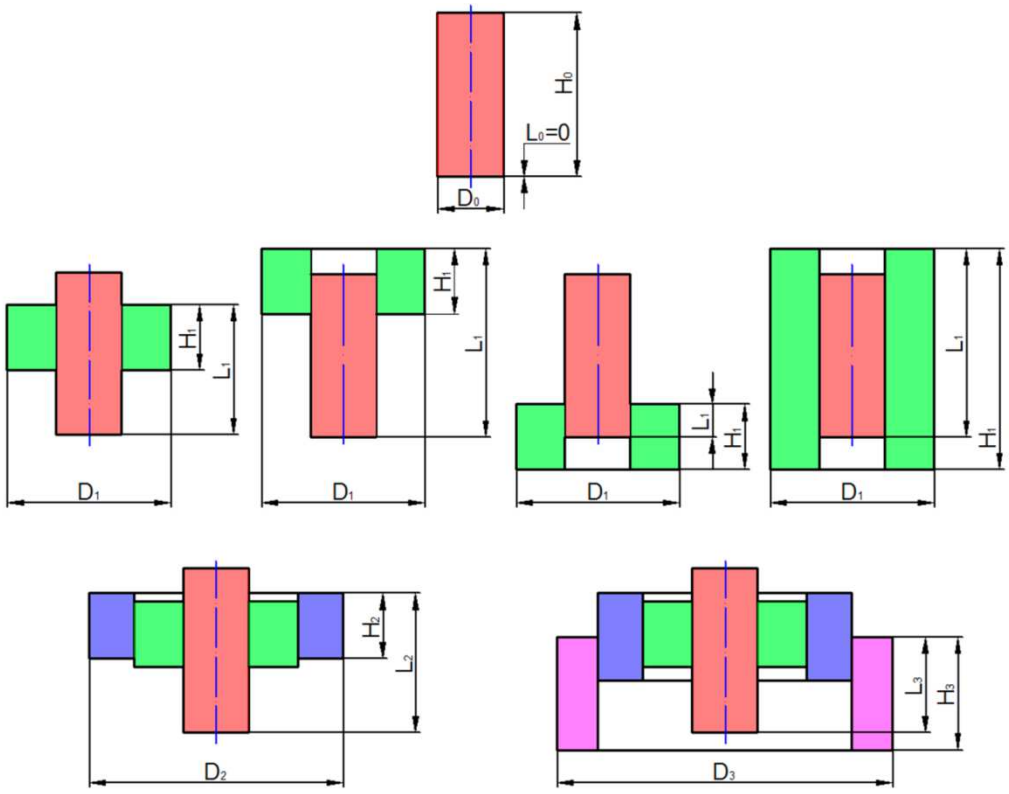


Рисунок 2.2 – Варианты построения структурной схемы внешней формы детали

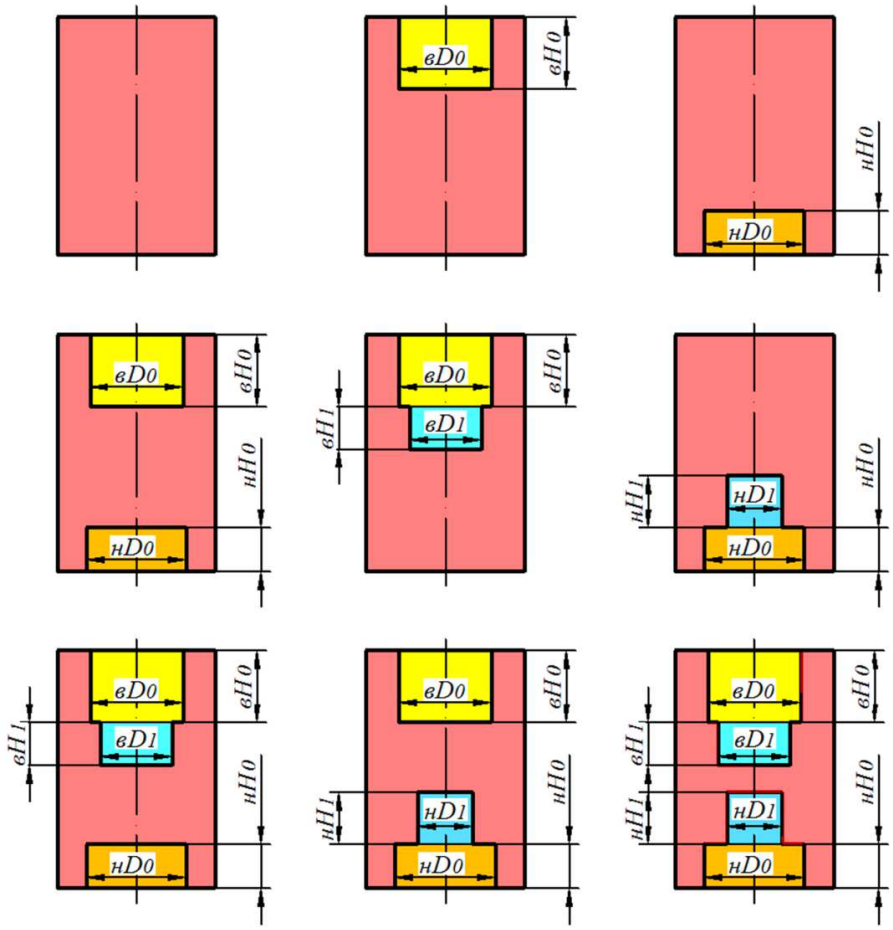


Рисунок 2.3 – Варианты построения структурной схемы внутренней формы детали

Как и в случае с внешними формами, теоретически количество внутренних форм неограниченно, на практике количество отверстий – два сверху и два снизу.

Конфигурация детали зависит от соотношения её размеров. Для отверстий, в соответствии с рисунком 2.3 эти соотношения очевидны:

$$\begin{aligned} &в D_0 < D_0, \;\; н D_0 < D_0, \\ &в D_1 < в D_0, \, н D_1 < н D_0, \\ &в H_0 + в H_1 + н H_0 + н H_1 \le H_0. \end{aligned} \qquad (2.1)$$

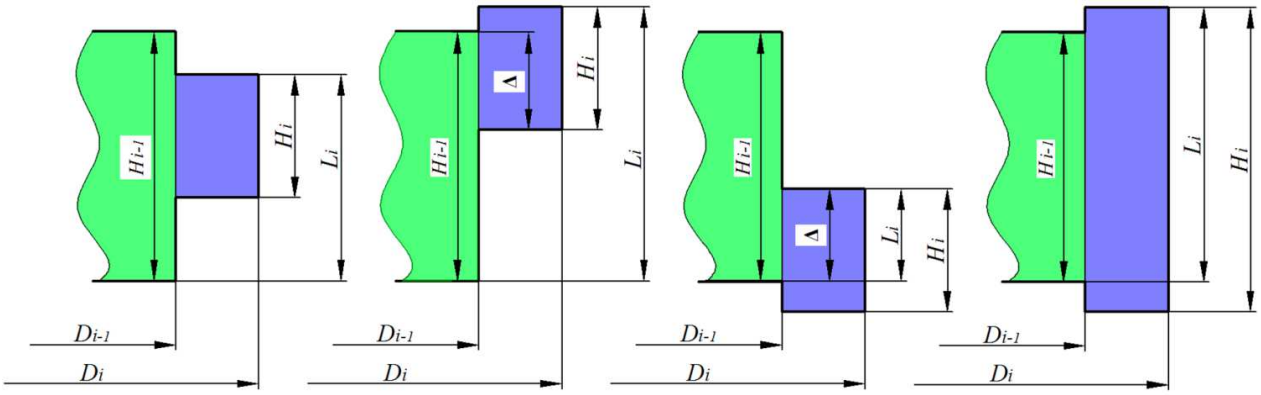
В выражении (2.1) D_0 и H_0 – диаметр и высота исходного цилиндра внешней формы детали (см. рисунок 2.2).

Соотношение размеров, определяющих положение i-го элемента (кольца) внешней формы относительно предыдущего i-1-го элемента, как следует из рисунка 2.4, можно записать следующим образом:

$$\textit{а} - \begin{cases} D_i > D_{i-1} \\ H_i < H_{i-1} \\ H_i \le L_i \le H_{i-1} \end{cases}, \quad \textit{б} - \begin{cases} D_i > D_{i-1} \\ H_i \le L_i \\ H_i + H_{i-1} - L_i \ge \Delta \end{cases},$$

$$\textit{в} - \begin{cases} D_i > D_{i-1} \\ H_i > L_i \\ \Delta \le L_i \le H_{i-1} \end{cases}, \quad \textit{г} - \begin{cases} D_i > D_{i-1} \\ H_i > H_{i-1} \\ H_i > L_i > H_{i-1} \end{cases}, \tag{2.2}$$

где $\Delta > 0$ – минимально допустимая величина пересечения высот предыдущего и последующего элементов.



а ***б*** ***в*** ***г***

Рисунок 2.4 – Возможные расположения (***а***, ***б***, ***в***, ***г***) последующего (*i*-го) элемента внешней формы детали относительно элемента предыдущего (*i–1*-го)

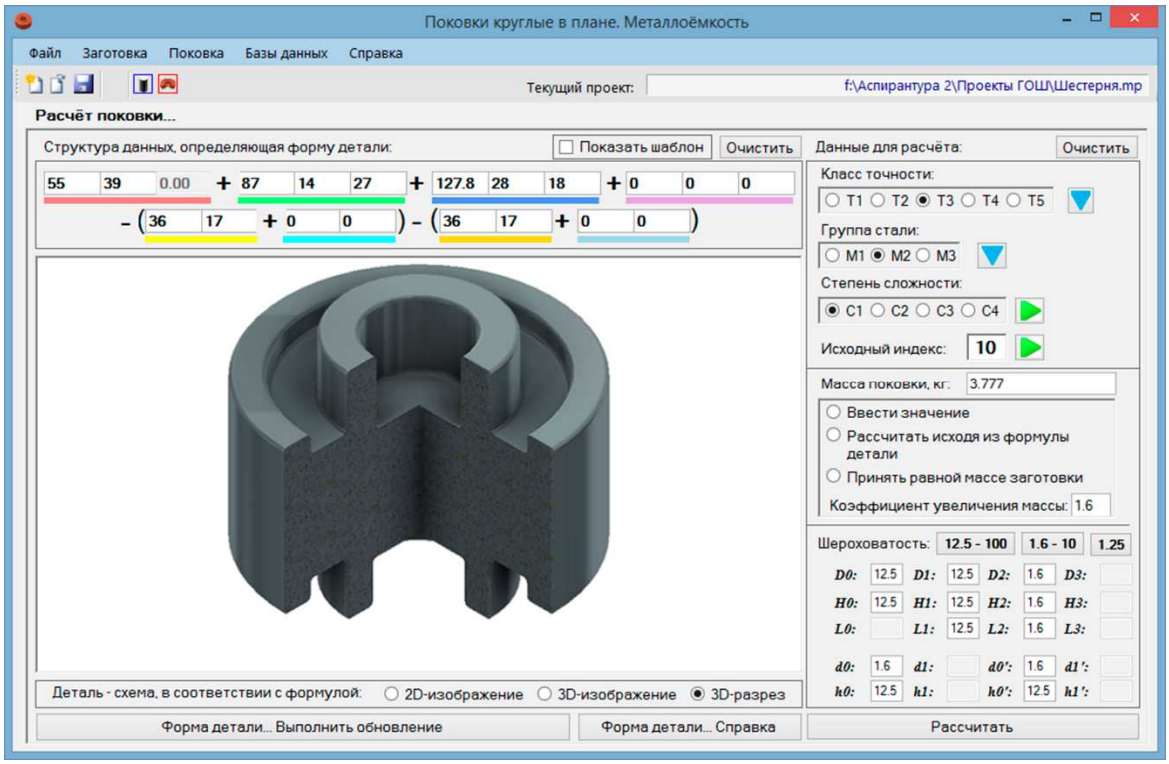
Структуру данных формы исследуемой детали (формулу детали) в общем случае запишем следующим образом:

$$Д(K, M, N) = \bigcup_{i=0}^{K} D_i, H_i, L_i - \sum_{m=0}^{M} вD_m, вL_m - \sum_{n=0}^{N} нD_n, нL_n, \tag{2.3}$$

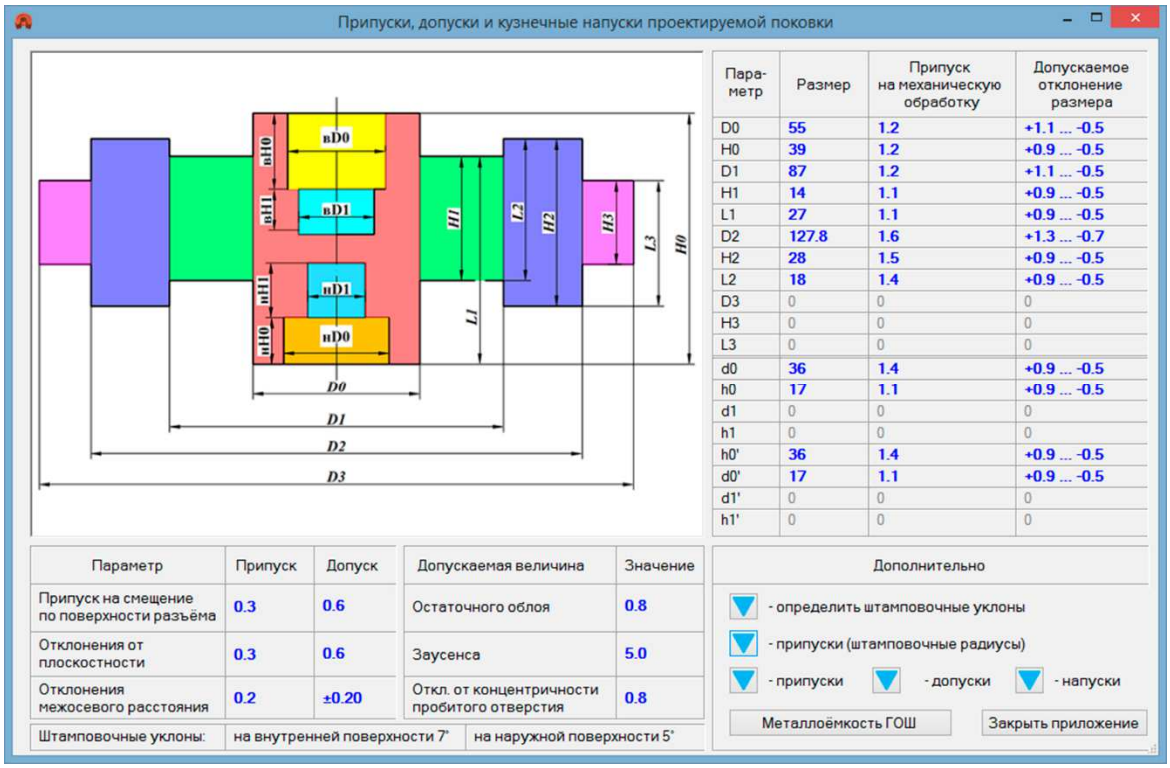
где K – количество элементов внешней формы, M, N – количество отверстий сверху и снизу, определяющих внутреннюю форму детали. С учётом принятых ограничений ($K \le 3$, $M \le 1$, $N \le 1$), выражение (2.3) примет вид:

$$\begin{aligned} &Д(3,1,1) = D_0, H_0, L_0 \cup D_1, H_1, L_1 \cup D_2, H_2, L_2 \cup D_3, H_3, L_3 - \\ &- (вD_0, вL_0 + вD_1, вL_1) - (нD_0, нL_0 + нD_1, нL_1). \end{aligned} \tag{2.4}$$

Здесь символ “Д” – любое сочетание слов, например, наименование детали.



а



б

Рисунок 2.5 – Автоматизация процесса разработки чертежа поковки:

а – окно ввода и обработки данных, ***б*** – окно результатов

Структура данных формы детали достаточно точно определяет её размеры и конфигурацию, без учёта, естественно, радиусов закруглений, фасок, различного рода проточек, например, шпоночных пазов, шлицов, зубьев зубчатых колёс и других подобных элементов. Наличие структуры данных формы детали, – необходимое условие для создания чертежа поковки. Основное отличие чертежа поковки от чертежа детали, – наличие припусков на механическую обработку, допусков и кузнечных напусков в соответствии с ГОСТ 7505-89 [80]. На рисунке 2.5 показаны окна ввода и обработки структуры данных формы детали и окно результатов программного решения [168], позволяющего автоматизировать процесс разработки чертежа поковки на основании структуры данных формы детали, которая из этой поковки изготавливается.

Структуру данных формы детали в дальнейшем предполагается использовать для сопоставления возможных вариантов технологических процессов ГОШ, установки связи между полученными результатами и исследуемой поковкой.

2.2. Металлоёмкость технологического процесса ГОШ

Согласно ГОСТ 27782-88 [58] под металлоёмкостью изделия понимается количество металла, требуемого для его производства и эксплуатации. При производстве деталей из металла, как показал анализ, выполненный в первой главе диссертационной работы, их себестоимость – это в большей части затраты, связанные с приобретением металла, которые можно снизить или путём изменения конструкции детали, или минимизацией количества отходов при её изготовлении.

Данный раздел посвящён снижению количества отходов, образующихся при производстве стальных поковок способом горячей объёмной штамповки на кривошипных прессах.

Вопросы, связанные с изменениями в конструкции изделий, в данной работе не рассматриваются.

2.2.1. Исследование металлоёмкости операций отрезки и нагрева заготовок из сортового проката круглого сечения

При выполнении исследований будем использовать следующие определения:

1. Минимальный объём (масса) заготовки – объём заготовки, позволяющий изготовить методом ГОШ поковку без образования дефектов вследствие не заполнения гравюры штампа окончательного перехода.

2. Минимально допустимый объём (масса) поковки – объём поковки, полученной из заготовки минимального объёма. Минимальные объёмы (массы) поковки и заготовки отличаются на величину угара металла вследствие нагрева заготовки [55, 168].

Формирование поковки на окончательном переходе чаще всего происходит одновременно с вытеснением металла в облой (открытый штамп) или компенсатор (закрытый штамп). Соответственно определить минимальный объём поковки возможно методами численного моделирования [92 – 94], например, в программе QForm [65 – 68, 169, 170, 183], или экспериментально.

При изготовлении заготовки существенно повышение металлоёмкости из-за неточностей диаметра $\left(D_{\Delta D_{min}}^{\Delta D_{max}}\right)$ сортового проката [171 – 174], точности отрезки $\left({}_{З}L_{\Delta_{min}}^{\Delta_{max}}\right)$ и вследствие угара при её нагреве [55]. Последние определяются способом отрезки: на ножницах, в штампе, ножовочно-отрезных станках или другим, и способом нагрева, при котором часть массы заготовки (U_{min}, U_{max} – в процентах) преобразуется в окалину.

Диаметр (D) и минимальный объём поковки (${}_{П}V_{min}$) являются исходными данными для расчёта её длины (${}_{З}L$). Масса и объём заготовки связаны соотношением: ${}_{З}M_{min} = {}_{З}V_{min} \cdot \rho$, где ρ – плотность материала заготовки (поковки). Объём заготовки (${}_{З}V$), её диаметр (D) и длина (${}_{З}L$) должны удовлетворять следующим соотношениям [20, 55]:

$$1.25 \le \frac{{}_{З}L}{D} \le 2.5, \qquad {}_{З}V = \frac{\pi \cdot D^2}{4} {}_{З}L, \tag{2.5}$$

где объём и длина заготовки могут принимать значения от ${}_3V_{min}$, ${}_3L_{min}$ до ${}_3V_{max}$, ${}_3L_{max}$ соответственно. Диаметр заготовки (D) будем считать равным номинальному диаметру соответствующего размера сортового проката [55].

Минимальная и максимальная высоты заготовки:

$$\begin{aligned} {}_3L_{min} &= {}_3L + \Delta_{min}, \\ {}_3L_{max} &= {}_3L + \Delta_{max}. \end{aligned} \tag{2.6}$$

Номинальная длина заготовки с учётом угара:

$${}_3L = \frac{4 \cdot V \cdot (1 + 0.01 \cdot U_{max})}{\pi \cdot D_{min}^2} - \Delta_{min}, \tag{2.7}$$

где V – минимальный объём заготовки после нагрева и удаления окалины.

Математическая модель, позволяющая исследовать потери металла при изготовлении заготовки в зависимости от диаметра и точности сортового проката, способа нагрева и отрезки, представляет собой набор следующих зависимостей:

1. Минимальный и максимальный объёмы заготовки до нагрева:

$$\begin{aligned} {}_3V_{\min} &= V \cdot (1 + 0.01 \cdot U_{max}), \\ {}_3V_{max} &= 0.25\pi \cdot D_{max}^2 \cdot \left(\frac{4 \cdot V \cdot (1 + 0.01 \cdot U_{max})}{\pi \cdot D_{min}^2} + \Delta_{max} - \Delta_{min} \right). \end{aligned}$$

2. Максимальный объём потерь металла:

$$\delta V_{\Sigma} = 0.25\pi \cdot D_{max}^2 \cdot \left(\frac{4 \cdot V \cdot (1 + 0.01 \cdot U_{max})}{\pi \cdot D_{min}^2} + \Delta_{max} - \Delta_{min} \right) - V \cdot (1 + 0.01 \cdot U_{max}). \tag{2.8}$$

3. Потери металла вследствие нагрева (%):

$$\delta V_U = \frac{V \cdot U_{\max}}{V \cdot (0.01 \cdot U_{\max} - 1 + D_1^{-2} \cdot D_2^2) + 0.25 \cdot \pi \cdot (\Delta_{\max} - \Delta_{\min}) \cdot D^2}.$$

4. Потери металла вследствие неточностей при отрезке (%):

$$\delta V_L = \frac{250 \cdot \pi \cdot D^2 \cdot (\Delta_{\max} - \Delta_{\min})}{V \cdot (0.01 \cdot U_{\max} - 1 + D_1^{-2} \cdot D_2^2) + 0.25 \cdot \pi \cdot (\Delta_{\max} - \Delta_{\min}) \cdot D^2}.$$

5. Потери металла вследствие отклонений диаметра заготовки (%):

$$\delta V_D = \frac{100 \cdot V \cdot (D_1^{-2} \cdot D_2^2 - 1)}{V \cdot (0.01 \cdot U_{\max} - 1 + D_1^{-2} \cdot D_2^2) + 0.25 \cdot \pi \cdot (\Delta_{\max} - \Delta_{\min}) \cdot D^2}.$$

Предельные значения длин заготовки (L_{min} и L_{max}) для диаметра D:

$$L_{min} = \frac{4 \cdot V \cdot (1 + 0.01 \cdot U_{max})}{\pi \cdot D^2}, \tag{2.9}$$

$$L_{max} = \frac{4 \cdot V \cdot (1 + 0.01 \cdot U_{max}) \cdot D_{max}^2 + \pi \cdot D_{min}^2 \cdot D_{max}^2 \cdot (\Delta_{max} - \Delta_{min})}{D^2 \cdot \pi \cdot D_{min}^2}. \tag{2.10}$$

Значения L_{min}, L_{max}, соответствующие номинальному диаметру D, в выражениях (2.9) и (2.10) будем называть условными. Это те параметры заготовки, которые используются в процессе моделирования ГОШ методом конечных элементов (МКЭ), в данном случае, программе QForm.

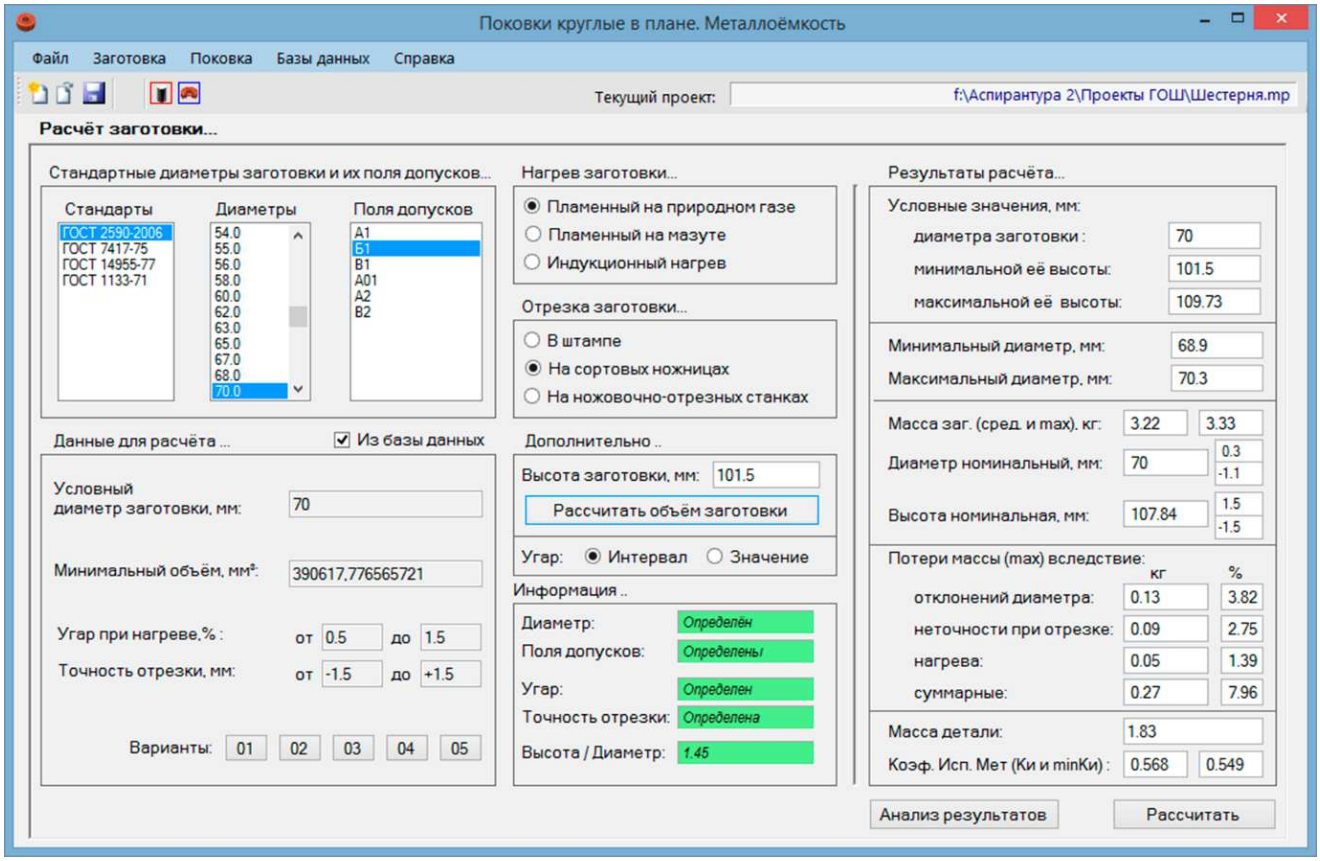


Рисунок 2.6 – Программная реализация расчёта параметров заготовки

Расчёты в соответствии с зависимостями (2.6) – (2.10) автоматизированы (см. рисунок 2.6) [168]. Исходными данными для выполнения расчётов является минимальный объём поковки (или высота заготовки номинального диаметра), рассчитываемый путём предварительного моделирования процесса ГОШ, например, в программе QForm, параметры точности диаметра прутка, отрезки, и угара.

На рисунках 2.7 и 2.8 показаны чертёж, структура данных формы и структурная схема детали “Шестерня”. Эту деталь [80] предполагается использовать в главах 2 и 3 для тестирования разработанных автором методик и программных решений.

В данном разделе деталь “Шестерня” использована для тестирования программного обеспечения [168] (см. рисунок 2.6) и методики исследования влияния на металлоёмкость процессов ГОШ на КГШП круглых в плане поковок операций отрезки и нагрева заготовок из сортового проката круглого сечения.

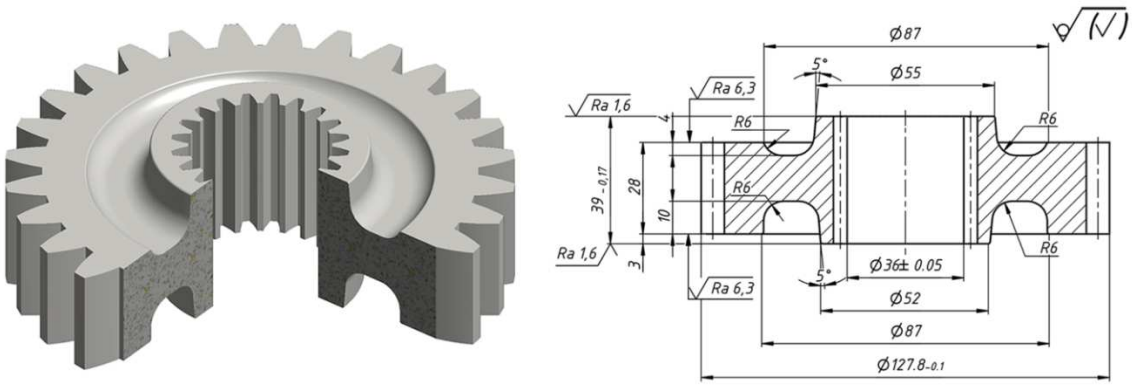


Рисунок 2.7 – Чертёж детали “Шестерня”

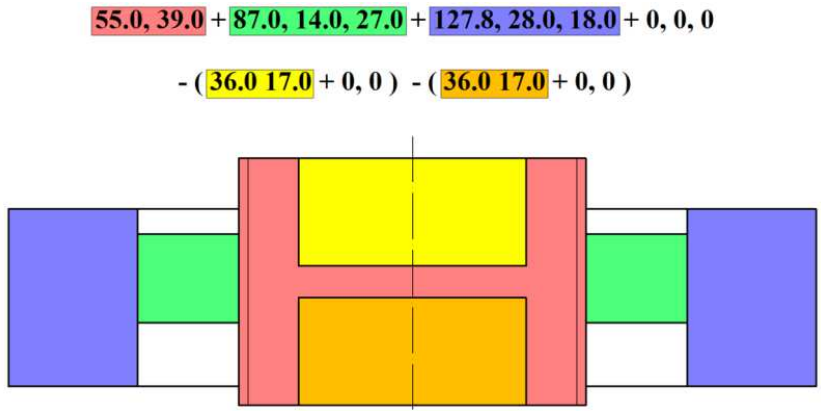


Рисунок 2.8 – Структура данных формы и структурная схема детали “Шестерня”

Чертёж поковки, разработанный в соответствии со структурой данных формы детали (см. рисунок 2.8) показан на рисунке 2.9. Масса детали – 1.83 кг. Размеры поковки и их допуски (см. рисунок 2.5) совпадают с приведёнными в ГОСТ 7505-89 [80].

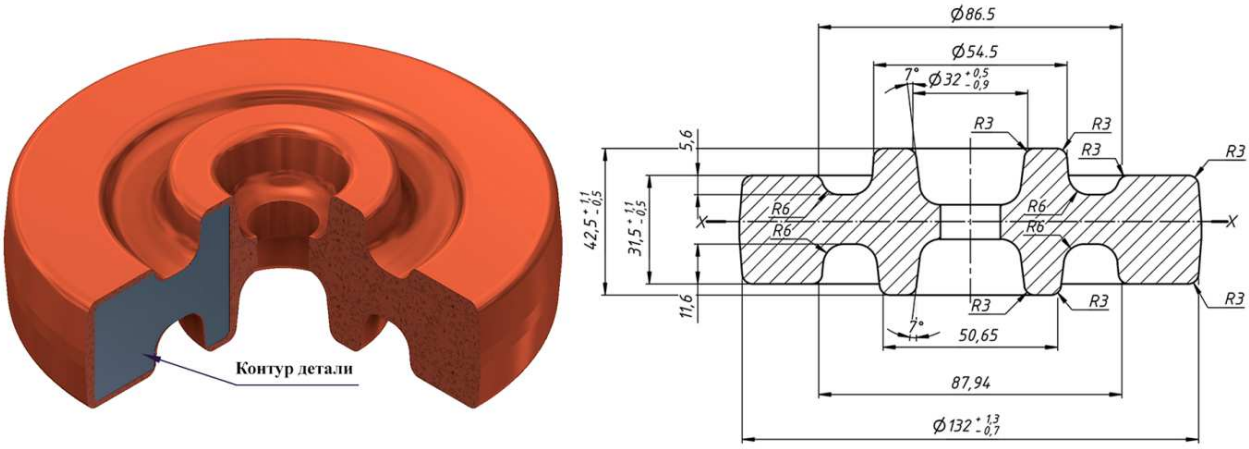
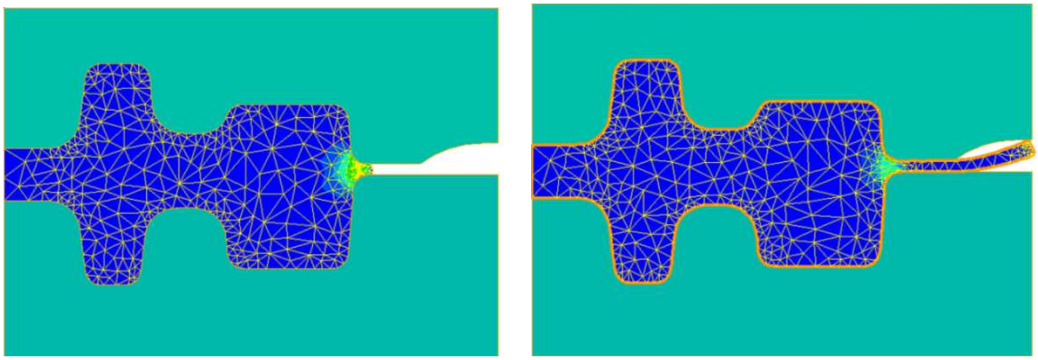


Рисунок 2.9 – Чертёж поковки детали “Шестерня”

Рисунок 2.10 – Технологические переходы открытой штамповки поковки детали “Шестерня”

На рисунке 2.10 изображены технологические переходы открытой штамповки рассматриваемой поковки. Для её изготовления применён пруток по ГОСТ 2590-2006 с номинальным диаметром 70 мм, класса точности Б1. Отрезка заготовки – на сортовых ножницах, обеспечивающих точность ±1.5 мм. Нагрев – пламенный с использованием природного газа до температуры 1200°С.

Минимальная расчётная (условная) длина заготовки – 101.5мм получена путём численного моделирования технологического процесса ГОШ в программе QForm 8, максимальная длина – 109.73мм, рассчитана по методике, изложенной выше, в соответствии с зависимостями (2.5) – (2.10) (см. рисунки 2.6, 2.11).



а ***б***

Рисунок 2.11 – Штамповка на окончательном переходе при условной высоте заготовки: ***а*** – 101.5мм, ***б*** – 109.73мм

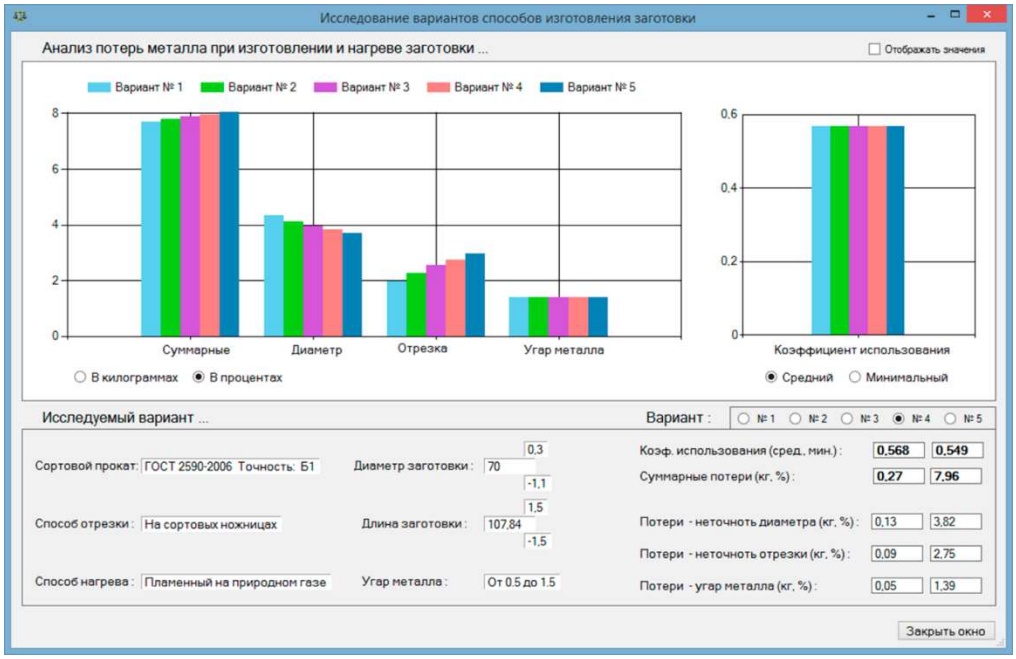


Рисунок 2.12 – Анализ результатов расчёта параметров заготовки

В таблице 2.1 и на рисунке 2.12 приведены данные исследования геометрических параметров заготовки и способов её производства (нагрев и отрезка) применительно к технологическому процессу ГОШ на КГШП поковки детали “Шестерня” (см. рисунок 2.9)

Оценка металлоёмкости технологического процесса изготовления детали производится на основе коэффициента использования металла [59]:

$$K_И = \frac{{}_Д M}{{}_З M_{ср}} = \frac{2 \cdot {}_Д M}{({}_З V_{max} + {}_З V_{min}) \cdot \rho} \le 1, \quad {}_{min} K_И = \frac{{}_Д M}{{}_З M_{max}} = \frac{{}_Д M}{{}_З V_{max} \cdot \rho} \le 1, \quad (2.11)$$

где ${}_З M_{ср}$, ${}_З M_{max}$ и ${}_Д M$ – массы заготовки (средняя, максимальная) и детали.

Чем меньше $K_И$ и $_{min}K_И$, тем менее эффективен технологический процесс.

Коэффициент использования металла позволяет оценить потребность в металле, особенно в условиях массового производства, а в совокупности с программным решением [168], существенно упростить выбор материала (прокат и его точность) и способ производства (нагрев и отрезка) заготовок.

Таблица 2.1 – Результаты исследования влияния параметров заготовки на коэффициент использования металла ($K_И$ и $_{min}K_И$)

Параметр	Отношение $\frac{_3L}{D}$					
	2,1	**1,81**	**1,58**	**1,45**	**1,33**	**1,28**
Точность прокатки: А1, Б1, В1, А2, В2. Нагрев пламенный на природном газе (отрезка на сортовых ножницах)						
А1	0,572 0,558	0,572 0,557	0,572 0,556	0,572 0,556	0,57 0,555	0,57 0,554
Б1	0,568 0,551	0,568 0,55	0,568 0,55	0,568 0,549	0,568 0,549	0,568 0,548
В1	0,567 0,547	0,567 0,547	0,567 0,547	0,567 0,546	0,567 0,546	0,567 0,545
А2	0,572 0,558	0,572 0,557	0,572 0,556	0,572 0,555	0,57 0,555	0,57 0,554
В2	0,563 0,54	0,563 0,54	0,563 0,54	0,563 0,54	0,563 0,54	0,563 0,539
Способ нагрева заготовки. Точность прокатки Б1 (отрезка на сортовых ножницах)						
Индукционный	0,575 0,557	0,575 0,556	0,574 0,556	0,574 0,555	0,574 0,555	0,574 0,554
Пламенный на природном газе	0,568 0,551	0,568 0,55	0,568 0,55	0,568 0,549	0,568 0,549	0,568 0,548
Пламенный на мазуте	0,567 0,548	0,567 0,548	0,565 0,547	0,565 0,547	0,565 0,546	0,565 0,546
Способ отрезки заготовки. Точность прокатки Б1 (нагрев пламенный на природном газе)						
На сортовых ножницах	0,568 0,551	0,568 0,55	0,568 0,55	0,568 0,549	0,568 0,549	0,568 0,548
На ножовочно-отрезных станках	0,57 0,554	0,57 0,555	0,57 0,554	0,57 0,554	0,57 0,554	0,57 0,554

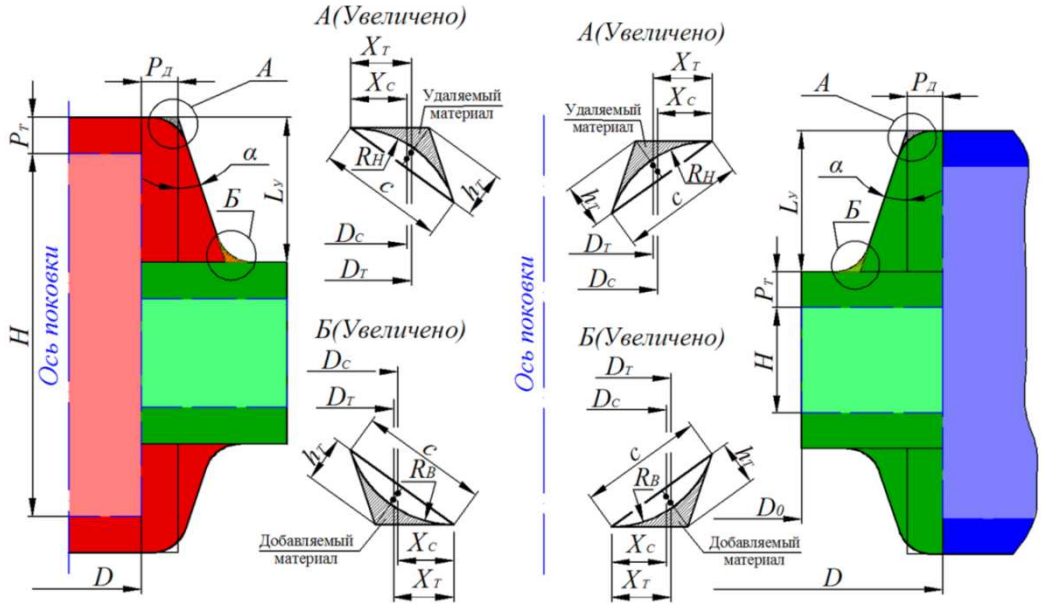
Анализ приведённых в таблице 2.1 данных и вариантов на рисунке 2.12 подтверждает ожидаемый результат: металлоёмкость процесса изготовления заготовки, а значит и процесса ГОШ в целом существенно зависит от точности сортового проката, способов отрезки и нагрева.

Соотношения величин длины и диаметра заготовки, определяемая выражениями (2.5), значительного влияния на величину потерь металла, связанных с изготовлением заготовки, не оказывает. Имеет место тенденция к незначительному снижению металлоёмкости (росту показателя эффективности $K_И$) при увеличении $\frac{_з L}{D}$.

Методика расчёта коэффициента использования металла и выбора на его основе рациональных параметров сортового проката, способов отрезки и нагрева заготовки приведена в приложении А.

2.2.2. Анализ влияния на металлоёмкость технологического процесса ГОШ геометрии поковок

Геометрия поковки определяется размерами детали, припусками на её механическую обработку и кузнечными напусками. Припуски и напуски являются варьируемыми параметрами. Их наибольшие значения устанавливает ГОСТ 7505-89 [80], реальные – определяются эффективностью технологического процесса.



а ***б***

Рисунок 2.13 – К расчёту припусков и кузнечных напусков круглых в плане поковок на их наружной (***а***) и внутренней (***б***) поверхностях

Металлоёмкость технологического процесса ГОШ будем оценивать с помощью коэффициента точности поковки [59]:

$$K_{П} = \frac{{}_{Д}M}{{}_{П}M} \le 1, \tag{2.12}$$

где ${}_{Д}M$, ${}_{П}M$ – массы детали и поковки, определяемые, в соответствии со структурой данных формы детали (2.3).

Выражения для расчёта объёмов (массы) припусков и напусков, на рисунках 2.13 они выделены более тёмным красным и зелёным цветом, в сравнении с соответствующим элементом структурной схемы детали:

- наружная цилиндрическая поверхность (рисунок 2.13*а*)

$$\begin{aligned}
&V = V_{Ц} + V_{ЦК} + V_{КК} - V_{RH} + V_{RB},\\
&V_{Ц} = 0.25 \cdot \pi \cdot (D^2 - D_0^2) \cdot P_T, \quad V_{ЦК} = 0.25 \cdot \pi \cdot ((D + P_{Д})^2 - D^2) \cdot L_{У},\\
&V_{КК} = 0.125 \cdot \pi \cdot ((D + P_{Д} + L_{У} \cdot tg\,\alpha)^2 - (D + P_{Д})^2) \cdot L_{У},\\
&V_{RH} = \pi \cdot (D_{TH} \cdot S_T - D_{CH} \cdot S_C),\\
&V_{RB} = \pi \cdot (D_{TB} \cdot S_T - D_{CB} \cdot S_C),\\
&D_{TH} = A_H + X_T, \qquad D_{CH} = A_H + X_C,\\
&D_{TB} = A_B - X_T, \qquad D_{CB} = A_B - X_C,\\
&A_H = D + P_{Д} - 2 \cdot R_H \cdot tg\,(45 - 0.5 \cdot \alpha),\\
&A_B = D + P_{Д} + L_{У} \cdot tg\,(\alpha) + 2 \cdot R_B \cdot tg\,(45 - 0.5 \cdot \alpha);
\end{aligned} \tag{2.13}$$

- внутренняя цилиндрическая поверхность (рисунок 2.13*б*)

$$\begin{aligned}
&V_B = V_{Ц} + V_{ЦК} + V_{КК} - V_{RH} + V_{RB},\\
&V_{Ц} = 0.25 \cdot \pi \cdot (D^2 - D_0^2) \cdot P_T, \quad V_{ЦК} = 0.25 \cdot \pi \cdot (D^2 - (D - P_{Д})^2) \cdot L_{У},\\
&V_{КК} = 0.125 \cdot \pi \cdot ((D - P_{Д} - L_{У} \cdot tg\,\alpha)^2 - (D - P_{Д})^2) \cdot L_{У},\\
&V_{RH} = \pi \cdot (D_{TH} \cdot S_T - D_{CH} \cdot S_C),\\
&V_{RB} = \pi \cdot (D_{TB} \cdot S_T - D_{CB} \cdot S_C),\\
&D_{TH} = A_H - X_T, \qquad D_{CH} = A_H - X_C,\\
&D_{TB} = A_B + X_T, \qquad D_{CB} = A_B + X_C,\\
&A_H = D - P_{Д} + 2 \cdot R_H \cdot tg\,(45 - 0.5 \cdot \alpha),\\
&A_B = D - P_{Д} - L_{У} \cdot tg\,(\alpha) - 2 \cdot R_B \cdot tg\,(45 - 0.5 \cdot \alpha).
\end{aligned} \tag{2.14}$$

В выражениях (2.13), (2.14):

$$\begin{aligned}
&S_T = R^2 \cdot \sin^2(45 - 0.5 \cdot \alpha) \cdot \mathrm{tg}(45 - 0.5 \cdot \alpha), \quad S_C = R^2 \cdot \left(\pi \cdot \frac{90 - \alpha}{360} - 0.5 \cdot \cos(\alpha)\right),\\
&X_T = R \cdot \cos(45 + 0.5 \cdot \alpha) \cdot \left(\frac{\sin^2(45 - 0.5 \cdot \alpha)}{3 \cdot \cos(45 - 0.5 \cdot \alpha)} - \cos(45 - 0.5 \cdot \alpha)\right),\\
&X_C = \frac{2 \cdot R^3 \cdot \sin^3(45 - 0.5 \cdot \alpha)}{3 \cdot S_C} \cdot \cos(45 - 0.5 \cdot \alpha),
\end{aligned} \tag{2.15}$$

где R радиус закругления – наружный (R_H) или внутренний (R_B).

При выводе зависимостей (2.13) – (2.15) автором использованы известные формулы для расчёта площадей и координат центров тяжести прямоугольников, треугольников, секторов [175], а также вторая теорема Гульдена [176] для вычисления объёмов тел вращения. Различные конфигурации круглых в плане поковок (см. рисунки 2.2 – 2.4) требуют внесения очевидных изменений в выражения (2.13) – (2.15), которые здесь не приводятся.

Расчёт массы поковки и её составляющих автоматизирован [168]. На рисунке 2.14 показано окно корректировки значений припусков на механическую обработку, допусков и кузнечных напусков поковки детали “Шестерня” (рисунки 2.7, 2.9), назначенных в соответствии с ГОСТ 7505-89 (см. рисунок 2.5), и результаты одного из вариантов исследования их влияния на металлоёмкость поковки.

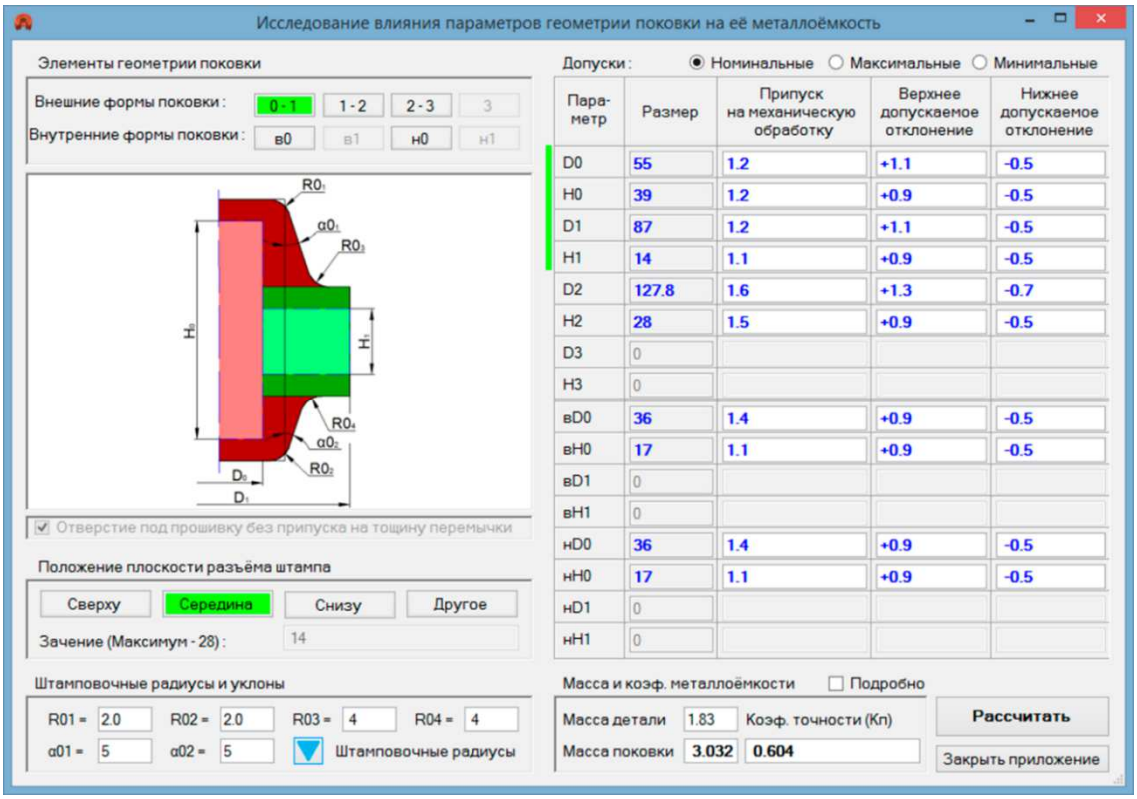


Рисунок 2.14 – Окно определения варьируемых параметров при исследовании металлоёмкости технологического процесса ГОШ круглых в плане поковок

На рисунке 2.15 и таблице 2.2 представлены результаты исследования влияния допусков на значение коэффициента точности поковки (см. рисунок 2.9), а также на доли её припусков, напусков, радиусов закруглений. Наибольшее влияние

на металлоёмкость поковки оказывают припуски на механическую обработку, наименьшее – штамповочные радиусы. Данное утверждение справедливо, если в дальнейшем, при механической обработке, допускается наличие радиуса на наружной кромке детали, в противном случае размер припуска, возможно, потребуется увеличить.

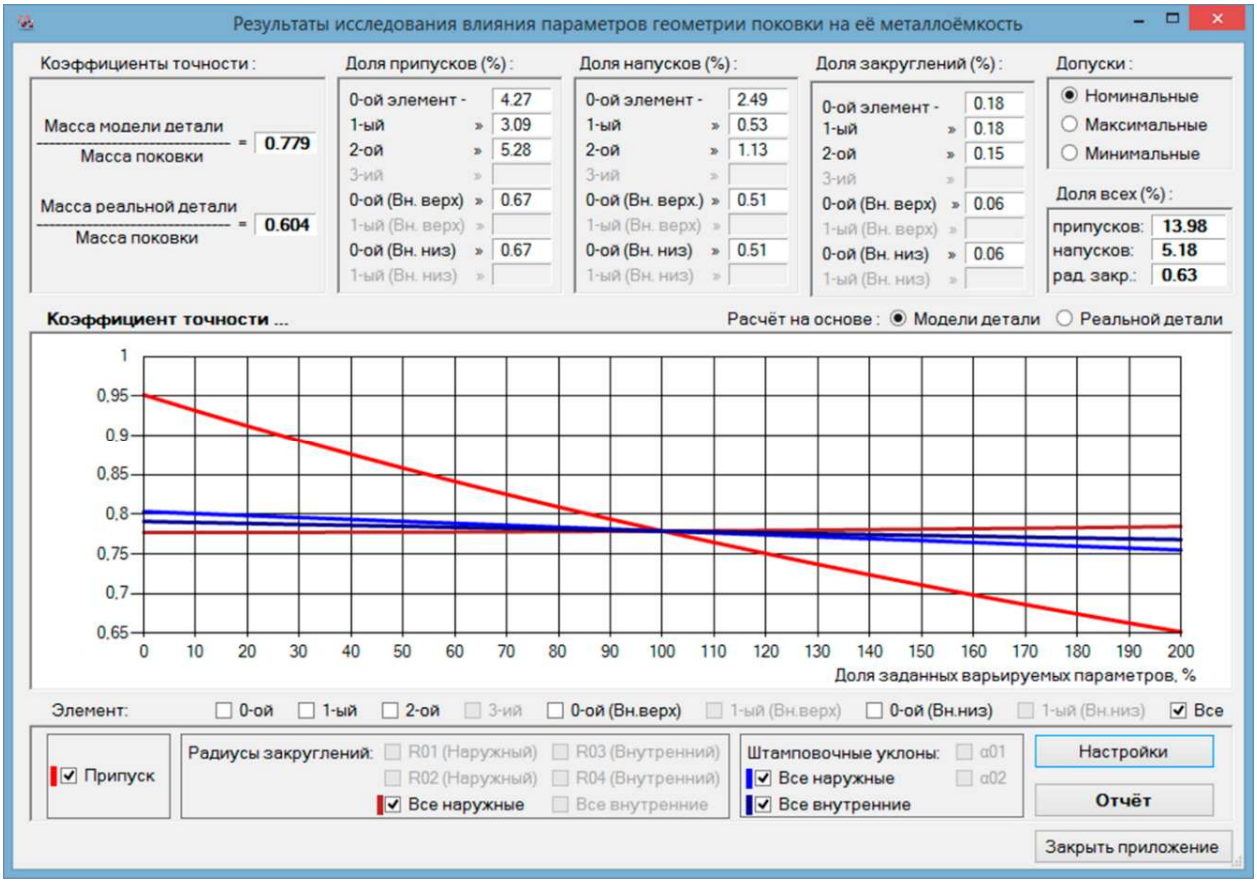


Рисунок 2.15 – Результаты исследования влияния размеров припусков, допусков и напусков на металлоёмкость поковки детали “Шестерня”

Таблица 2.2 – Результаты влияния величины допуска на массу поковки, припуски, напуски и коэффициент точности поковки $K_П$

Допуск	Масса поковки, кг	Доля от массы поковки в процентах			Коэффициент точности поковки $K_П$
		припусков	штамповочных уклонов	штамповочных радиусов	
Минимум	2.818	9.21	5.07	0.68	0.649
Номинал	3.032	13.98	5.18	0.63	0.604
Максимум	3.419	21.51	5.41	0.57	0.535

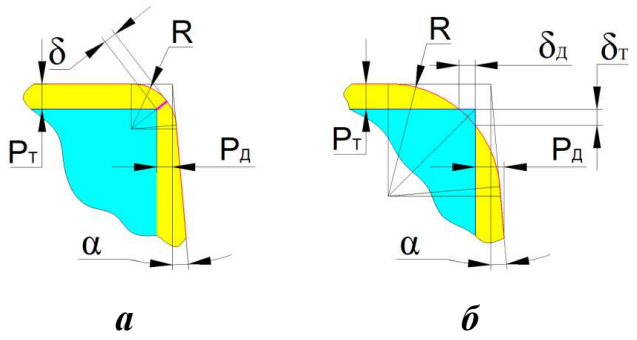
На рисунке 2.16 показаны два возможных варианта, возникающие при разработке чертежа поковки:

- значение $\delta \geq 0$ – установленные припуски и напуски позволяют корректно выполнить механическую обработку поверхностей поковки (рисунок 2.16*а*);
- значение $\delta < 0$ – корректное выполнение механической обработки поверхностей поковки невозможно (рисунок 2.16*б*). Требуется увеличение значение припуска на боковую поверхность на величину $\delta_Д$ или торцевую – на величину $\delta_Т$.

Значения δ, $\delta_Д$, $\delta_Т$ могут быть рассчитаны в соответствии с выражениями (2.16):

$$\begin{aligned}
&\delta = R - \sqrt{(R - P_Т)^2 + (R \cdot \cos\alpha - R \cdot \mathrm{tg}\,\alpha - P_Д)^2}, \\
&\delta_Д = R \cdot \cos\alpha - R \cdot \mathrm{tg}\,\alpha - P_Д - \sqrt{(2 \cdot R - P_Т) \cdot P_Т}, \\
&\delta_Т = R - P_Т - \sqrt{R^2 - (R \cdot \cos\alpha - R \cdot \mathrm{tg}\,\alpha - P_Д)^2}, \\
&R > P_Т, \qquad R > P_Д,
\end{aligned} \tag{2.16}$$

где R – радиус закругления наружного угла поковки, α – штамповочный уклон, $P_Т$ и $P_Д$ – припуски на торцевую и боковую поверхности цилиндра, уменьшенные на величины их нижних минимальных отклонений (см. рисунок 2.14).



а ***б***

Рисунок 2.16 – К расчёту значений припусков:
величина припусков достаточна (***а***) и недостаточна (***б***) для механической обработки

Следует отметить, что современные технологические процессы ГОШ, реализуемые на КГШП, проектируются со значениями припусков на механическую обработку и штамповочными уклонами меньшими, чем установленные ГОСТ 7505-89. Это обусловлено появлением новых, более качественных штамповых

сталей, и, соответственно, увеличением стойкости гравюр штампов, применением более современных конструкций выталкивателей, созданием новых технологических схем ГОШ, позволяющих заметно снизить технологические усилия штамповки [46, 82, 83, 86, 101]. В результате задача уменьшения значений припусков на механическую обработку, соответственно, – снижения металлоёмкости технологического процесса ГОШ, оказывается напрямую связанной с задачей уменьшения штамповочных радиусов. Однако её решение традиционными методами, как правило, не всегда возможно.

На рисунке 2.17 показаны результаты моделирования формирования поковки детали “Шестерня” на окончательном переходе. В отличие от рассмотренной выше технологической схемы (рисунок 2.11), здесь радиусы закруглений зубчатого венца уменьшены с 3 до 0.5 мм. Итог – увеличение технологического усилия в 1.35 раза.

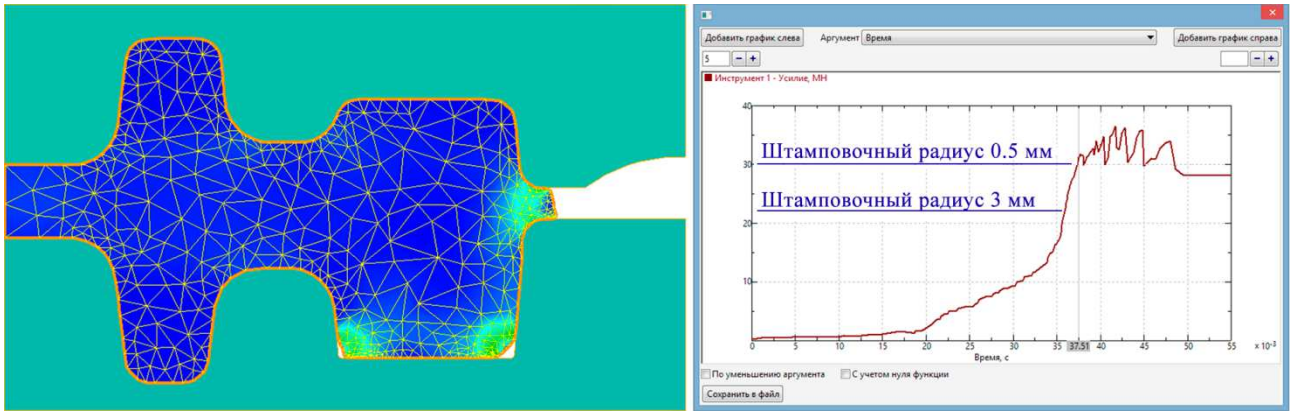


Рисунок 2.17 – Технологическое усилие штамповки поковки “Шестерня” на окончательном переходе необходимое для заполнения радиусов: 3 мм – 22.22 МН, 0.5 мм – 30.08 МН

Методика расчета коэффициента точности поковки на основе геометрии детали приведена в приложении Б.

2.3. Допускаемое усилие на ползуне пресса

Одним из важнейших показателей эффективности технологического процесса ГОШ на КГШП, наряду с металлоемкостью, является усилие на ползуне

пресса, возникающее в результате выполнения технологической операции. Этот показатель во многом определяет затраты производства, связанные с эксплуатацией оборудования (см. рисунок 2.1), в данном случае КГШП, и себестоимость производственного процесса в целом (см. раздел 1.1.2).

Количественно оценить усилие технологического процесса ГОШ можно в результате его численного моделирования, экспериментально или путём применения известных зависимостей [14, 19, 20, 46, 65 – 68, 169, 170]. В данной работе для этого будем использовать методы численного моделирования программы QForm 8 с последующей их экспериментальной (см. раздел 3.5) проверкой.

Технологическое усилие – это функция времени или перемещения ползуна (или главного вала), для количественной оценки будем использовать её максимальное P_{max} и среднее $P_{ср}$ значения, а также коэффициенты запаса прочности $K_{ЗС}$, ${}_{ср}K_{ЗС}$ (2.17) КГШП при выполнении технологической операции, минимальный и средний [46].

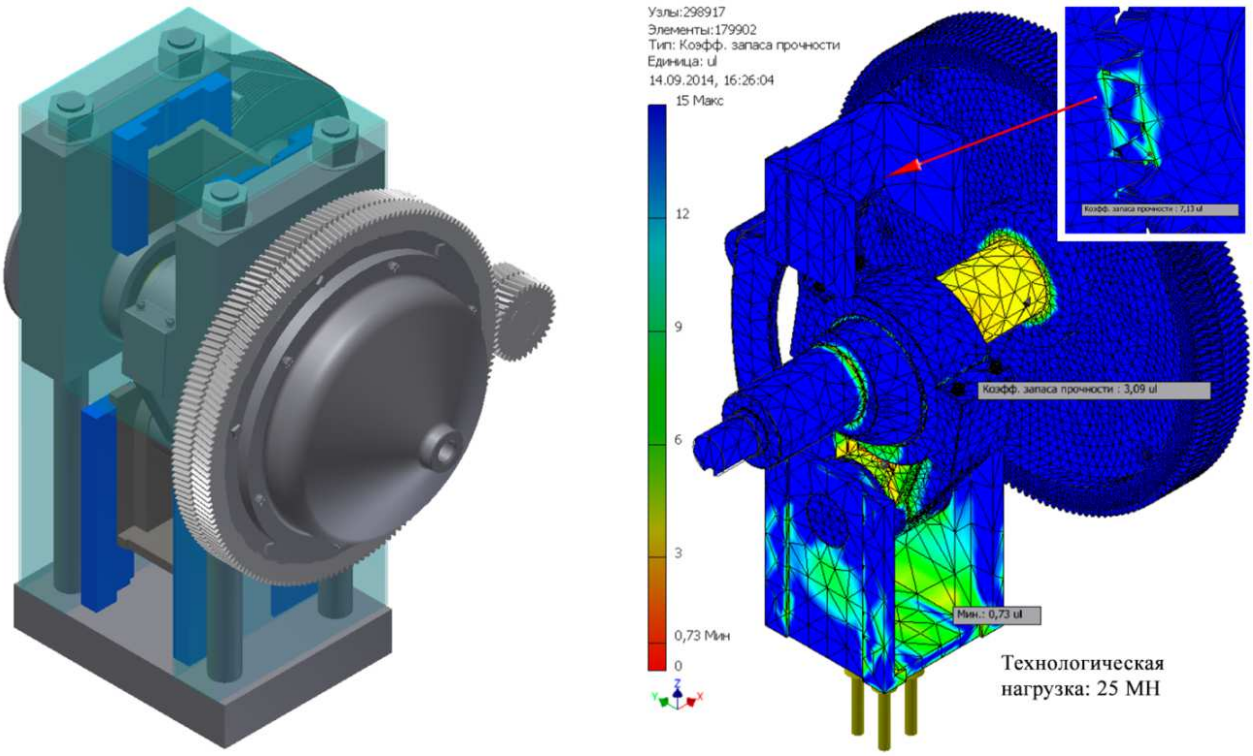
Критерий эффективности ${}_{ср}K_{ЗС}$ представляет собой отношение площадей под графиками допускаемых усилий на ползуне и усилия технологического.

$$K_{ЗС} = \min\left(\frac{P_{доп}}{P_C}\right) > 1, \qquad {}_{ср}K_{ЗС} = \frac{1}{T}\int_0^T \left|\frac{P_{доп}}{P_C}\right| \cdot dt > 1, \tag{2.17}$$

где $P_{доп}$, P_C – функции изменений допускаемых усилий на ползуне пресса [46, 73, 74, 143] и технологического усилия от времени перемещения ползуна, T – время полного оборота главного вала пресса.

Учитывая, что в настоящее время стоимость горячештамповочных прессов измеряется миллионами рублей и пропорциональна номинальному усилию, систему ГОШ – КГШП можно считать тем эффективнее, чем значение $K_{ЗС}$ ближе к единице ($K_{ЗС} \to 1$), а ${}_{ср}K_{ЗС}$ меньше (${}_{ср}K_{ЗС} \to min$).

На рисунке 2.19 представлены результаты расчёта допускаемых усилий на ползуне пресса модели К8544 на основе его твердотельной модели (см. рисунок 2.18*а*). Моделирование выполнено в программе Autodesk Inventor Professional 2014. Из расчётной схемы, при выполнении моделирования упругих деформаций пресса, из его модели исключён вал приводной и клиноремённая передача. Станина является частью расчётной модели, однако на рисунке 2.18*б* не показана (скрыта).



а ***б***

Рисунок 2.18 – К расчёту допускаемого усилия на ползуне

а – 3D-модель пресса, ***б*** – расчётная 3D-модель

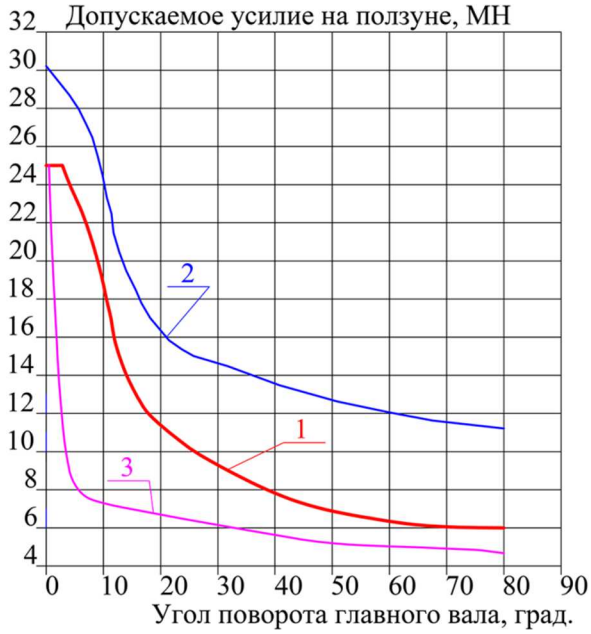


Рисунок 2.19 – Допускаемые усилия на ползуне пресса модели К8544:
1 – данные предприятия изготовителя, 2 – данные, рассчитанные на основе 3D-модели пресса (рабочий ход ползуна), 3 –данные, рассчитанные с учётом коэффициента запаса прочности при обратном ходе ползуна

Как следует из приведённых на рисунке 2.19 (кривые 1 и 2) результатов, расчётные значения допускаемых усилий пресса оказались в ≈1.8 раза больше данных его предприятия изготовителя, поскольку коэффициент запаса прочности при выполнении вычислений принимался равным единице.

Для гарантированной возможности реализации ГОШ на КГШП, график технологического усилия штамповки должен располагаться ниже графика допускаемого усилия на ползуне пресса (кривая 1 на рисунке 2.19). Традиционно рассматривается только прямой ход пресса (рабочий). При обратном ходе технологическое усилие штамповки полагается равным нулю. Соответственно и данные о прочности деталей главного исполнительного механизма пресса, в первую очередь шатуна, при работе их на растяжение не приводятся. На практике (см. раздел 2.5) сразу после сброса технологического усилия в начале обратного хода ползуна пресса в его деталях и узлах возникают динамические нагрузки, значения которых могут оказаться соизмеримыми с максимальными значениями усилий штамповки [73, 74, 143, 169, 177, 178]. На рисунке 2.19 (кривая 3) представлен график допускаемых усилий на ползуне при обратном ходе пресса, полученный на основе его 3D-моделирования с учётом коэффициента запаса прочности 1.8. При обратном ходе пресса при значениях угла поворота главного вала до ≈3° градусов, прочность элементов пресса определяется прочностью станины, затем, – прочностью на растяжение шатуна.

2.4. Влияние точности заготовки на эффективность ГОШ

Пределы изменения массы заготовки ($_{З}M_{min}$ и $_{З}M_{max}$), определяющие один из показателей эффективности технологической схемы ГОШ – коэффициент использования металла, рассчитываются в соответствии с разработанной автором в разделе 2.2.1 методикой.

Заготовка минимальной массы $_{З}M_{min}$ – гарантия бездефектной штамповки. Превышение массы заготовки некоторого максимального допустимого значения при выполнении операции ГОШ на КГШП, в соответствии с заданной технологической схемой, может привести к образованию дефектов (зажимов, складок).

При этом вероятны резкий рост силы пластического деформирования, превышающей возможности КГШП (см. раздел 2.3), а также превышение предельных значений напряжений в штамповых вставках, невозможность компенсации избытка металла при закрытой штамповке или размещения осаженной заготовки в штампе последующего перехода.

Показатель эффективности, определяющий возможность реализации технологической схемы ГОШ на КГШП определим выражением:

$$K_V = 1 - \frac{{}_{З}M_{\max} - {}_{З}M_{\min}}{{}_{П}M_{\max} - {}_{З}M_{\min}} = \frac{{}_{П}M_{\max} - {}_{З}M_{\max}}{{}_{П}M_{\max} - {}_{З}M_{\min}}, \qquad (2.18)$$

где ${}_{П}M_{max}$ – максимально допустимая масса поковки, полученной после первого формообразующего перехода. Если заготовка круглого сечения, возможна (2.18) замена значения масс (${}_{П}M_{max}$, ${}_{З}M_{max}$, ${}_{З}M_{min}$) заготовки соответствующими значениями её длин (высот).

Условие возможности реализации технологической схемы ГОШ $0 \le K_V \le 1$. Технологический процесс ГОШ тем эффективнее, чем больше K_V, т.е. $K_V \to 1$.

Рассмотрим методику оценки эффективности различных технологических схем ГОШ на КГШП [19, 46, 82, 83, 85, 179, 180 и др.] на примере изготовления поковки детали “Шестерня” (см. рисунке 2.7). Материал заготовки – круг горячекатаный (ГОСТ 2590-2006) диаметром 70 мм, точности прокатки Б1. Отрезка производится на сортовых ножницах. Нагрев – пламенный. Длины заготовки: ${}_{З}L_{min}$ = 101.5 мм, ${}_{З}L_{max}$ = 109.7 мм.

1. Открытая штамповка. Чертёж поковки [80] представлен на рисунке 2.9. Результаты моделирования процесса ГОШ – рисунок 2.11.

КГШП К8542 – номинальное усилие 16 МН. ${}_{З}L_{min}$ = 101.5 – технологическое усилие 14.4 МН; ${}_{П}L_{max}$ = 102.5 – технологическое усилие ≈16.1 МН; ${}_{П}L_{max} < {}_{З}L_{max}$. В соответствие с (2.18) K_V = -7.2. Вывод: данная технологическая схема не может быть реализована на КГШП К8542.

КГШП К8544 – номинальное усилие 25 МН. ${}_{З}L_{min}$ = 101.5 – технологическое усилие 14.4 МН; ${}_{П}L_{max} > 109.7$ – технологическое усилие ≈22 МН; ${}_{П}L_{max} > {}_{З}L_{max}$.

Технологическое усилие не растёт при длине заготовки свыше 108 мм и не превышает допустимых значений (см. рисунки 2.19 и 2.20). В соответствие с (2.18) K_V > 0. Вывод: данная технологическая схема реализуема на КГШП К8544.

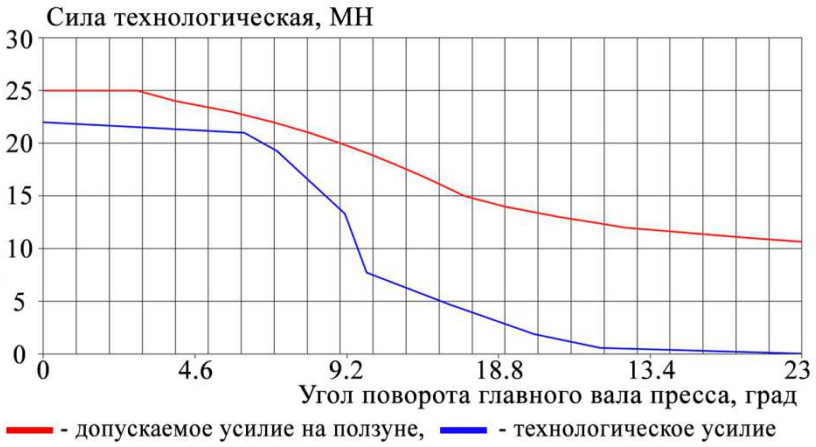


Рисунок 2.20 – Допускаемые усилия на ползуне пресса модели К8544

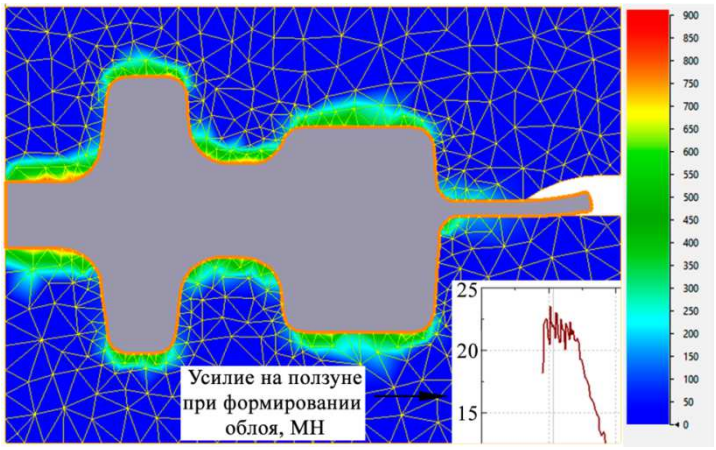


Рисунок 2.21 – Эквивалентные напряжения по Мизесу [181, 182] в штамповых ставках

2. Бесподпорная штамповка [46, 82, 83, 85, 169, 179, 180, 183]. На рисунке 2.22 представлены результаты моделирования процесса ГОШ на КГШП К8542. В данном случае технологическое усилие штамповки при увеличении массы заготовки практически не растёт, оставаясь в пределах 13.5 МН. На рисунке 2.22 показаны результаты моделирования процесса ГОШ при длине заготовки $_{П}L_{max}$ = 112 мм. В соответствие с (2.18) K_V = 0.22 > 0. Вывод: данная технологическая схема реализуема на КГШП К8542.

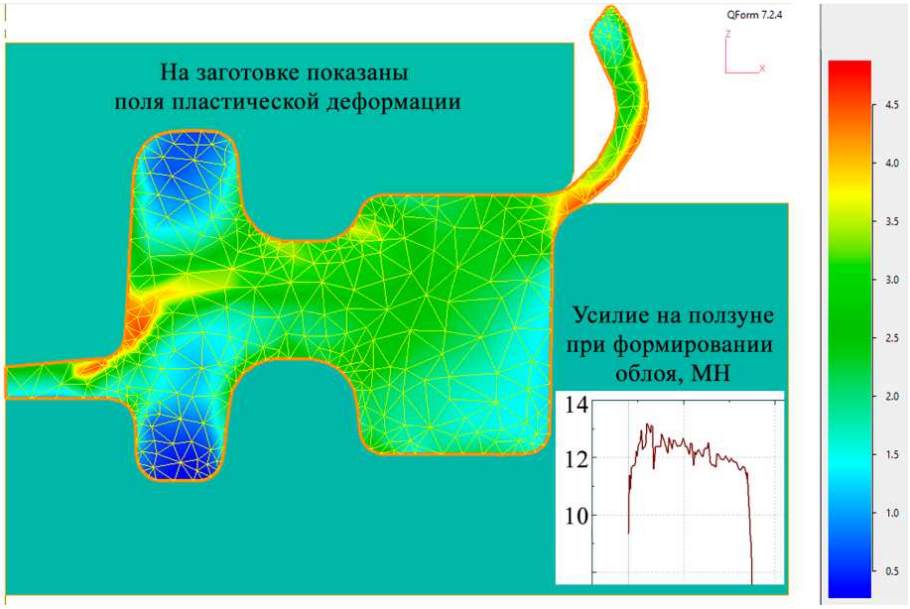


Рисунок 2.22 – Моделирование технологического процесса ГОШ. Бесподпорная штамповка

3. Закрытая штамповка. КГШП К8544. Результаты моделирования при массе заготовки, соответствующей её длине 106.0 мм представлены на рисунке 2.23. Максимальная высота заготовки, при котором усилие штамповки не превышает допустимые пределы составляет ${}_{П}L_{max} \approx 105{,}5$ мм. $K_V = -1.05 < 0$. Вывод: данная технологическая схема не может быть реализована на КГШП К8544.

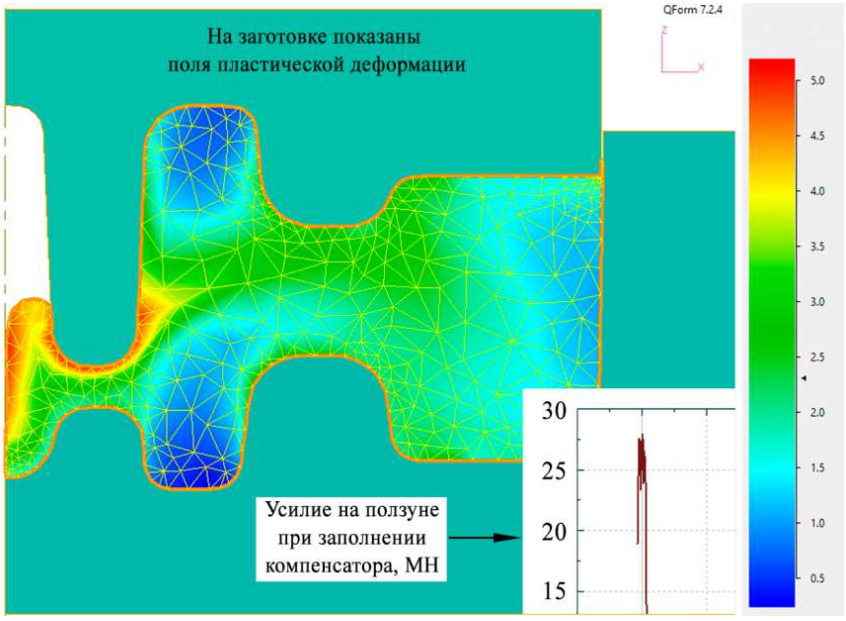


Рисунок 2.23 – Моделирование технологического процесса ГОШ. Закрытая штамповка

2.5. Исследование влияния технологического процесса ГОШ на динамику КГШП

Скорость работы современных КГШП – десятки ходов в минуту, масса циклически перемещающихся частей – сотни килограмм. Технологические усилия на исполнительном звене (ползуне) пресса при этом могут достигать десятков меганьютонов. Так, например, производительность кривошипного горячештамповочного пресса модели К8544 (Воронежского завода тяжёлых механических прессов), твердотельная модель которого представлена на рисунке 2.18*а*, составляет 60 ходов в минуту при технологическом усилии до 25 МН и общей массе подвижных частей исполнительного механизма (эксцентриковый вал, шатун, ползун) свыше 20 тонн.

Возможность КГШП к реализации данного процесса ГОШ ограничивается графиком допускаемых усилий на его ползуне (см. раздел 2.3). Возникающие при этом динамические нагрузки, влияние которых на работоспособность и долговечность узлов пресса достаточно существенно [46, 74, 77 – 79, 143], если и учитываются, то по методикам [46, 74, 77, 79, 143], не позволяющим одновременно выполнить комплексную оценку всех видов (растяжение-сжатие, кручение, изгиб) колебательных процессов в КГШП (см. раздел 1.3).

2.5.1. Моделирование динамических процессов в механизмах КГШП

Моделирование динамических процессов в механизмах машин осуществляется на основе их динамических моделей [127, 130]. В данном исследовании используется дискретная модель, представляющая собой конечную систему сосредоточенных масс, находящуюся под воздействием внешних сил, соединённых между собой безынерционными, упруго-диссипативными или кинематическими, нелинейными, кусочно-непрерывными связями [79, 126, 130, 131]. Если модель является голономной, стационарной системой, находящейся в консервативном

поле, то движение её масс может быть описано уравнением Лагранжа 2-го рода. Поскольку связи между элементами кривошипного пресса (ползун – шатун – главный вал) не являются линейными, при разработке системы уравнений движения масс модели – математической модели КГШП, целесообразно использовать особую форму уравнений Лагранжа-2-го рода с “лишними” координатами [79, 126].

Динамическая модель КГШП представлена на рисунке 2.24.

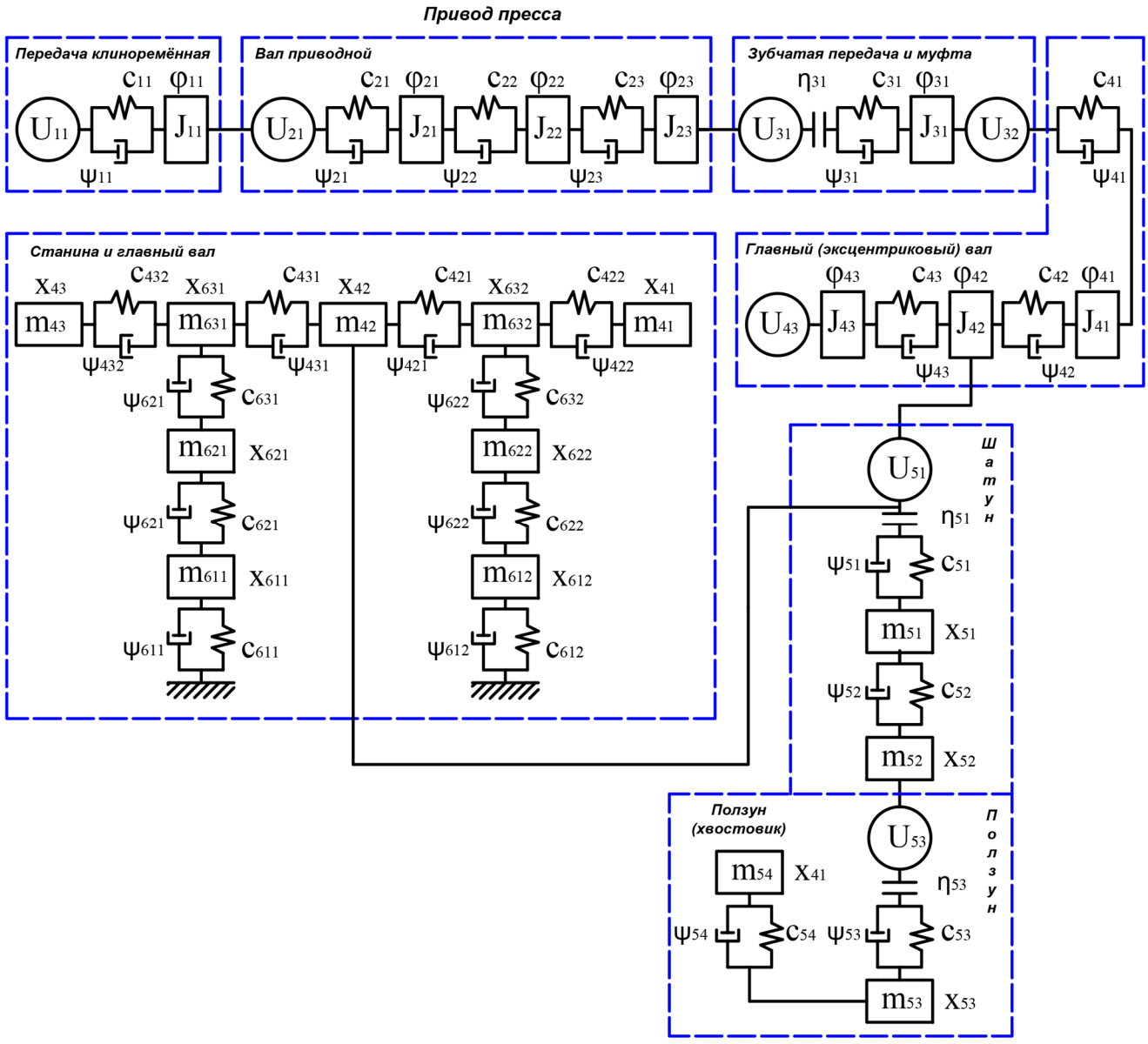


Рисунок 2.24 – Динамическая модель кривошипного горячештамповочного пресса

Требования, предъявляемые к динамической модели КГШП, при её разработке, следующие:

- результаты, получаемые на основе модели должны количественно и качественно соответствовать реальным данным. Экспериментальные исследования, подтверждающие адекватность динамической модели реальному кривошипному прессу, в работе не проводились. Однако, поскольку основные механизмы КГШП: ремённые передачи, валы, кривошипно-ползунные механизмы (см. рисунок 2.24) – являются хорошо изученными, а методы их моделирования теоретически и экспериментально обоснованными [132 – 134, 139, 140, 148, 177], модели, построенные на базе уже достоверных моделей, также можно считать с большой долей вероятности достоверными;
- при выполнении на КГШП технологической операции можно выделить два этапа. Первый этап соответствует углу поворота главного вала ориентировочно от 0 до 160 градусов. При этом главный вал пресса работает в основном на кручение (см. рисунок 2.18), деформация станины незначительна, а максимальные силы, воздействующие на элементы пресса минимальны. Второй этап, когда угол поворота главного вала лежит в пределах от ≈160 до 180 градусов и технологические нагрузки в прессе резко увеличиваются до максимальных значений. На этом этапе доля крутильных деформаций главного вала уменьшается, но резко возрастают доли деформаций его изгиба и растяжения-сжатия станины. Таким образом, динамическая модель пресса должна корректно учитывать, как крутильные колебания главного вала и его привода, растяжения-сжатия шатуна и ползуна пресса, так и изгибные колебания главного вала и станины пресса;
- наличие зазоров в кинематических цепях механизма оказывают значительное влияние на его динамику [46, 79, 133, 134, 139, 140, 148, 150, 177, 184], соответственно их учёт при разработке динамической модели пресса обязателен;
- кривошипный пресс, как правило, может работать как в автоматическом режиме, так и режиме одиночных ходов. В последнем случае следует ожидать заметный рост динамических процессов в его механизмах, связанный с разгоном значительных масс (до нескольких тонн) в течение малых проме-

жутков времени (в пределах одной секунды), что и должно учитываться при разработке динамической модели.

Составляющие динамической модели (механизмы КГШП), на рисунке 2.24 они ограничены штриховыми линиями синего цвета, представлены на рисунке 2.25.

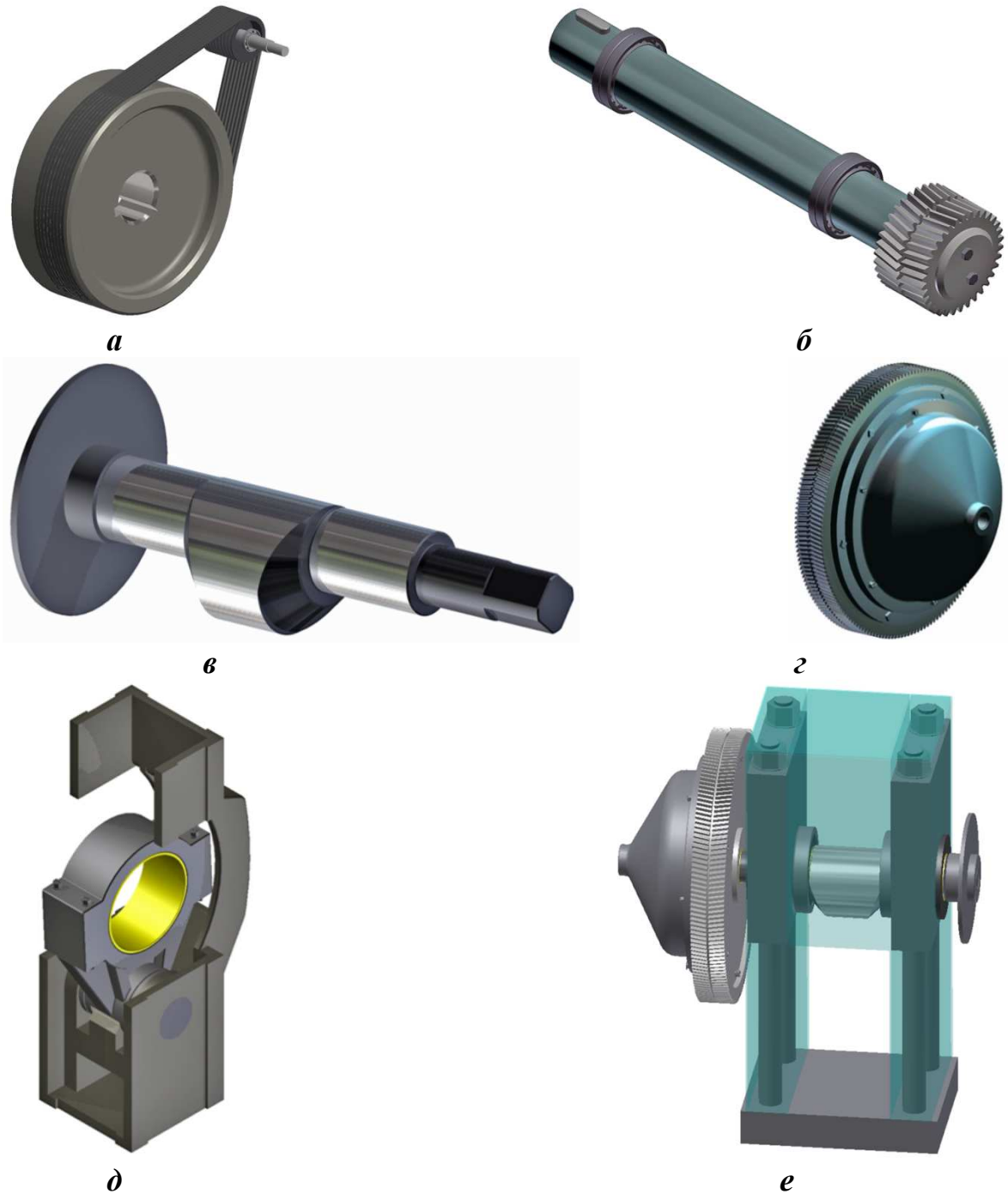


Рисунок 2.25 – Элементы динамической модели пресса:
а – передача клиноремённая, ***б*** – вал приводной; ***в*** – вал главный,
г – зубчатое колесо с муфтой, ***д*** – шатун и ползун, ***е*** – станина с главным валом, зубчатым колесом и муфтой

Уравнения движения их масс автором получены на основании уравнений Лагранжа 2-го рода. Расчётные зависимости и пояснения приведены ниже.

Ремённая передача (см. рисунок 2.25*а*). Динамические процессы моделируются одномассовой колебательной системой. Скорость движения шкива электродвигателя считается постоянной ($\omega = const$). Уравнения движения шкива, расположенного на приводном вале:

$$J_{11}\ddot{\varphi}_{11} = -c_{11}(\varphi_{11} - i_{11}\cdot\omega\cdot t) - b_{11}(\dot{\varphi}_{11} - i_{11}\cdot\omega) + \Omega_{12} + W_{11}, \qquad (2.19)$$

где $\varphi_{11}, \dot{\varphi}_{11}, \ddot{\varphi}_{11}$ – перемещение (угол поворота), скорость и ускорение массы модели (шкива), J_{11} – её момент инерции, c_{11} и b_{11} – упругая и диссипативная характеристики [79, 126] ремней передачи, i_{11} – передаточное число, W_{11} – внешние силы, воздействующие на шкив ($W_{11} = 0$).

Отдельные механизмы КГШП взаимосвязаны между собой. В (2.19) Ω_{12} – воздействие на выходное звено ремённой передачи (шкив) входного звена следующего за ним механизма (вал приводной).

Вал приводной (см. рисунок 2.25*б*). Динамическая модель приводного вала трёхмассовая колебательная система. Её уравнения движения:

$$\begin{cases} J_{21}\ddot{\varphi}_{21} = -c_{21}(\varphi_{21} - U_{21}(\varphi_{11})) - b_{21}(\dot{\varphi}_{21} - U'_{21}(\varphi_{11})\cdot\dot{\varphi}_{11}) + \\ \qquad + c_{22}(\varphi_{22} - \varphi_{21}) + b_{22}(\dot{\varphi}_{22} - \dot{\varphi}_{21}) + W_{21} \\ J_{22}\ddot{\varphi}_{22} = -c_{22}(\varphi_{22} - \varphi_{23}) - b_{22}(\dot{\varphi}_{22} - \dot{\varphi}_{23}) + \\ \qquad + c_{23}(\varphi_{23} - \varphi_{22}) + b_{23}(\dot{\varphi}_{23} - \dot{\varphi}_{22}) + W_{22} \\ J_{23}\ddot{\varphi}_{23} = -c_{23}(\varphi_{23} - \varphi_{22}) - b_{23}(\dot{\varphi}_{23} - \dot{\varphi}_{22}) + \Omega_{23} + W_{23} \end{cases}, \qquad (2.20)$$

$$\Omega_{12} = (c_{21}(\varphi_{21} - U_{21}(\varphi_{11})) + b_{21}(\dot{\varphi}_{21} - U'_{21}(\varphi_{11})\cdot\dot{\varphi}_{11}))\cdot U'_{21}(\varphi_{11}), \qquad (2.21)$$

где $\varphi_{2n}, \dot{\varphi}_{2n}, \ddot{\varphi}_{2n}$ – перемещения, скорости и ускорение n-ой массы модели (n = 1, 2, 3); J_{2n}, c_{2n}, b_{2n} – инерционные, упругие и диссипативные характеристики модели; W_{2n} – внешние силы, воздействующие на массы модели, в данном случае это силы трения [79]; U_{21}, U'_{21} – функция положения входной массы модели в зависимости от пе-

ремещения предыдущей массы (φ_{11}) и её производная по φ_{11} – аналог скорости [126, 130]. В данном случае $U_{21}(\varphi_{11}) = \varphi_{11}$, $U'_{21}(\varphi_{11}) = 1$.

Зубчатая передача и муфта (см. рисунок 2.25*г*). В зубчатом зацеплении имеется зазор. Динамическая модель зубчатой передачи – одномассовая колебательная система. Её уравнение движения:

$$J_{31}\ddot{\varphi}_{31} = -c_{31}(\varphi_{31} - U_{31}(\varphi_{23})) - b_{31}(\dot{\varphi}_{31} - U'_{31}(\varphi_{23}) \cdot \dot{\varphi}_{23}) + \Omega_{34} \cdot U'_{32} + W_{31}, \qquad (2.22)$$

где J_{31}, c_{31}, b_{31} – инерционные и упруго-диссипативные характеристики модели, W_{31} – внешние нагрузки ($W_{31} = 0$), Ω_{34} – воздействие предыдущего звена (главного вала) на выходную массу модели (зубчатое колесо).

$U_{32} = \varphi_{31}$ – пресс работает в автоматическом режиме. При моделировании включения или выключения муфты предполагается, что закон изменения ускорение её дисков – синусоидальный [177]:

$$U_{32} = \frac{\pi \cdot (\varphi_{31} + \varphi_{\text{вм}}) - \varphi_{\text{р}} \cdot \sin\left(\frac{\pi}{\varphi_{\text{р}}}(\varphi_{31} - \varphi_{\text{вм}})\right)}{2\pi},$$
$$U'_{32} = 0.5 \cdot \left(1 - \cos\left(\frac{\pi}{\varphi_{\text{р}}}(\varphi_{31} - \varphi_{\text{вм}})\right)\right). \qquad (2.23)$$

В режиме рабочего хода ($\varphi_{\text{вт}} \geq \varphi_{31} \geq \varphi_{\text{вм}} + \varphi_{\text{р}}$): $U_{32} = \varphi_{31}$, где $\varphi_{\text{вм}}$, $\varphi_{\text{р}}$ – углы включения и разгона муфты, $\varphi_{\text{вт}}$, $\varphi_{\text{т}}$ – углы выключения муфты и торможения.

На участке торможения связь с приводом разорвана – $\Omega_{34} = 0$.

$$\Omega_{23} = (c_{31}(\varphi_{31} + U_{31}(\varphi_{23})) + b_{31}(\dot{\varphi}_{31} - U'_{31}(\varphi_{23}) \cdot \dot{\varphi}_{23})) \cdot U'_{31} \qquad (2.24)$$

Главный вал (см. рисунок 2.25*в*). Трёхмассовая динамическая модель. Уравнения движения модели на участке включения муфты, прямого хода и обратного хода ползуна до включения режима торможения (или при работе пресса в автоматическом режиме):

$$\begin{cases} J_{41}\ddot{\varphi}_{41} = -c_{41}(\varphi_{41} - U_{32}(\varphi_{31})) - b_{41}(\dot{\varphi}_{41} - U'_{32}(\varphi_{31}) \cdot \dot{\varphi}_{31}) + \\ \qquad + c_{42}(\varphi_{42} - \varphi_{41}) + b_{42}(\dot{\varphi}_{42} - \dot{\varphi}_{41}) + W_{41} \\ J_{42}\ddot{\varphi}_{42} = -c_{42}(\varphi_{42} - \varphi_{43}) - b_{42}(\dot{\varphi}_{42} - \dot{\varphi}_{43}) + \\ \qquad + c_{43}(\varphi_{43} - \varphi_{42}) + b_{43}(\dot{\varphi}_{43} - \dot{\varphi}_{42}) + \Omega_{45} + W_{42} \\ J_{43}\ddot{\varphi}_{43} = -c_{43}(\varphi_{43} - \varphi_{42}) - b_{43}(\dot{\varphi}_{43} - \dot{\varphi}_{42}) + W_{43} \end{cases} . \quad (2.25)$$

При работе пресса в режиме одиночных ходов на участке торможения ($\varphi_{вт} + \varphi_{т} \geq \varphi_{42} \geq \varphi_{вт}$):

$$\begin{cases} J_{41}\ddot{\varphi}_{41} = -c_{41}(\varphi_{41} - \varphi_{42}) - b_{41}(\dot{\varphi}_{41} - \dot{\varphi}_{42}) + W_{41} \\ J_{42}\ddot{\varphi}_{42} = -c_{43}(\varphi_{42} - U_{43}) - b_{43}(\dot{\varphi}_{42} - U'_{43} \cdot \dot{\varphi}_{42}) + \\ \qquad + c_{42}(\varphi_{42} - \varphi_{41}) + b_{42}(\dot{\varphi}_{42} - \dot{\varphi}_{41}) + \Omega_{45} + W_{42} \end{cases} . \quad (2.26)$$

В уравнениях (2.25) – (2.26) $\varphi_{4n}, \dot{\varphi}_{4n}, \ddot{\varphi}_{4n}$ (n = 1 … 3) – перемещения (углы поворота), скорости и ускорения масс модели; J_{4n}, c_{4n}, b_{4n} – инерционные и упруго-диссипативные характеристики модели; W_{4n} – внешние нагрузки на массы модели, в данном случае, моменты сил трения.

Если пресс работает в автоматическом режиме, его воздействие массу J_{43} отсутствует ($U_{43} = \varphi_{43}$). В режиме одиночных ходов закон изменения ускорения дисков тормоза – синусоидальный:

$$U_{43} = \frac{\pi \cdot (\varphi_{43} + \varphi_{вт}) - \varphi_m \cdot \sin\left(\frac{\pi}{\varphi_m}(\varphi_{43} - \varphi_{вт} + \varphi_m)\right)}{2\pi}. \quad (2.27)$$

Если тормоз включён, как отмечалось выше, $\Omega_{34} = 0$, в противном случае:

$$\Omega_{34} = -c_{41}(\varphi_{41} - U_{32}(\varphi_{31})) - b_{41}(\dot{\varphi}_{41} - U'_{32}(\varphi_{31}) \cdot \dot{\varphi}_{31}), \quad (2.28)$$

где Ω_{34} – воздействие входного звена данного механизма (главный вал) на выходное звено механизма ему предшествующего (зубчатое колесо – муфта).

Главный исполнительный механизм пресса (см. рисунок 2.25*д*) включает два звена: шатун и ползун.

Шатун моделируется двухмассовой колебательной системой, работающей только на растяжение-сжатие. Жёсткости при растяжении и сжатии различны.

Ползун – двухмассовая колебательная система. В соединениях главный вал – шатун и шатун – ползун предполагается наличие зазоров.

Выражение, устанавливающее связь между перемещением ползуна и углом поворота главного вала $U_{51}(\varphi_{42})$ [74, 79, 143]:

$$\begin{aligned} U_{51} &= R\cdot(1-\cos(\varphi_{42})+L-\sqrt{L^2-2R\cdot\sin(\varphi_{42})},\\ U'_{51} &= R\cdot\sin(\varphi_{42})\cdot\left(1+\frac{R}{\sqrt{L^2-2R\cdot\sin(\varphi_{42})}}\right),\\ U_{53} &= x_{52},\ U'_{53}=1, \end{aligned} \tag{2.29}$$

где R и L – радиус и длина шатуна соответственно.

Уравнения движения масс главного исполнительного механизма КГШП:

$$\begin{cases} m_{51}\ddot{x}_{51} = -c_{51}(x_{51}-U_{51}) - b_{51}(\dot{x}_{51}-U'_{51}\cdot\dot{\varphi}_{42}) + \Omega_{56} \\ \qquad\qquad + c_{52}(x_{52}-x_{51}) - b_{52}(\dot{x}_{52}-\dot{x}_{51}) + W_{51} \\ m_{52}\ddot{x}_{52} = -c_{52}(x_{52}-x_{51}) - b_{52}(\dot{x}_{51}-\dot{x}_{51}) + \\ \qquad\qquad + c_{53}(x_{53}-U_{53}) - b_{53}(\dot{x}_{53}-U'_{53}\cdot\dot{x}_{52}) + W_{52}\ , \\ m_{53}\ddot{x}_{53} = -c_{53}(x_{53}-U_{53}) - b_{53}(\dot{x}_{53}-U'_{53}\cdot\dot{x}_{52}) + \\ \qquad\qquad + c_{54}(x_{54}-x_{53}) - b_{54}(\dot{x}_{54}-\dot{x}_{53}) + W_{53} \\ m_{54}\ddot{x}_{54} = -c_{54}(x_{54}-x_{53}) - b_{54}(\dot{x}_{54}-\dot{x}_{53}) + W_{54} \end{cases} \tag{2.30}$$

$$\Omega_{45} = c_{51}(x_{51}-U_{51}) + b_{51}(\dot{x}_{51}-U'_{51}\cdot\dot{\varphi}_{42})\,. \tag{2.31}$$

В уравнениях (2.29) – (2.31) $x_{5n},\ \dot{x}_{5n},\ \ddot{x}_{5n}$ – линейные перемещения, скорости и ускорения масс кривошипно-ползунного механизма (n = 1 … 4); m_{5n}, c_{5n}, b_{5n} – массы и упруго-диссипативные характеристики модели; W_{5n} – внешние нагрузки: силы трения (силы трения, усилие уравновешивателя ползуна, технологическая

нагрузка); Ω_{45} – воздействие шатуна пресса на его главный вал; Ω_{56} – воздействие системы станина – главный вал (с зубчатым колесом и тормозом) на шатун.

Станина пресса (см. рисунок 2.25*е*). Девятимассовая динамическая модель, уравнения движения масс которой:

$$\begin{cases} m_{611}\ddot{x}_{611} = -c_{611}(x_{611}) - b_{611}(\dot{x}_{611}) \\ m_{621}\ddot{x}_{621} = -c_{621}(x_{621} - x_{611}) - b_{621}(\dot{x}_{621} - \dot{x}_{611}) \\ m_{631}\ddot{x}_{631} = -c_{631}(x_{631} - x_{621}) - b_{631}(\dot{x}_{631} - \dot{x}_{621}) \\ \qquad + c_{431}(x_{631} - x_{42}) + b_{431}(\dot{x}_{631} - \dot{x}_{42}) \\ \qquad + c_{432}(x_{631} - x_{43}) + b_{432}(\dot{x}_{631} - \dot{x}_{43}) \\ m_{612}\ddot{x}_{612} = -c_{612}(x_{612}) - b_{612}(\dot{x}_{612}) \\ m_{622}\ddot{x}_{622} = -c_{622}(x_{622} - x_{612}) - b_{622}(\dot{x}_{622} - \dot{x}_{612}) \\ m_{632}\ddot{x}_{632} = -c_{632}(x_{632} - x_{622}) - b_{632}(\dot{x}_{632} - \dot{x}_{622}) \\ \qquad + c_{421}(x_{632} - x_{42}) + b_{421}(\dot{x}_{632} - \dot{x}_{42}) \\ \qquad + c_{422}(x_{632} - x_{41}) + b_{422}(\dot{x}_{632} - \dot{x}_{41}) \\ m_{41}\ddot{x}_{41} = -c_{422}(x_{41} - x_{632}) - b_{422}(\dot{x}_{41} - \dot{x}_{632}) \\ m_{43}\ddot{x}_{43} = -c_{432}(x_{43} - x_{631}) - b_{432}(\dot{x}_{43} - \dot{x}_{631}) \\ m_{42}\ddot{x}_{42} = -c_{51}(x_{42} - x_{51} + U_{51}) - b_{51}(\dot{x}_{42} - \dot{x}_{51} + U'_{51} \cdot \dot{\varphi}_{42}) + \\ \qquad + c_{421}(x_{42} - x_{632}) + b_{421}(\dot{x}_{42} - \dot{x}_{632}) + \\ \qquad + c_{431}(x_{42} - x_{631}) + b_{431}(\dot{x}_{42} - \dot{x}_{631}). \end{cases} \tag{2.32}$$

$$\Omega_{56} = c_{51}(x_{42} - x_{51} + U_{51}) + b_{51}(\dot{x}_{42} - \dot{x}_{51} + U'_{51} \cdot \dot{\varphi}_{42}). \tag{2.33}$$

Массы левой ($i = 1$) и правой ($i = 2$) стоек станины обозначены m_{6ni} – $n = 1 \ldots 3$. Массы m_{42} – эксцентрик, m_{41} – муфта, m_{43} – тормоз главный вал. Деформация растяжение–сжатие и изгиб, который рассчитывается как отклонение фрагмента главного вала в результате воздействия на него силы. В обозначения соответствующих жёсткостей $(c_{421}, c_{422}, c_{431}, c_{432})$ и коэффициентов диссипации $(\psi_{421}, \psi_{422}, \psi_{431}, \psi_{432})$ главного вала добавлен третий индекс, указывающий на отличие характера деформации (изгиб вместо кручения).

Учёт зазоров в кинематических парах механизмов КГШП выполнялся в соответствии с методикой, предложенной в работе [43]. Использовался наиболее приближенный к реальности вариант, согласно которому жёсткость соединения при пересопряжении зазоров изменяется по синусоидальному закону в соответствии с рисунком 2.26.

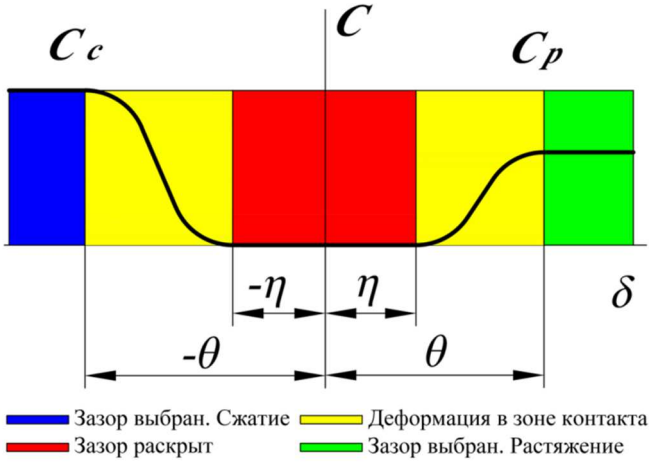


Рисунок 2.26 – Учёт зазоров в кинематических парах

Полагая $\theta > 0$, $|\theta - \eta| > 0$, $\eta = \theta \cdot (1 - k)$, будем иметь следующие расчётные зависимости для определения жёсткости:

- зазор раскрыт:

$$-\eta \le x - U \le +\eta, \quad \delta = x - U, \quad c = 0; \tag{2.34}$$

- зазор выбран (сжатие):

$$x - U < -\eta, \quad \delta = x - U + \eta, \quad c = 0.5 \cdot c_c \cdot (\sin(\pi \cdot \frac{x - U - 0.5 \cdot (\theta + \eta)}{\theta - \eta}) + 1),$$

$$x - U \le -\theta, \; c = c_c; \tag{2.35}$$

- зазор выбран (растяжение):

$$x - U > +\eta, \quad \delta = x - U - \eta, \quad c = 0.5 \cdot c_{\text{р}} \cdot (\sin(\pi \cdot \frac{x - U - 0.5 \cdot (\theta + \eta)}{\theta - \eta}) + 1).$$

$$x - U > \theta, \; c = c_p. \tag{2.36}$$

Полагая, что силы трения (P_{TP}) и моменты сил трения (M_{TP}) в кинематических парах, в соответствии с законом Кулона:

$$P_{TP} = P_{норм} \cdot K_{TP},$$
$$M_{TP} = P_{норм} \cdot K_{TP} \cdot \rho_{TP}, \quad (2.37)$$

где K_{TP} – коэффициент трения, а ρ_{TP} – радиус трения.

Параметр диссипации энергии (b) в уравнениях движения масс динамической модели связан с коэффициентом диссипации (ψ) следующим соотношением [79]:

$$b = -\frac{2\ln(1-\psi)\sqrt{ac(\ln^2(1-\psi)+16\pi^2)}}{\ln^2(1-\psi)+16\pi^2}, \quad (2.38)$$

где a – инерционная характеристика элемента (масса или момент инерции), c – его жёсткость.

Упруго-инерционные характеристики модели, – её моменты инерции, массы и жёсткости, рассчитывались на основании 3D-модели пресса в системе твердотельного моделирования Autodesk Inventor Professional 2014, по методики, предложенной в работах [46, 79, 150].

2.5.2. Оценка влияния технологического процесса ГОШ на динамику КГШП

В результате решения уравнений движения масс динамической модели (см. рисунок 2.24) – математической модели (2.19) – (2.38), могут быть найдены для любого момента времени:

- кинематические параметры элементов пресса (перемещения, скорости и ускорения);
- силы или моменты сил, возникающие вследствие деформации элементов пресса:

$$P = c \cdot (x - U) \quad \text{или} \quad M = c \cdot (\varphi - U), \quad (2.39)$$

где c – жёсткость элемента, а $x - U$ или $\varphi - U$, его деформация.

Выполнить качественную оценку уровня динамических процессов в КГШП можно на основании построенных графических зависимостей для элементов пресса, важнейшими среди которых являются нагрузки, рассчитанные в соответствии с (2.39), скорости и ускорения, а также диаграммы пересопряжения зазоров:

$$\begin{aligned} &K_{зазор} = 0, \quad \text{если зазор раскрыт (2.34);} \\ &K_{зазор} = +\frac{c}{c_c}, \ \text{если зазор выбран – сжатие (2.35);} \\ &K_{зазор} = -\frac{c}{c_p}, \ \text{если зазор выбран – растяжение (2.36).} \end{aligned} \tag{2.40}$$

Для количественной оценки уровня динамических процессов в элементах КГШП, будем использовать следующие показатели:

1. Коэффициенты запаса по статическим (см. рисунок 2.19) и динамическим усилиям, минимальные и средние:

$$\begin{aligned} &K_{ЗС} = \min\left(\frac{P_{доп}}{P_C}\right), \qquad ср K_{ЗС} = \frac{1}{T}\int_0^T \left|\frac{P_{доп}}{P_C}\right| \cdot dt, \\ &K_{ЗД} = \min\left(\frac{P_{доп}}{P_Д}\right), \qquad ср K_{ЗД} = \frac{1}{T}\int_0^T \left|\frac{P_{доп}}{P_Д}\right| \cdot dt. \end{aligned} \tag{2.43}$$

2. Максимальные и минимальные значения динамических нагрузок:

$$P_{max} = max(P_Д),\ P_{min} = min(P_Д). \tag{2.44}$$

3. Средние значения динамических нагрузок:

$$ср P_Д = \frac{1}{T}\int_0^T c(t) \cdot \left|x(t) - U(t)\right| \cdot dt \quad \text{или} \quad ср M_Д = \frac{1}{T}\int_0^T c(t) \cdot \left|\varphi(t) - U(t)\right| \cdot dt\,. \tag{2.45}$$

4. Среднее значение коэффициента пересопряжения зазоров:

$$ср K_{зазор} = \frac{1}{T}\int_0^T \left|K_{зазор}(t)\right| \cdot dt\ .$$

$K_{зазор} = 0$, если зазор раскрыт (2.36);

$$K_{зазор} = +\frac{c}{c_c}, \text{ если зазор выбран – сжатие (2.37);} \quad (2.46)$$

$$K_{зазор} = -\frac{c}{c_p}, \text{ если зазор выбран – растяжение (2.38).}$$

5. Количество пересопряжений в кинематической паре в течение рабочего хода пресса:

$N_{зазор} = N_{зазор} + 1$, если $K_{зазор}$ изменяет знак. (2.47)

6. Коэффициент динамичности по средней нагрузке:

$$_{ср}K_{Д} = \frac{_{ср}P_{Д}}{_{ср}P_{СТ}} \text{ или } _{ср}K_{Д} = \frac{_{ср}M_{Д}}{_{ср}M_{СТ}}, \quad (2.48)$$

где $_{ср}P_{СТ}$, $_{ср}M_{СТ}$ – среднее статическая сила или момент силы.

7. Коэффициент динамичности по максимальной нагрузке:

$$_{max}K_{Д} = \frac{_{max}P_{Д}}{_{max}P_{СТ}} \text{ или } _{max}K_{Д} = \frac{_{max}M_{Д}}{_{max}M_{СТ}}, \quad (2.49)$$

где $_{max}P_{СТ}$, $_{max}M_{СТ}$ – среднее статическая сила или момент силы.

Деформация и соответствующая ей сила отрицательны, если они имеют одно направление технологической силой. Экстремальные и средние усилия в элементах КГШП определяют его работоспособность, износостойкость и долговечность.

Среднее значение коэффициента пересопряжения зазоров в кинематической паре, как и количество таких пересопряжений, напрямую связано с её износом. Однако данные критерии следует использовать в комплексе со средним усилием. Так, например, увеличением усилия уравновешивателя ползуна, можно полностью исключить все пересопряжения зазоров в КГШП, при росте нагрузок в элементах пресса и снижения, или даже потери, его работоспособности.

При исследовании динамики кривошипных прессов, в качестве коэффициентов динамичности будем использовать выражения (2.48) и (2.49). Коэффициент

$_{max}K_Д$ характеризует прочность деталей пресса. Коэффициент $_{ср}K_Д$ – косвенно определяющий износ и усталостное разрушение деталей пресса.

2.5.3. Система компьютерного моделирования динамики КГШП

Для решения уравнений математической модели, расчёта критериев интенсивности динамических процессов в КГШП и анализа результатов предлагается использовать методы компьютерного моделирования. Разработанное автором программное решение (см. Приложение В) [185], позволяет:

- систематизировать процесс ввода параметров динамической модели пресса и, в известной степени, тестирования их значений;
- исследовать влияние конструктивных параметров пресса на интенсивность динамических процессов;
- определить возможность применения пресса для штамповки в соответствии с данной технологической схемы;
- сравнить динамические показатели эффективности возможных технологических схем изготовления одной и той же поковки.

На рисунке 2.27 показано основное окно ввода параметров динамической модели пресса. Предполагается, что пресс состоит из шести механизмов, приведённых на рисунке 2.25, плюс ещё один механизм, – тормоз, воздействие которого сводится лишь появлению статической силы (2.27) в момент торможения. Организация данных в виде такой структуры позволяет автоматически отслеживать нарушение её целостности и облегчить контроль значений параметров, вводимых пользователем.

Технологическое усилие и допускаемое усилие на ползуне пресса задаются кусочно-линейными функциями. Контроль данных технологического усилия и предварительная оценка возможности осуществления соответствующей ГОШ выполняются визуально (см. рисунок 2.28).

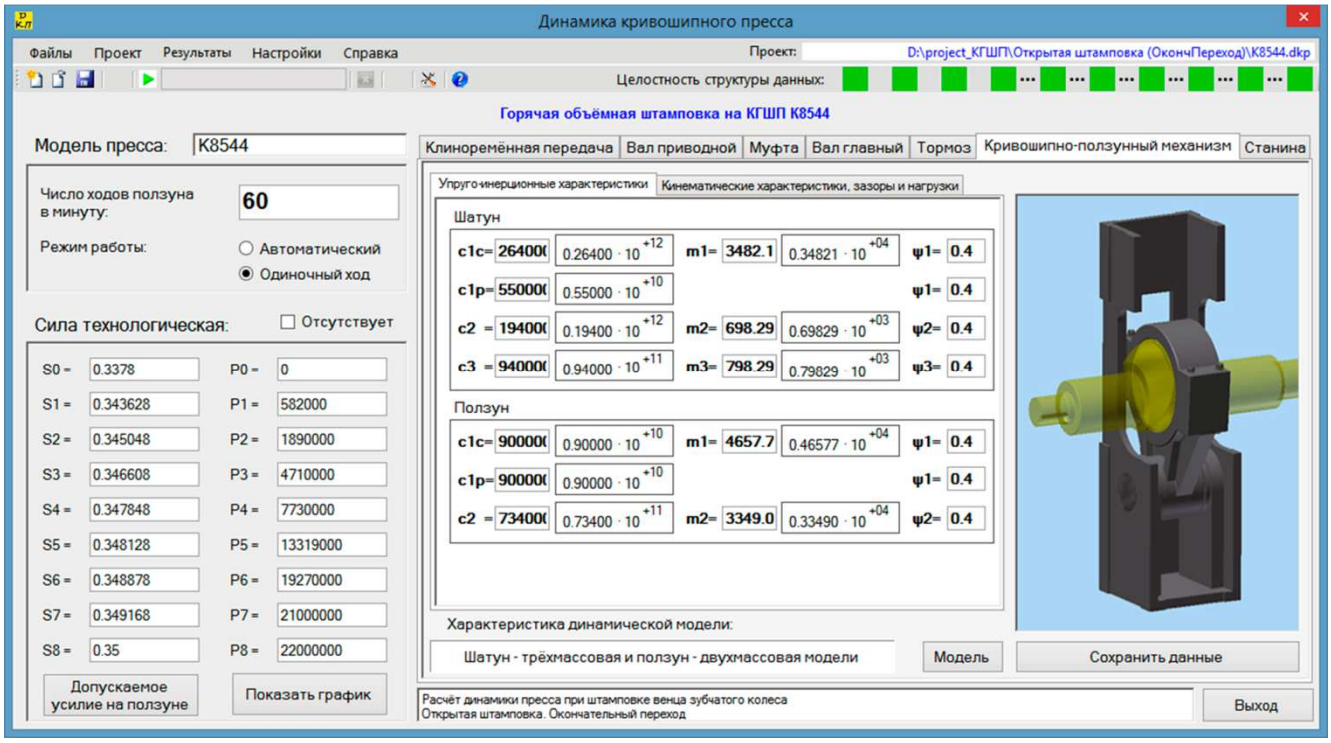


Рисунок 2.27 – Окно ввода программы исследования динамики кривошипного пресса (ДКП)

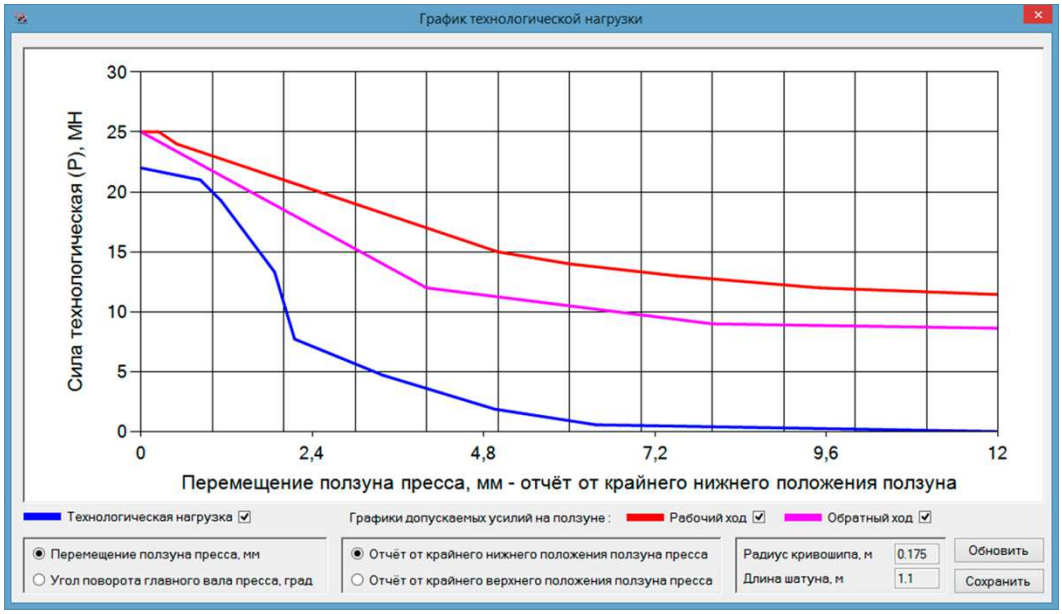


Рисунок 2.28 – Графики технологического усилия и допускаемых усилий на ползуне пресса (КГШП модели К8544)

Программное решение ДКП (Динамика кривошипного пресса) позволяет исследовать влияние различных конструкционных параметров пресса на интенсивность динамических процессов, протекающих в его элементах. Соответству-

ющие исследования можно выполнить, как изменяя значения данных динамической модели (см. рисунок 2.27), так и путём исключения из расчёта некоторых данных в окне (см. рисунок 2.29), появляющимся после ввода команды на выполнения расчётов.

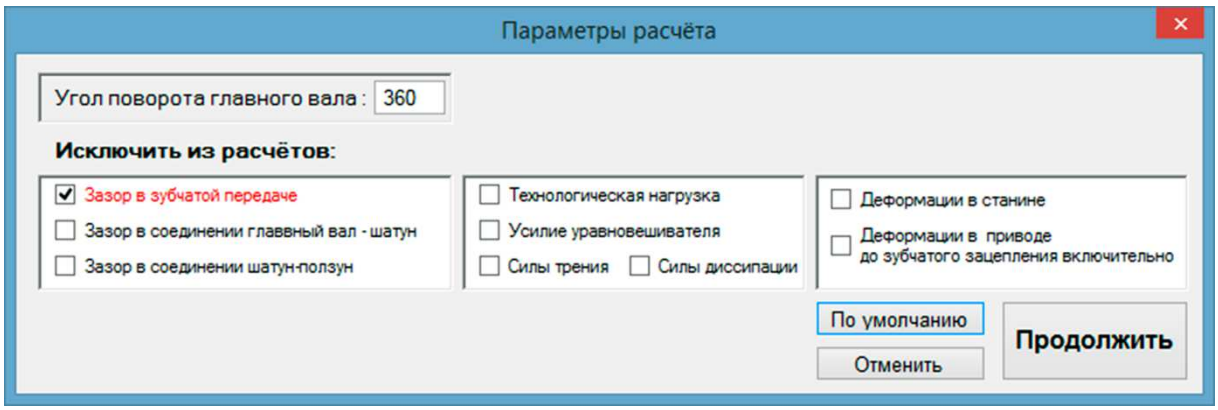


Рисунок 2.29 – Исключение из расчёта некоторых возможностей модели пресса

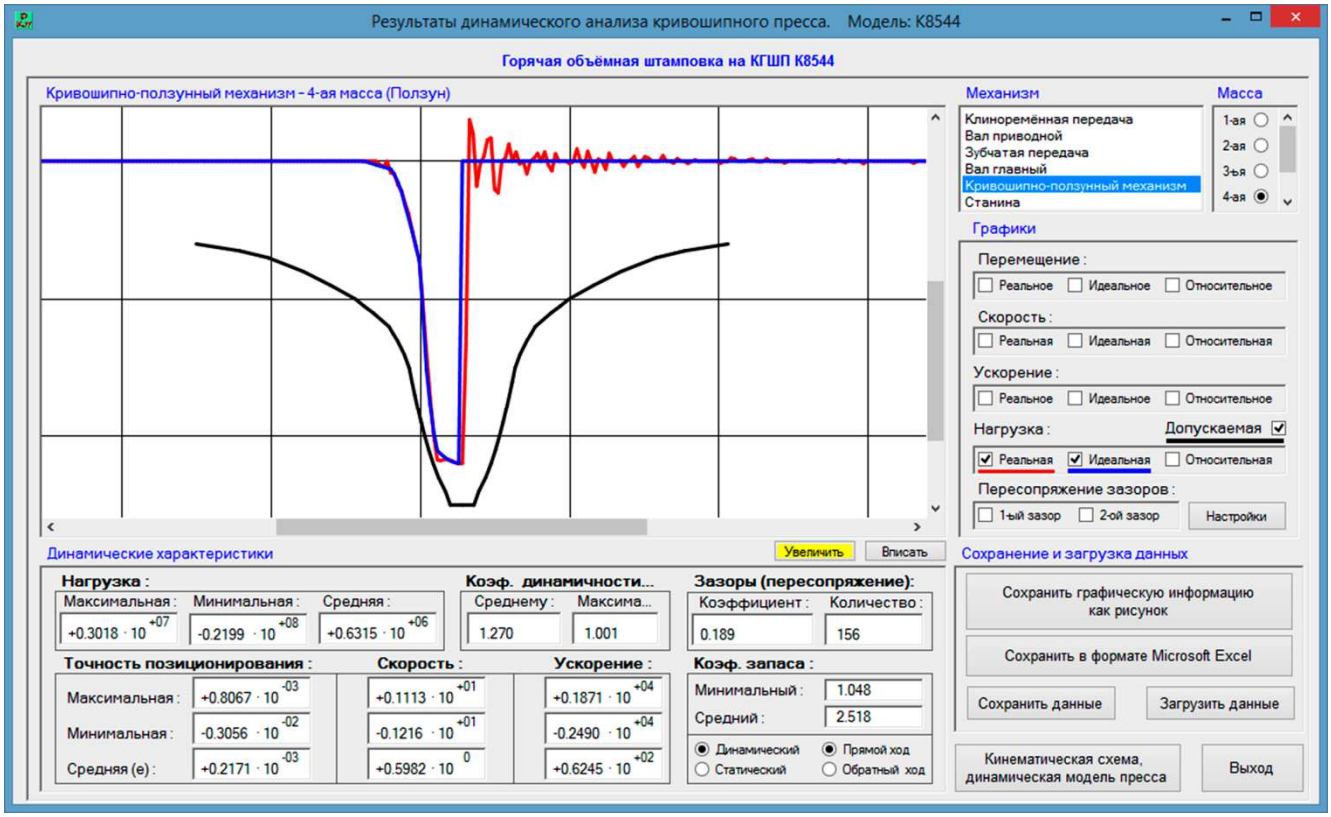


Рисунок 2.30 – Окно результатов расчёта программы ДКП

Информация о динамических процессах в любом из элементов пресса (см. рисунок 2.30) может быть представлена как в виде графиков, так и значений критериев эффективности (см. раздел 2.5.2).

Методика оценки условий работы КГШП при выполнении операции ГОШ на основе исследования его динамики приведена в приложении В.

2.6. Выводы

1. Разработана методика построения структуры данных формы детали и автоматизации на её основе процесса создания прототипа чертежа круглой в плане поковки, позволяющая автоматизировать процесс:

- исследования металлоёмкости различных вариантов её технологических схем горячей объёмной штамповки на КГШП;
- оценки влияния величин припусков на механическую обработку, допусков и кузнечных напусков на металлоёмкость процесса ГОШ на КГШП.

2. Разработана методика оценки влияния операций отрезки и нагрева заготовок из круглого сортового проката различной точности на металлоёмкость технологического процесса ГОШ, позволяющая рассчитать коэффициент использования металла, как в зависимости от указанных выше факторов, так и от применяемого варианта технологической схемы ГОШ.

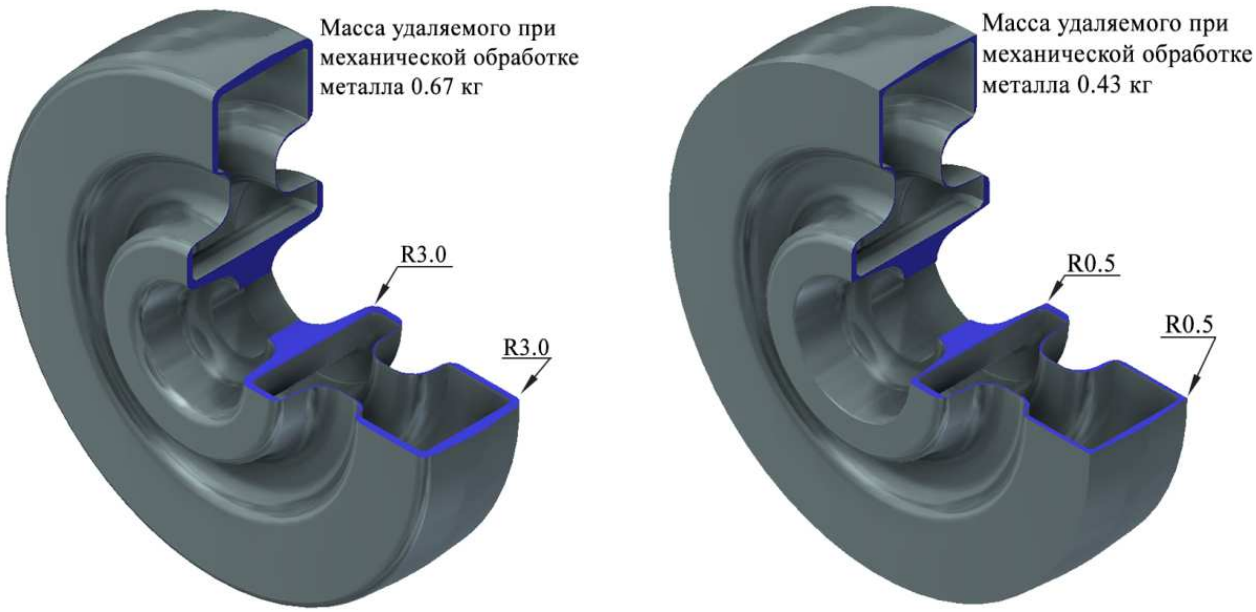
3. Разработана методика, позволяющая исследовать влияние технологической схемы ГОШ на уровень динамических процессов в КГШП и, тем самым, оценить условие его работы.

4. Определена система показателей, позволяющая выполнить сравнительный анализ применения различных вариантов технологических схем изготовления круглых в плане поковок способом ГОШ на КГШП.

5. Процесс оценки эффективности вариантов технологических схем ГОШ круглых в плане поковок на КГШП реализован в виде программ для ЭВМ, позволяющих автоматизировать как процесс расчётов, так и подготовки данных путём возможности подключения к программам баз, содержащих информацию из различных стандартов (ГОСТ 7505-89, ГОСТ 2590-2006, ГОСТ 7417-75 и др.) и параметры динамических моделей прессов.

3. РАЗРАБОТКА РЕСУРСОСБЕРЕГАЮЩЕЙ ТЕХНОЛОГИИ ШТАМПОВКИ КРУГЛЫХ В ПЛАНЕ ПОКОВОК НА КГШП

В разделе 2.2.2 разработана методика расчёта значений припусков на механическую обработку ((2.16) и рисунок 2.16). Результаты исследований, выполненные на её основе, показывают, что уменьшение значения штамповочных радиусов обрабатываемых поверхностей поковки позволяют заметно снизить металлоёмкость технологического процесса ГОШ, – значения показателей $К_И$, $_{min}К_И$ и $К_П$ (2.11), (2.12). На рисунке 3.1 приведены результаты исследования возможного снижения металлоёмкости изготовления детали “Шестерня” (см. рисунок 2.7) при уменьшении штамповочных радиусов поковки (см. рисунок 2.9) с 3.0 мм до 0.5 мм.



а ***б***

Рисунок 3.1 – Масса металла, удаляемого при механической обработке поковки: штамповочный радиус ***а*** – 3.0 мм, ***б*** – 0.5 мм

В таблице 3.1 приведены результаты оценки эффективности технологического процесса ГОШ в зависимости от значений штамповочных радиусов (см. рисунок 3.1). При расчёте коэффициента металлоёмкости $К_П$ предполагалось, что уменьшение штамповочного радиуса до 0.5 мм позволило снизить значения припусков на обрабатываемые поверхности до 1 мм (≈30%).

Таблица 3.1 – Результаты оценки влияний значений штамповочных радиусов на эффективность технологического процесса ГОШ

Штамповочный радиус, мм	Показатели металлоёмкости			Технологическое усилие, необходимое для формирования штамповочных радиусов, МН
	$K_П$	$K_И$	$_{min}K_И$	
3.0	0.779	0.563	0.541	22.22
0.5	0.831	0.610	0.586	30.08

Данные, представленные в таблице 3.1, получены для открытой штамповки (см. рисунки 2.11, 2.17). При этом потребовалось уменьшить толщину облоя на окончательном переходе до 2 мм. Рекомендуемая толщина облоя [19] – 3 мм. Попытка сформировать на данной поковке радиусы равные 0.5 мм способом беспод-порной штамповки (см. рисунок 2.22) оказалась неудачной.

Уменьшение штамповочных радиусов требует применения для реализации технологических процессов ГОШ более мощных и, соответственно, дорогостоящих КГШП, ведёт к снижению прочности штамповых вставок, их более интенсивному износу, хотя и позволяет заметно снизить, в рассматриваемом случае на 13%, расход металла.

Очевидно, изготовление поковок с минимальными радиусами возможно лишь на основе новых технологических схем штамповки. Такие схемы, как показано в первой главе данной работы, известны [86, 169, 179], однако, для их высокоэффективной практической реализации необходимы специальные исследования, связанные с разработкой соответствующих методик расчёта.

3.1. Технологические схемы ГОШ поковок с выступами, формируемыми на предварительном переходе

Технические решения, предложенные в работе [86], позволяют уменьшить штамповочные радиусы поковки, получаемой на окончательном переходе за счёт формирования выступов на торцевых сторонах и прилегающих к боковым по-

верхностям, у её полуфабриката. Металл, образующий выступы, на окончательном переходе перемещается в тело поковки. Возможны следующие возможные варианты реализации данного решения:

1. Выступы формируются на предварительном переходе в закрытом штампе.
2. Выступы формируются на предварительном переходе в открытом штампе.
3. Деформация выступов на окончательном штамповочном переходе осуществляется:
    - способом закрытой штамповки;
    - способом открытой штамповки.

3.1.1. Моделирование процесса формирования на предварительном переходе выступов способом закрытой штамповки

На рисунке 3.2 показаны результаты численного моделирования ГОШ поковки “Шестерня” (см. рисунок 2.7) на предварительном переходе из осаженной цилиндрической заготовки способом закрытой штамповки. Геометрия выступа – окружности радиусом 3 мм и 10 мм. Высота заготовки от 94 до 102 мм. Диаметр – 70 мм.

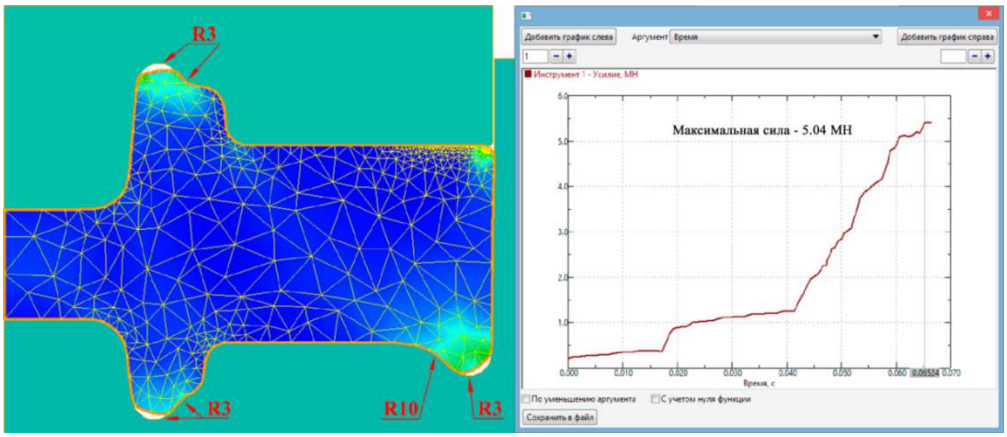


Рисунок 3.2 – ГОШ поковки “Шестерня”. Предварительный переход

На всех рисунках данной главы, демонстрирующих процесс моделирования, цветная заливка обозначает скорость пластического деформирования. Синий – минимальную (нулевую), красный – максимальную.

Одним из основных требований к геометрии поковки, штампуемой на предварительном переходе, является наличие не полностью сформированных выступов при использовании заготовок определённой точности (см. раздел 2.2.1). Последнее требование, неполное заполнение гравюры штампа, формирующей выступ, позволяет, в соответствии с принципом свободных поверхностей [82], минимизировать технологическое усилие штамповки.

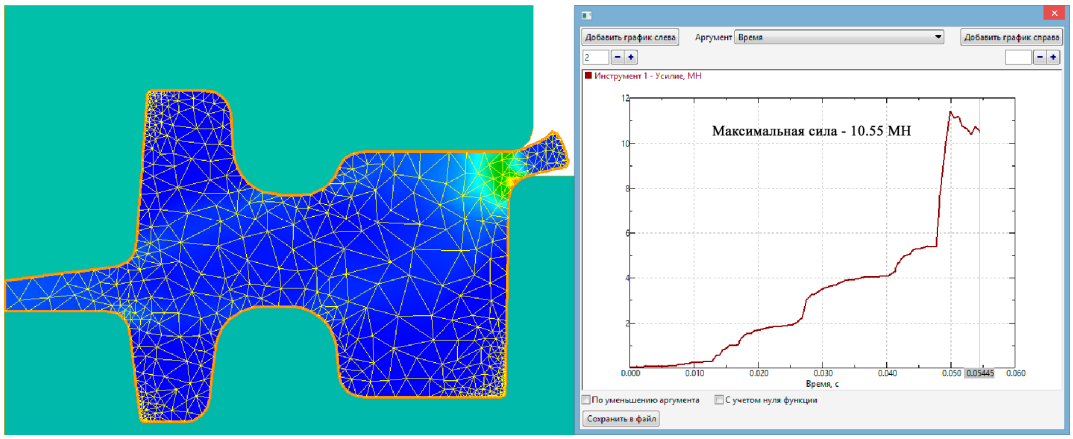


Рисунок 3.3 – ГОШ поковки “Шестерня”. Окончательный переход

Для гарантированного образования выступа на предварительном переходе в рассматриваемом случае применена закрытая штамповка. Полости выступов в гравюрах штампа, при реализации данного технологического процесса могут исполнять роль компенсаторов излишков металла.

При проектировании окончательного перехода применён принцип бесподпорной штамповки [82, 83, 85]. Результаты моделирования процесса ГОШ на окончательном переходе приведены на рис. 3.3.

3.1.2. Моделирование процесса формирования на предварительном переходе выступов способом открытой штамповки

В данном разделе рассматривается технология изготовления поковки детали “Шестерня” (см. рисунок 2.7) методом ГОШ. Формообразование поковки, как и в предыдущем разделе, осуществляется в два перехода. Однако способ штамповки на предварительном переходе – открытый. Геометрия поковки предварительного

перехода отличается от геометрии поковки окончательного перехода только наличием выступов. Геометрия выступа – окружности радиусом 3 мм и 10 мм. Высота заготовки от 96 до 104 мм. Диаметр – 70 мм.

На рисунке 3.4 представлены результаты численного моделирования ГОШ поковки “Шестерня” на предварительном переходе из осаженной цилиндрической заготовки способом открытой штамповки.

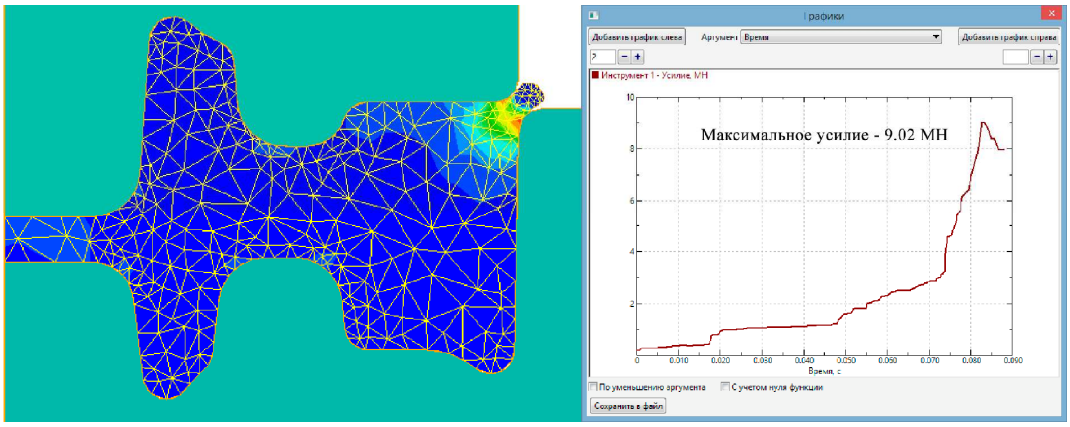


Рисунок 3.4 – ГОШ поковки “Шестерня”. Предварительный переход

При реализации данной технологической схемы штамповки формирование выступов осуществляется одновременно с облоем, что объясняет увеличение минимальной массы поковки.

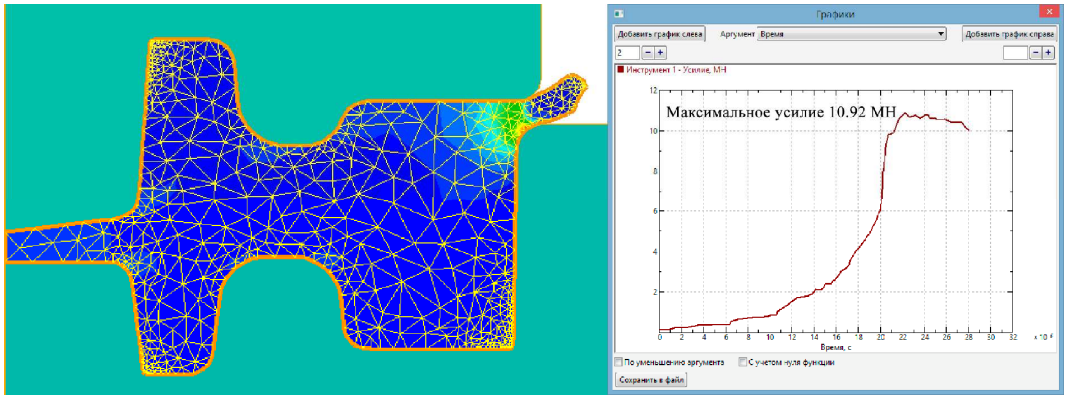


Рисунок 3.5 – ГОШ поковки “Шестерня”. Окончательный переход

На рисунке 3.5 приведены результаты моделирования формообразования поковки на окончательном переходе. Как и в предыдущем варианте (см. рисунок 3.3), здесь также применён способ бесподпорной штамповки.

На рисунке 3.6 представлены результаты моделирования ещё одного варианта изготовления поковки детали “Шестерня”, используемого для изготовления поковок рассматриваемого типа [19] – штамповка в закрытом штампе. Параметры заготовки и предварительный переход в точности соответствуют предыдущему варианту (см. рисунок 3.4).

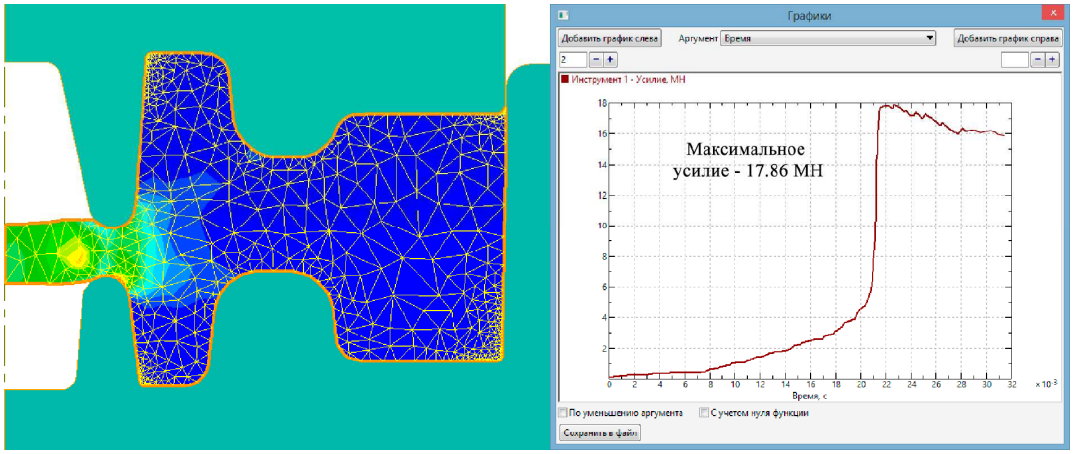


Рисунок 3.6 – ГОШ поковки “Шестерня”. Окончательный переход

Точная конфигурация самой поковки на окончательном переходе (см. рисунок 3.6) формируется за счёт перераспределения металла выступов. Для компенсации незначительного избытка металла, появление которого возможно вследствие различного рода неточностей, предусмотрен компенсатор.

3.1.3. Анализ результатов исследования различных схем штамповки круглой в плане поковки с формируемыми на предварительном переходе технологическими выступами

В качестве базовых вариантов при выполнении анализа эффективности предложенных автором технологических схем штамповки (см. разделы 3.1.1 и 3.1.2) используется технологическая схема штамповки, рассмотренная в разделе 2.4 (см. рисунок 2.22).

Во всех исследуемых вариантах применялась заготовка из сортового проката по ГОСТ 2590-2006. Точность – Б1. Номинальный диаметр – 70 мм. Нагрев –

пламенный на природном газе. Отрезка – сортовые ножницы. Сталь марки 40Х ГОСТ 4543-71. Температура нагрева – 1000°С. Масса заготовок (её высота) в зависимости от варианта технологической схемы, определялась в соответствии с методикой, разработанной в разделе 2.2.1. Масса готовой детали – 1.83 кг.

Первый базовый вариант – бесподпорная штамповка поковки детали "Шестерня" (см. рисунок 2.7). Размеры поковки в соответствие с ГОСТ 7505-89, в том числе штамповочные радиусы – 3 мм.

Минимальная высота заготовки – 99 мм, максимальная – 107 мм.

Коэффициент использования металла ($K_И$) – 0.583

Минимальный коэффициент использования металла ($_{min}K_И$) – 0.563

Критерий эффективности K_V выполняется:

$$K_V = 1 - \frac{{}_З M_{\max} - {}_З M_{\min}}{{}_П M_{\max} - {}_З M_{\min}} = \frac{{}_П M_{\max} - {}_З M_{\max}}{{}_П M_{\max} - {}_З M_{\min}} = \frac{{}_П L_{\max} - {}_З L_{\max}}{{}_П L_{\max} - {}_З L_{\min}},$$

где ${}_З L_{min}$ = 99 мм, ${}_З L_{max}$ = 107 мм, ${}_П L_{max}$ 108.5, K_V = 0.1578

Второй базовый вариант отличается от первого размером штамповочных радиусов, значения которых принято равным 1.5 мм. Уменьшение штамповочных радиусов до меньших размеров, в рамках данной технологической схемы штамповки оказалось невозможным. Поскольку заполнение штамповочных радиусов осуществляется совместно с образованием облоя, то минимальную высоту заготовки потребовалось увеличить до 104 мм. Соответственно максимальная высота заготовки – 112.4 мм. В результате при относительной неизменности усилий деформирования и выполнения критерия эффективности, увеличилась металлоёмкость технологического процесса: $K_И$ = 0.555, $_{min}K_И$ = 0.536. Усилие штамповки на предварительном переходе составило 2.6 МН, на окончательном – 12.9 МН.

При выполнении сравнительного анализа предложенных автором вариантов технологических схем (см. разделы 3.1.1 и 3.1.2) с базовыми вариантами будем иметь в виду, следующее:

- ни первый, ни второй из рассмотренных базовых вариантов, при заданных геометрических параметрах, среди которых одинаковые размеры инстру-

мента формирующего облой, не позволяют сформировать штамповочные радиусы размером меньше 1.5 мм;

- геометрические параметры поковки окончательного перехода (без облоя) всех рассматриваемых вариантов одинаковы.

В качестве критериев для сравнения эффективности технологических процессов будем использовать технологические усилия и коэффициенты металлоёмкости $K_И$ и ${}_{min}K_И$ (см. таблицу 3.2).

Таблица 3.2 – Результаты оценки эффективность схем штамповки поковки с формируемыми на предварительном переходе выступами

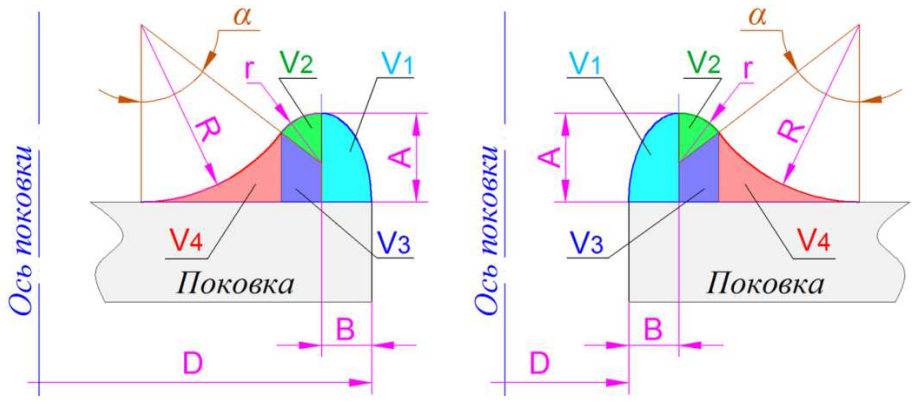
Параметр	Базовые варианты		Новые технологические схемы		
	1-ый вариант	2-ый вариант	Рисунки 3.2, 3.3	Рисунки 3.4, 3.5	Рисунки 3.4, 3.6
Усилие штамповки на предварительном переходе, МН	2.6	2.6	5.04	9.02	9.02
Усилие штамповки на окончательном переходе, МН	12.9	12.9	10.55	10.92	17.86
Суммарное усилие штамповки на формообразующих переходах, МН	15.5	15.5	15.59	19.94	26.88
Коэффициент использования металла ($K_И$)	0.583	0.555	0.612	0.6	0.6
Минимальный коэффициент использования металла (${}_{min}K_И$)	0.564	0.536	0.592	0.58	0.58

Анализ приведённых в таблице данных показывает, что в сравнении с известными (базовые варианты), предложенные в работе схемы штамповки, за исключением последнего варианта (рисунок 3.6), при незначительном увеличении технологических усилий и снижении металлоёмкости, позволяют изготавливать поковки с минимальными штамповочными радиусами. При этом следует иметь в виду, что имеется реальная возможность улучшить полученные результаты путём разработки и применения методики расчёта геометрических параметров выступов, а также более заметного снижения массы поковок за счёт уменьшения припусков на их механическую обработку (см. рисунок 3.1).

3.2. Расчётная модель геометрии выступа, формируемого на предварительном переходе ГОШ

Применённую в предыдущем разделе геометрию выступа (см. рисунок 3.2) – полуокружность, сопряжённая с торцевой поверхностью поковки, нельзя рассматривать как наилучшую. Двух варьируемых параметров (радиусы окружности и сопряжения) не достаточно для проведения исследований влияния на эффективность технологического процесса ГОШ выступа произвольной геометрии. Кроме того, такой выступ мало пригоден в качестве компенсатора излишков металла при закрытой штамповке.

Автором предлагается геометрия выступа (см. рисунок 3.7), состоящая из четверти эллипса с осями равными A и B, дуги окружности радиуса r, сопряжённой с торцевой поверхности поковки дугой окружности радиусом R. Четыре варьируемых параметра – A, B, r и R, определяют выступ, геометрия которого может изменяться в достаточно широких пределах (см. рисунок 3.7). Положение выступа на торцевой поверхности поковки определяется диаметром цилиндрической поверхности D, допуск на механическую обработку которой предполагается минимизировать.



а ***б***

Рисунок 3.7 – Геометрия выступов на внешней (***а***) и внутренней (***б***) цилиндрических поверхностях поковки

Объём тела вращения – тора [175], образованного выступом, может быть найден в соответствии с (3.1) – (3.4):

$$V_{выст} = V_1 + V_2 + V_{31} + V_{32} + V_{41} + V_{42} - V_{43}. \quad (3.1)$$

Если выступ расположен на внешней поверхности (рисунок 3.7*а*):

$$V_1 = 0.25\pi^2 A \cdot B \cdot \left(D - \frac{2B \cdot (3\pi - 4)}{3\pi} \right),$$

$$V_2 = \frac{1}{6}\pi \cdot r^2 \cdot (3\alpha D - 6\alpha B - 8r\sin^2(0.5\alpha)),$$

$$V_{31} = \pi \cdot r \cdot (A - r) \cdot \sin\alpha \cdot (D - 2B - r \cdot \sin\alpha),$$

$$V_{32} = \frac{1}{12}\pi \cdot r^2 \cdot \sin 2\alpha \cdot (3D - 6B - 4r \cdot \sin\alpha), \quad (3.2)$$

$$V_{41} = \pi \cdot R \cdot \sin\alpha \cdot (A - r + r \cdot \cos\alpha) \cdot (D - 2B - (2r + R) \cdot \sin\alpha),$$

$$V_{42} = 0.25\pi \cdot R^2 \cdot \sin 2\alpha \cdot \left(D - 2B - 2r \cdot \sin\alpha - \frac{4}{3} R \cdot \sin\alpha \right),$$

$$V_{43} = 0.5\pi \cdot R^2 \cdot \alpha \cdot \left(D - 2B - 2(R + r) \cdot \sin\alpha + \frac{8R\sin^2(0.5\alpha)}{3\alpha} \right).$$

Если выступ расположен на внутренней поверхности (рисунок 3.7*б*):

$$V_1 = 0.25\pi^2 A \cdot B \cdot \left(D + \frac{2B \cdot (3\pi - 4)}{3\pi} \right),$$

$$V_2 = \frac{1}{6}\pi \cdot r^2 \cdot (3\alpha D + 6\alpha B + 8r\sin^2(0.5\alpha)),$$

$$V_{31} = \pi \cdot r \cdot (A - r) \cdot \sin\alpha \cdot (D + 2B + r \cdot \sin\alpha),$$

$$V_{32} = \frac{1}{12}\pi \cdot r^2 \cdot \sin 2\alpha \cdot (3D + 6B + 4r \cdot \sin\alpha), \quad (3.3)$$

$$V_{41} = \pi \cdot R \cdot \sin\alpha \cdot (A - r + r \cdot \cos\alpha) \cdot (D + 2B + (2r + R) \cdot \sin\alpha),$$

$$V_{42} = 0.25\pi \cdot R^2 \cdot \sin 2\alpha \cdot \left(D + 2B + 2r \cdot \sin\alpha + \frac{4}{3} R \cdot \sin\alpha \right),$$

$$V_{43} = 0.5\pi \cdot R^2 \cdot \alpha \cdot \left(D + 2B + 2(R + r) \cdot \sin\alpha - \frac{8R\sin^2(0.5\alpha)}{3\alpha} \right);$$

$$\alpha = \arccos\frac{R - A + r}{R + r}. \quad (3.4)$$

Очевидно, что теоретически геометрия выступа будет определена при любых положительных значениях *A*, *B*, *r* и *R*. На практике, ширина выступа (на рисунке 3.8 размер *C*), ограничена размерами торцевой поверхности поковки. Размер ширины выступа в торцевой плоскости его размещения:

$$C = B + (r + R) \cdot \sin\alpha\,. \tag{3.5}$$

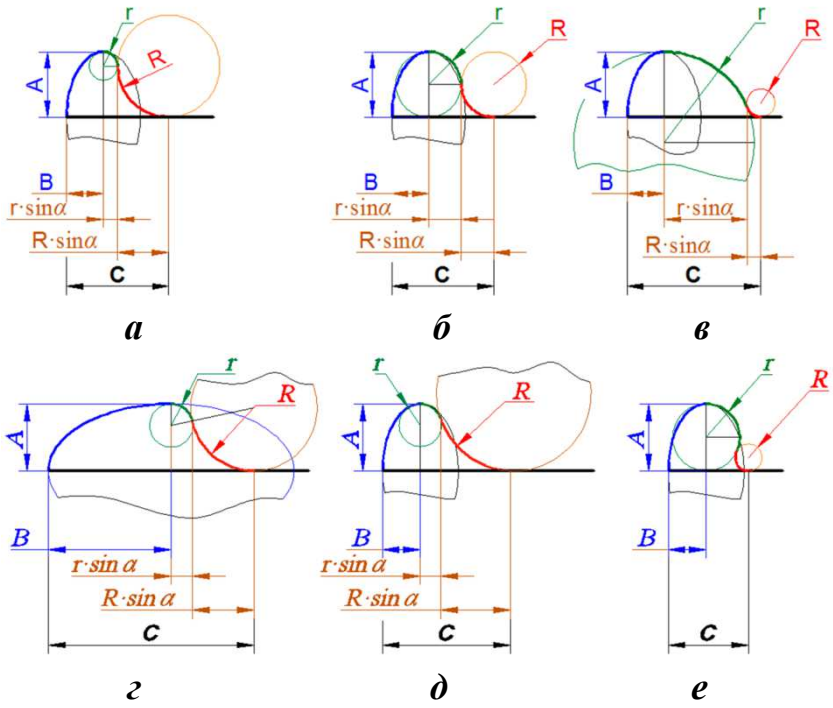


Рисунок 3.8 – Варианты геометрии выступов:

а *– A > B, 2r < A, R > A – r;* ***б*** *– A > B, 2r = A, R > A – r;* ***в*** *– A > B, 2r > A;*

г *– A < B, 2r < A, R >> A – r;* ***д*** *– A > B, 2r < A, R >> A – r;* ***е*** *– A > B, 2r = A, R < A – r;*

Если на предварительном переходе предполагается применение закрытой штамповки, то выступы могут быть использованы в качестве компенсаторов. В этом случае значение суммарного объёма выступов-компенсаторов $_{\Sigma}V_{выст}$, определяемое в соответствии с (3.1), должно удовлетворять условию:

$$_{\Sigma}V_{выст} = 0.25 \cdot \pi \cdot K_3 \cdot D^2 \cdot (L_{\max} - L_{\min})\,, \tag{3.6}$$

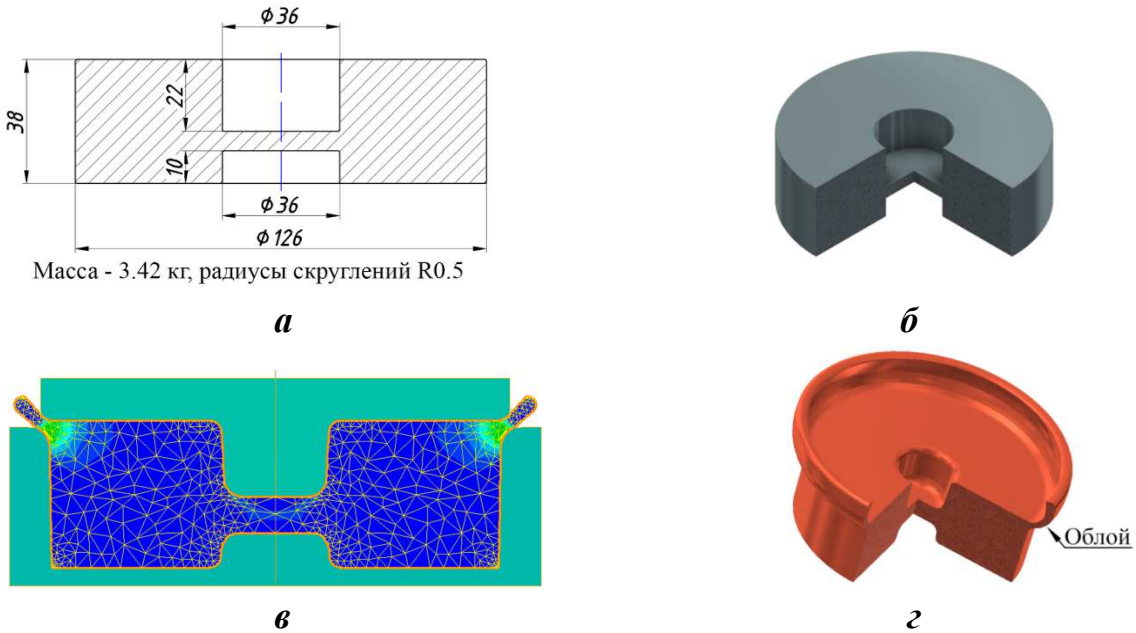
где *D*, L_{max}, L_{min} – номинальный диаметр, условные максимальная и минимальная длины заготовки (2.9), определяемые в соответствии с методикой, разработанной в разделе 2.2.1, $K_3 > 1$ – коэффициент запаса.

Существенные ограничения на размеры выступа накладываются возможностью его пластической деформацией на окончательном штамповочном переходе без образования дефектов (складок). В отдельных частных случаях образование дефектов штамповки очевидно. Например, такая ситуация представлена на рисунке 3.8*е*.

3.3. Разработка методики расчёта геометрии гравюр штампов, предназначенных для реализации технологических процессов ГОШ с выступами на предварительном переходе

В разделе 3.1 данной главы установлено преимущество технологических схем ГОШ на КГШП круглых в плане поковок с выступами, формируемыми на предварительном переходе. Данный раздел посвящён методике расчёта конкретных значений геометрических параметров гравюр штампов, предназначенных для образования этих выступов. Деталь “Втулка” и ее поковка, которая предназначена для решения поставленной задачи, показаны на рисунке 3.9.

Номинальный диаметр заготовки 80 мм. Минимальная и максимальная длины заготовки 109 и 118 мм соответственно.



а ***б***

в ***г***

Рисунок 3.9 – Расчётная модель детали и её поковка:

а, ***б*** – 2D и 3D модели детали; ***в***, ***г*** – поковка детали на окончательном переходе

Задача исследования – определить зависимости, связывающие размеры гравюры штампа, формирующей выступы (см. рисунок 3.7), между собой и другими её геометрическими параметрами, позволяющие осуществить процесс ГОШ поковки с минимальными внешними радиусами закруглений без образования дефектов без значительного роста (или даже со снижением) технологических усилий.

3.3.1. Проектирование геометрии поковки предварительного перехода из условия её бездефектной штамповки на окончательном переходе

Геометрические параметры выступа: *A*, *B*, *R* и *r* (см. рисунок 3.10*а*), как было показано в разделе 3.2, могут принимать такие значения, при которых деформация его в штампе окончательного перехода приводит к штамповочным дефектам типа зажимов или складок (см. рисунок 3.10*б*).

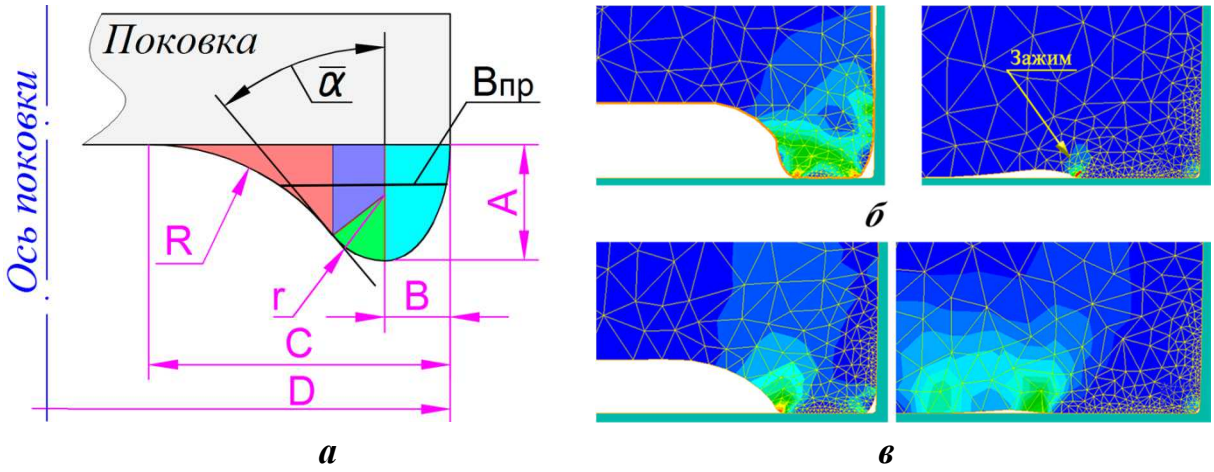


Рисунок 3.10 – Пластическая деформация выступа на окончательном переходе:
а – геометрические параметры выступа; ***б*** – зажим, возникающий при $\alpha < 20°$;
в – штамповка без дефектов при $\alpha > 20°$

Автором данной работы путём экспериментальных исследований, численных и на физических моделях (см. раздел 3.4), установлено, что для поковок круглых в плане, структура данных формы детали которых соответствует выражению (2.4), дефекты штамповки, возникающие при деформации выступов, гарантированно отсутствуют при выполнении условий (3.7).

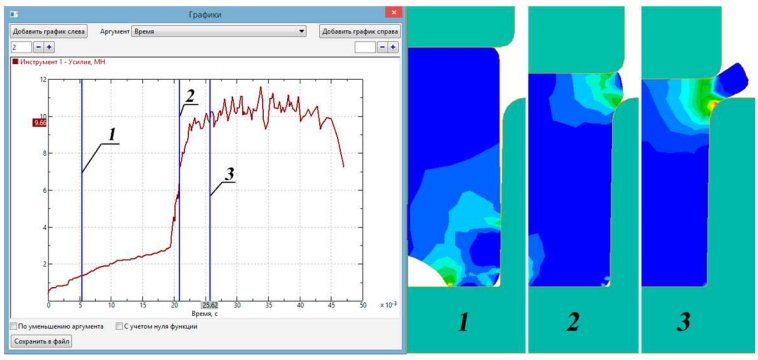
$$\begin{cases} 20° \le \overline{\alpha} < 30° \\ 1.0 \le K_H \le 1.2, \end{cases} \qquad (3.7)$$

где $\overline{\alpha} = 90 - \dfrac{180 \cdot \alpha}{\pi}$; $K_H = \dfrac{A}{B_{ПР}}$.

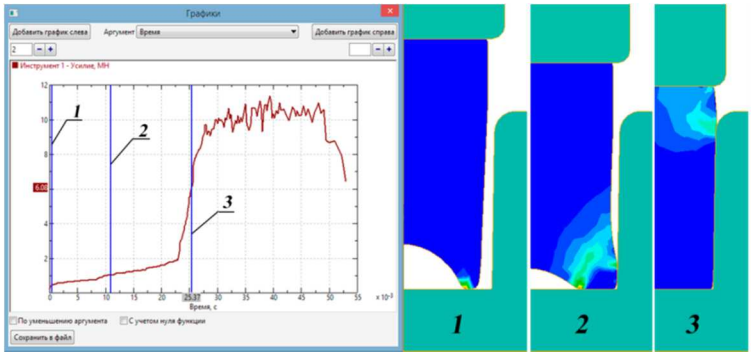
В выражениях (3.7) угол α рассчитывается в соответствии с (3.4), а приведённая ширина выступа $B_{ПР}$ равна отношению площади поперечного сечения выступа к его высоте (параметр A). Таким образом, критерии бездефектной деформации выступа – его приведённый уклон $\overline{\alpha}$ и относительная высота K_H, равны:

$$\overline{\alpha} = 90 - \frac{180}{\pi} \arccos \frac{R - A + r}{R + r}, \qquad (3.8)$$

$$K_H = \frac{4 \cdot A^2}{\pi \cdot A \cdot B + 2 \cdot (r^2 - R^2) \cdot \alpha + 4 \cdot (A - r) \cdot (r + R) \cdot \sin\alpha + (r + R)^2 \cdot \sin 2\alpha}.$$



а



б

Рис. 3.11 – Окончательный штамповочный переход:

а $-\overline{\alpha} = 21.1°$, $K_H = 1.14$; ***б*** $-\overline{\alpha} = 20.13°$, $K_H = 1.34$

На рисунке 3.11 показаны результаты моделирования окончательного перехода штамповки поковки детали “Втулка” (см. рисунок 3.9). Рассмотрены две

технологические схемы, окончательные переходы которых полностью идентичны (см. рисунок 3.9*в* и *г*), а предварительные переходы отличаются:

- диаметром внешней поверхности, в результате чего при размещении поковки в штампе окончательного перехода образуется боковой зазор;
- увеличен с одного до трёх градусов штамповочный уклон;
- уменьшены размеры выступа B (с 6 до 4 мм) и r (с 7 до 6.2 мм), увеличен параметр A (с 16 до 16.2) в результате чего увеличилось значение K_H до 1.34, (при $\overline{\alpha}$ = 20.13) что превышает рекомендованное (3.7) для первого варианта штамповки (см. рисунки 3.10 и 3.11*а*).

Как следует из анализа приведённых на рисунке 3.11 данных, при реализации первого варианта (см. рисунок 3.11*а*), образование облоя начинается в тот момент (позиция пуансона – 2), когда ещё не полностью сформирован штамповочный радиус. При завершении формирования штамповочного радиуса (позиция пуансона – 3), оказывается сформированной часть облоя, массу которой можно рассматривать как дополнительную составляющую в металлоёмкости технологического процесса. При реализации второго варианта (см. рисунок 3.11*б*), пластическая деформация выступа направлена на заполнение штамповочного радиуса (позиция пуансона – 2), формирование которого завершается ещё до начала образования облоя (позиция пуансона – 2), что позволяет говорить о снижении металлоёмкости, в данном случае – ≈2%.

Важно, что на начальном этапе деформации выступа отсутствует воздействие на него со стороны поверхности гравюры штампа (см. рисунок 3.11*б*, позиция пуансона – 2), соответственно уменьшается вероятность образования складок (см. рисунок 3.10*б*) и появляется возможность увеличения значение коэффициента K_H, соответственно улучшения условий заполнения радиуса поковки.

Путём численного моделирования процессов деформации выступов, расположенных на внешних сторонах поковок, установлено, что величина одностороннего зазора Δ, при штамповочном уклоне поковки предварительного перехода 3° в плоскости торцевой поверхности должна составлять:

$$\Delta \approx \frac{A}{4K_H} \le 2.0 \quad \text{при} \quad 20° \le \overline{\alpha} < 30°, \quad 1.0 \le K_H \le 1.6. \tag{3.9}$$

Существенно, что размер зоны размещения выступа для гарантированной бездефектной штамповки должен превышать его размер C (3.5) на 30% при ограничениях, устанавливаемых выражениями (3.7) – (3.9).

3.3.2. Проектирование гравюр закрытых штампов предварительного перехода

Формирование выступов в закрытом штампе предполагает их использование в качестве компенсаторов неточностей заготовки (см. раздел 2.2.1).

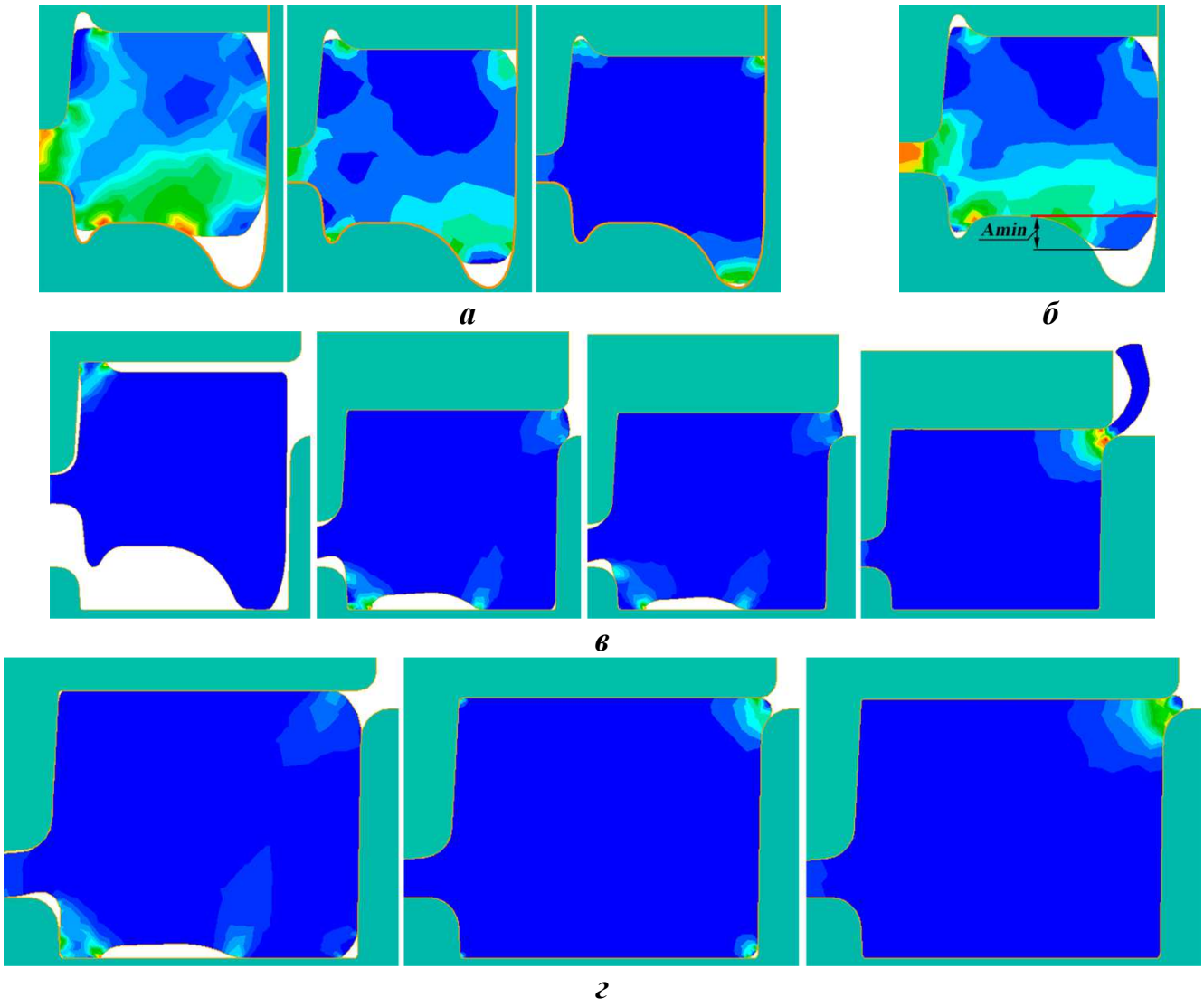


Рис. 3.12 – Моделирование ГОШ поковки детали “Втулка”: предварительный (***а***, ***б***) и окончательный (***в***, ***г***) переходы при максимальной (***а***, ***в***) и минимальной (***б***, ***г***) массах заготовок

На рисунке 3.12 представлены результаты численного моделирования процесса изготовления поковки детали “Втулка” (см. рисунок 3.9) по технологической схеме, представленной на рисунке 3.11*а*, – без зазора на окончательном переходе. В качестве компенсатора используется гравюра штампа, образующая выступ на внешней стороне поковки снизу. Её геометрическая форма, в соответствии с выражениями (3.1), (3.6) – (3.8) при значении $K_З$ = 1.72, определяется следующими значениями параметров:

A = 16, B = 6, r = 7, R = 18 мм, $\overline{\alpha}$ = 21.1°, K_H =1.14.

Практика показывает, что значение $K_З$ зависит от способа изготовления заготовки и, как правило, лежит в пределах от 1.6 до 2.6.

Размеры гравюр штампа, образующие выступы на внутренней стороне поковки, на данном этапе исследования, не планируемые для использования в качестве компенсаторов ($K_З$ = 1), имеют минимальные размеры глубины – параметр A = 3 ... 5 мм. Таким образом, параметры: A = 4, B = 1.5, r =1.5, R = 6 мм.

Контрольные значения, в соответствии с (3.7), (3.8), – $\overline{\alpha}$ = 22.2°, K_H =1.12 и $\overline{\alpha}$ = 27.82°, K_H =1.1.

При проектировании технологического процесса важно чтобы:

- форма и размеры, без учёта выступов, поковки предварительного перехода была максимально приближена к форме и размерам поковки окончательного перехода;
- при неизменности закрытой высоты штампов, значение A_{min} (см. рисунок 3.12*б*) составлял не менее 0.4·A;
- $\overline{\alpha} \rightarrow min$ (20°), а $K_H \rightarrow max$.

Анализ данных, полученных в результате численного моделирования процесса ГОШ на КГШП поковки детали “Втулка” и приведённых на рисунке 3.12, демонстрирует достаточно устойчивое формирование штамповочных радиусов при максимальной массе заготовки. Однако при минимальной массе заготовки процесс можно считать лишь условно работоспособным. Добиться полного формирования штамповочного радиуса на внешней торцевой поверхности внизу до

начала образования облоя не удалось. Решение данной проблемы – применение технологической схемы штамповки, в которой предусмотрен зазор между внешней боковой поверхностью поковки и инструментом (см. рисунок 3.11*б*). На рисунке 3.13 показаны результаты моделирования этого процесса.

а ***б***

Рис. 3.13 – Завершение формирования штамповочного радиуса на окончательном переходе: при минимальной (***а***) и максимальной (***б***) массе заготовки

Таблица 3.3 – Результаты исследования эффективности технологических схем ГОШ поковки детали “Втулка”

№	Параметр эффективности применения технологической схемы	Технологическая схема		
		Базовая	С выступами на предварительном переходе	
			Без зазора на окончательном переходе	С зазором на окончательном переходе
1	Максимальное усилие на предварительном переходе, МН	3.43	5.56	6.56
3	Усилие завершения формирования штамповочного радиуса, МН	**Не определено**	10.63	6.13
4	Максимальное усилие на окончательном переходе, МН	14.73	11.24	11.21
6	Минимальная высота заготовки, мм	111.5 ($K_И$=0.74)	109.0 ($K_И$=0.757)	108.0 ($K_И$=0.763)
7	Суммарное усилие формообразующих операций, МН	18.16	16.8	17.77

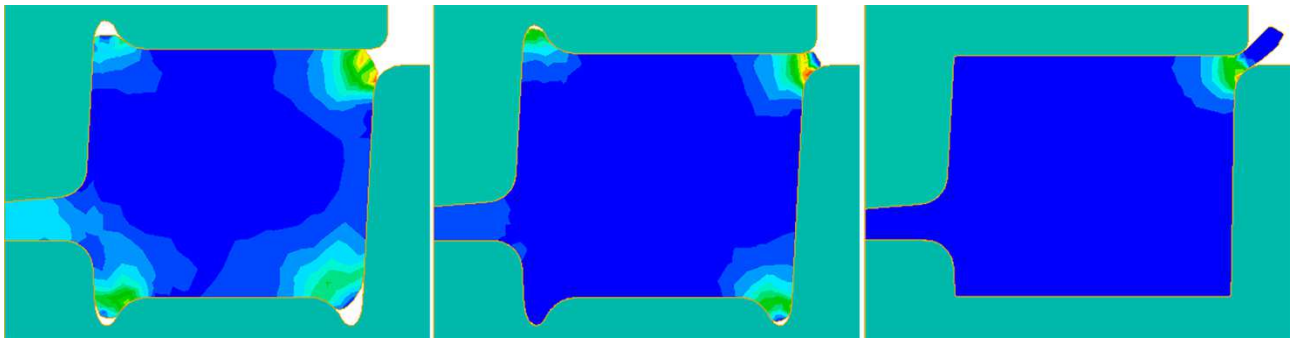
Результаты исследований, представленные в таблице 3.3, позволяют дать сравнительную оценку влияния конструкций гравюр штампов предварительного

перехода на эффективность технологического процесса ГОШ круглых в плане поковок. При этом важно иметь в виду следующее:

- при реализации окончательного перехода во всех трёх вариантах исследований применялся один и тот же штамп;
- сравнение новых вариантов технологических схем с базовым не совсем правомерно, поскольку при его реализации удалось сформировать штамповочные радиусы размером лишь около 2 мм (планировалось 0.5 мм). Их можно уменьшить, да и то незначительно, но для этого необходимо изменить параметры облоя и способ его формирования, отказавшись от бесподпорной штамповки и согласившись с более чем двукратным ростом технологического усилия на окончательном переходе;
- значения параметров эффективности двух новых вариантов технологических схем (без зазора и с зазором) на первый взгляд близки. Однако, что очень важно, при реализации технологической схемы с зазором формирование штамповочного радиуса завершается ещё до начала образования облоя (см. рисунок 3.13) при усилии 6.15 МН, а это значит, что даже незначительным увеличением его (облоя) толщины, можно заметно снизить и максимальное усилие штамповки. Не следует забывать и о меньшей металлоёмкости технологического процесса (2.11), определяемой величиной пропорциональной длине заготовки минимальной массы.

3.3.3. Проектирование гравюр открытых штампов предварительного перехода

На рисунке 3.14 показан процесс моделирования пластического формообразования поковки детали “Втулка” предварительно осаженной заготовки минимальной массы в ручьях штампов предварительного и окончательного перехода, конструкции которых выполнены открытыми.



а ***б*** ***в***

Рис. 3.14 – Моделирование ГОШ поковки детали “Втулка”: предварительный (***а***, ***б***) и окончательный (***в***) переходы при минимальной массе заготовки

Размеры гравюр штампа, образующих выступы, приняты такими же, как для выступов на внутренней стороне, не используемых в качестве компенсаторов, для закрытого штампа (см. раздел 3.3.2). Минимальная теоретическая масса заготовки такая же, как и для закрытой штамповки (см. рисунок 3.12*г*). Однако на практике, ввиду того, что формирование выступа на предварительном переходе происходит одновременно с образованием облоя (см. рисунок 3.14*а*), требуется увеличение массы заготовки, в данном случае её минимальная длина принята равной 111 мм, соответственно максимальная длина – 120 мм ($K_И$=0.52). Силовые параметры эффективности данного технологического процесса при минимальной и максимальной массах заготовок:

- технологическое усилие на предварительном переходе 6.94 – 8.82 МН;
- технологическое усилие на окончательном переходе 8.20 – 9.35 МН.

Рассмотренная технологическая схема открытой штамповки на предварительном переходе, в сравнении с закрытой, рассмотренной в предыдущем разделе, но, что существенно, имеет преимущество по технологическим нагрузкам, но уступает по показателям металлоёмкости. В тоже время, не всегда имеется возможность применения технологической схемы закрытой штамповки на предварительном переходе из-за недостатка места для размещения выступа-компенсатора (3.5).

Утверждение об одновременном формировании выступов и облоя на предварительном переходе справедливо, как показали исследования выполненные автором, при отношении высоты детали к её диаметру < 0.45 и является неверным при значениях этого отношения больших единицы.

3.4. Автоматизация процесса расчёта геометрии гравюр штампов, формирующих выступы на поковках предварительного перехода

Проектирование геометрии гравюр штампов, формирующих выступы, предполагает достаточно большой объём вычислений, связанных с поиском различных соотношений параметров A, B, R и r при заданных значениях D, месте расположения и способе штамповки (отрытой или закрытой), удовлетворяющих зависимостям (3.1) – (3.9). С целью автоматизации данного процесса вычислений разработано специальное программное решение (см. Приложение З) [186], позволяющее решить следующие задачи:

1. Ввод, анализ и сохранение исходных данных. Выполнение предварительных расчётов. На данном этапе расчёта геометрических параметров конфигурации гравюр штампа:

- определяются способ штамповки, количество, расположение и назначение формируемых на предварительном переходе выступов;
- определяются размеры цилиндрической заготовки (см. раздел 2.2.1);
- определяются параметры выступов и допускаемые пределы их изменений;
- рассчитываются параметры, определяющие возможность компенсации излишков металла в выступах ($K_З$), размеры необходимые для их размещения ($C_р$) на предварительном переходе и бездефектной деформации выступов на окончательном переходе ($\overline{\alpha}$, $K_Н$), а также ряд справочных величин, среди которых объём выступа ($V_{выст}$), разность между максимальным и минимальным объёмами заготовки ($\delta V_{заг}$).

На рисунке 3.15 показано окно программы на этапе выполнения задачи решаемой в разделе 3.3.2 данной работы.

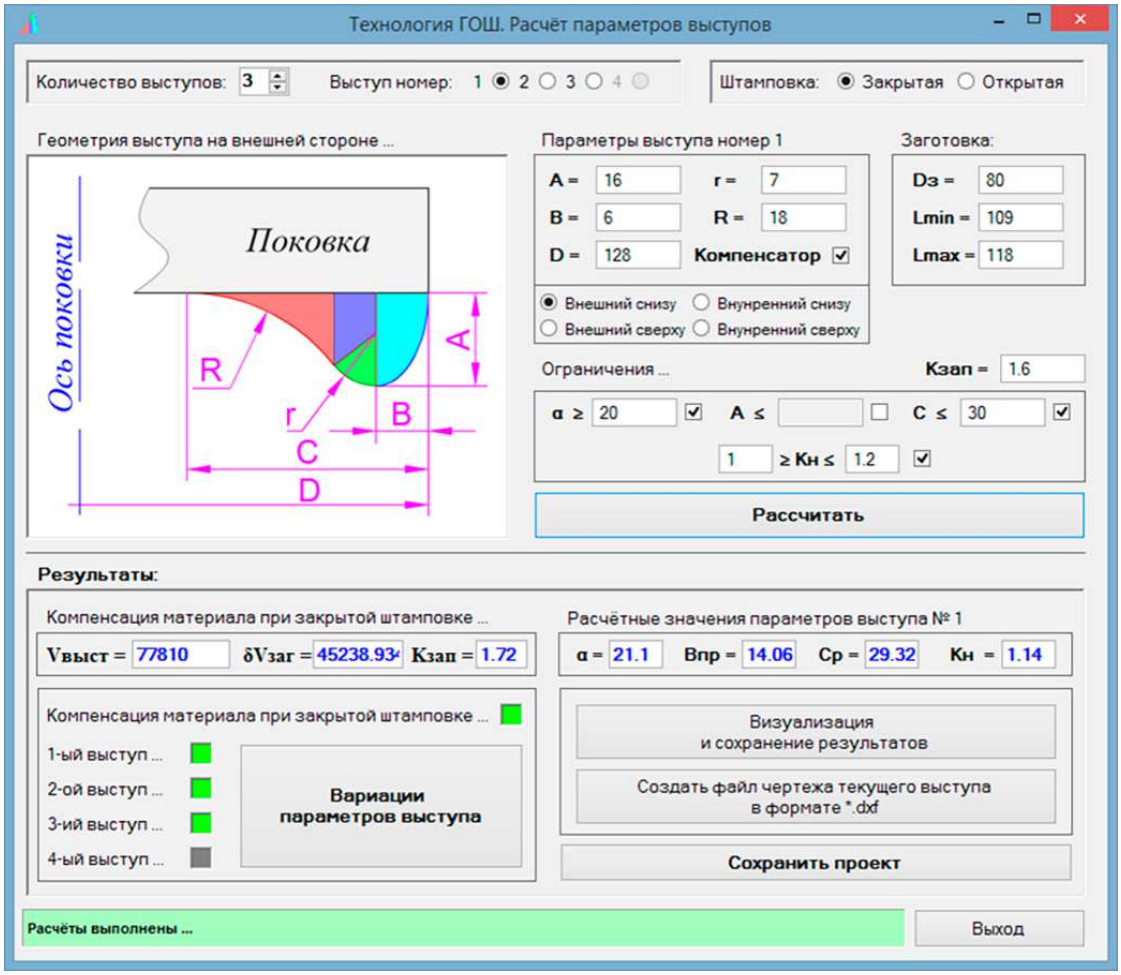


Рис. 3.15 – Автоматизация расчёта параметров выступов:
ввод данных и выполнение предварительных расчётов

2. Визуализация и сохранение результатов (см. рисунок 3.16). На данном этапе выполнения расчётов имеется возможность:

- отобразить геометрию фрагмента гравюры штампа, формирующую выступ или сам выступ;
- сохранить результаты расчёта геометрии выступа;
- представить параметры геометрии гравюры штампа, образующей выступ как уравнение в декартовой системе координат с осью x лежащей в плоскости торцевой поверхности, на которой создаётся данная гравюра, и осью y, совпадающей с осью штампа.

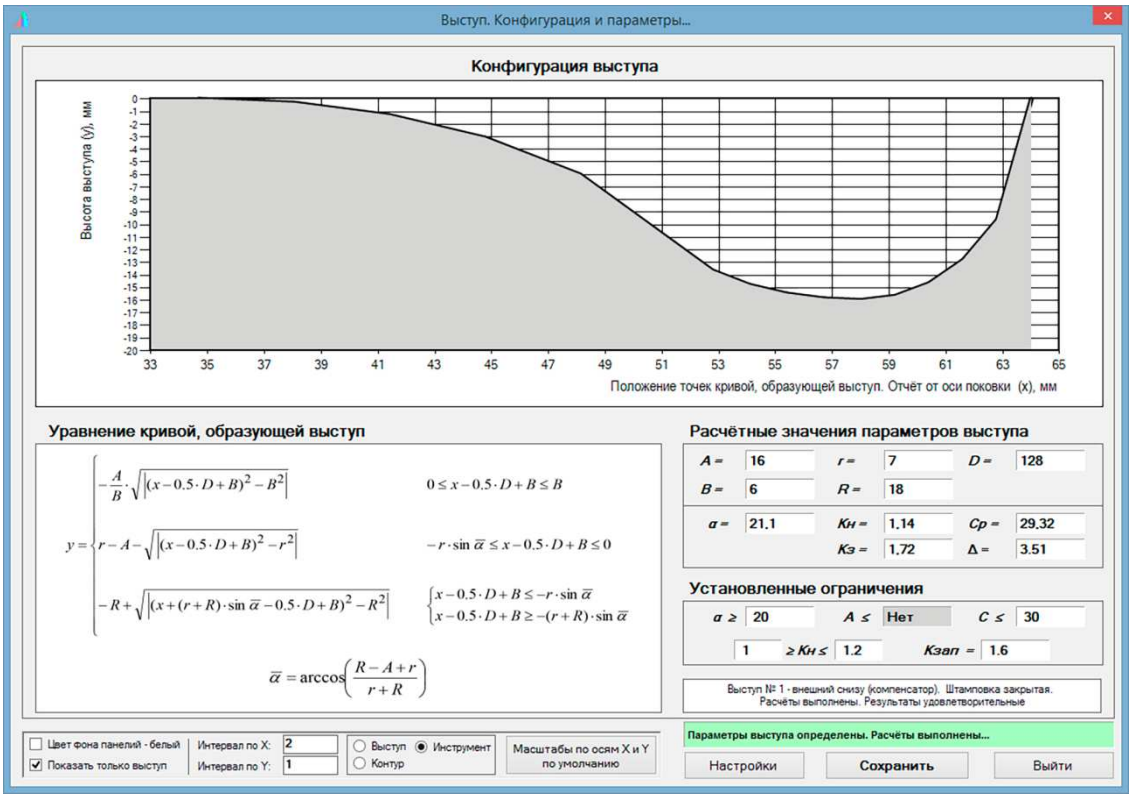


Рис. 3.16 – Автоматизация расчёта параметров выступов: визуализация и сохранение результатов

3. На рисунке 3.17 показано окно вариации параметров выступов.

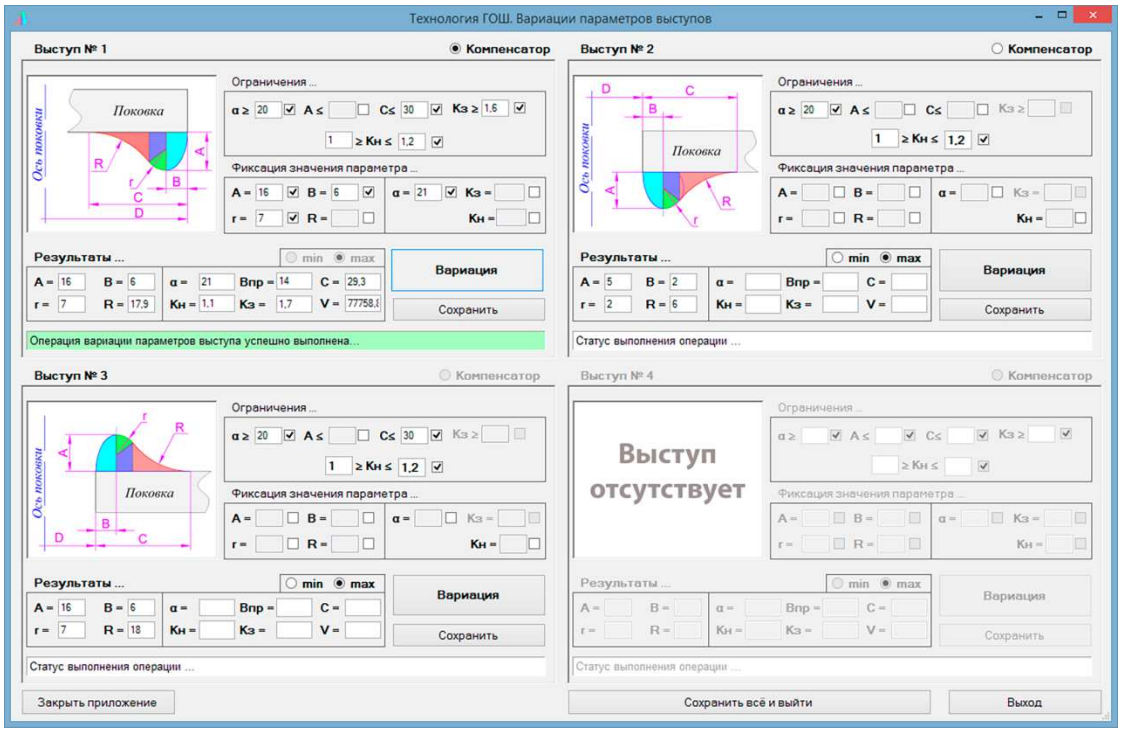


Рис. 3.17 – Автоматизация расчёта параметров выступов: вариация геометрических параметров выступов

На данном этапе вычислений имеется возможность рассчитать значения (или интервал приемлемых значений) одних параметров выступов при фиксированных значениях других. Так на рисунке 3.17 в качестве примера выполнен расчёт радиуса выступа R при фиксированных значениях A, B, r и $\overline{\alpha}$.

Методика расчёта геометрических параметров фрагмента гравюры штампа предварительного перехода, формирующего технологический выступ на торцевой поверхности полуфабриката поковки приведена в приложении Г.

3.5. Экспериментальное исследование процессов ГОШ поковок с выступами, формируемыми на предварительном переходе

Экспериментальные исследования, выполненные в рамках данной работы, преследуют следующие цели:

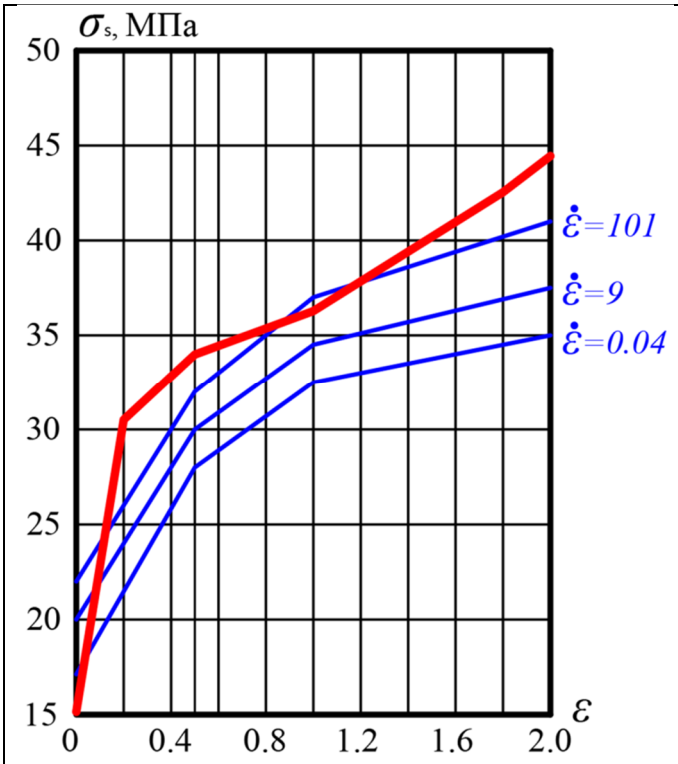
1. Подтверждение эффективности новых технологических схем штамповки, разработанных в разделах 3.1.1 и 3.1.2.
2. Подтверждение эффективности методик расчёта параметров новых технологических схем штамповки, разработанных в разделах 3.3 и 3.4.

Экспериментальные исследования проводились на физических моделях, выполненных из свинца и деформируемых на гидравлическом прессе. В качестве смазки применялось минеральное масло. Сравнение теоретических и экспериментальных результатов осуществлялось путём сравнения усилий пластических деформаций и формы деформированных моделей.

Теоретические расчёты выполнялись с помощью программы QForm.

Точность результатов моделирования пластической деформации металла методом конечных элементов в программе QForm (и других подобных [69 – 72], например, DEFORM-3D) во многом определяется точностью кривой упрочнения [12, 104 – 108] и параметрами трения [109, 110]. Методика экспериментального определения этих параметров регламентируется ГОСТ 25.503-97 [105].

Таблица 3.4 – Кривая упрочнения и параметры смазки материала физической модели (свинца)



Кривые упрочнения – свинец

данные QForm; данные эксперимента

Точки экспериментальной кривой упрочнения

ε:	0.01	0.2	0.5	1.0	1.8	2.0
σ_s:	15.60	30.86	34.40	35.52	42.55	44.50

Параметры закона трения (Леванова)

Фактор трения – 0.20

Коэффициент Леванова – 1.25

Заготовка	Осадка: ε = 0.5. Модель	Осадка: ε = 0.5 Эксперимент
	Диаметр бочки: 32.1 мм	Диаметр бочки: 31.8 мм

Вариация параметров a, b, c, d

ε = 0.2,	a = 30.00,	P_M = 19.550,	ΔP =+0.556
$P_Э$ = 20.116:	a = 32.00,	P_M = 20.85,	ΔP =-0.734
	a = 30.90,	P_M = 20.140,	ΔP =-0.024
	a = **30.86**,	P_M = 20.110,	ΔP =+0.006
ε = 0.5,	b = 38.00,	P_M = 33.270,	ΔP =-2.790
$P_Э$ = 30.480:	b = 35.00,	P_M = 30.950,	ΔP =-0.470
	b = 34.45,	P_M = 30.520,	ΔP =-0.024
	b = **34.40**,	P_M = 30.480,	ΔP = 0.000
ε = 1.0,	c = 35.00,	P_M = 51.590,	ΔP =+0.570
$P_Э$ = 52.160:	c = 35.50,	P_M = 52.140,	ΔP =+0.020
	c = 36.55,	P_M = 52.200,	ΔP =-0.040
	c = **35.52**,	P_M = 52.170,	ΔP = -0.010
ε = 1.8,	d = 41.75,	P_M = 151.40,	ΔP =+1.75
$P_Э$ = 153.15:	d = 42.60,	P_M = 153.30,	ΔP =-0.15
	d = **42.55**,	P_M = 153.20,	ΔP =-0.05
	d = 42.53	P_M =1 53.10,	ΔP = +0.05

Вариация параметров A, B (ε = 0.5, $D_Э$ = 31.8)

A = 0.15, D_M = 30.6, ΔD =+1.2
A = 0.25, D_M = 33.2, ΔD =-1.4
A = 0.20, D_M = 32.1, ΔD =-0.3

B = 0.30, D_M = 32.2, ΔD =-0.4
B = 1.20, D_M = 31.5, ΔD =+0.3
B = 1.25, D_M = 32.1, ΔD =-0.3

Единицы измерения: линейные размеры ($D_Э$, D_M) – мм;
технологическое усилие (Рэ, Рм, ΔP) – кН
напряжение (σ_s, a, b, c, d) – МПа.

Эффективная деформация: $\varepsilon = \ln\frac{H}{h}$ или $h = \frac{H}{e^{\varepsilon}}$,
где H и h высоты заготовки исходной и осаженной.

Для построения кривой упрочнения, в соответствии с рекомендациями разработчиков программы QForm [65, 188] и подтверждённых результатами исследований, выполненных авторами работ [187, 188], использовался инверсный метод определения сопротивления деформированию.

Учитывая, что в базе данных QForm применён табличный способ задания кривых упрочнения, то есть зависимость $\sigma_s = f(\varepsilon)$, где σ_s и ε предел текучести и относительная (или эффективная) деформация металла, кусочно-линейная функция, заданная для свинца четырьмя точками, в качестве модели материала будем использовать не формулу Хензеля – Шпиттеля [65, 107, 187 – 189], а массив из четырёх точек с координатами ε, σ_s: (0.2, a), (0.5, b), (1.0, c), (1.8, d). Варьируемые параметры (a, b, c, d) определяются последовательно из условия минимума отклонения расчётного значения усилия деформации цилиндрического образца от реального (см. таблица 3.4).

Полагая, что контактное трение при выполнении экспериментальных исследований подчиняется закону Леванова [65, 109, 187, 189], в качестве варьируемых параметров (см. таблица 3.4) примем фактор трения (A) и коэффициент Леванова (B). Их расчёт осуществляется из определения минимального значения отклонения максимальных диаметров (диаметр бочки) в эксперименте и расчете при деформации цилиндрического свинцового образца диаметром 26 высотой 50 мм до высоты 33.33 мм (ε = 0.5). Генерация новых варьируемых параметров (см. таблица 3.4) в данном случае осуществлялась методом покоординатного спуска [190 – 192].

3.5.1. Исследование процесса изготовления круглой в плане поковки с формируемым в закрытом штампе предварительного перехода технологическим выступом

Физическая модель детали (материал – свинец) и её поковка показаны на рисунке 3.18. Структура данных формы детали, в соответствии с (2.3):

$$Д(0,0,0) = D_0, H_0, L_0 - вD_0, вL_0 - нD_0, нL_0 = 38{,}20 - 12{,}10 - 12{,}6. \qquad (3.10)$$

Поковка, спроектированная на основе (3.10), в соответствии с методикой [176], разработанной в разделе (2.2.2) представлена на рисунке 3.18. Для наружной поверхности штамповочные уклоны приняты равными 1°, а радиусы R0.5. Для внутренней поверхности – уклоны 2°, радиусы R3.

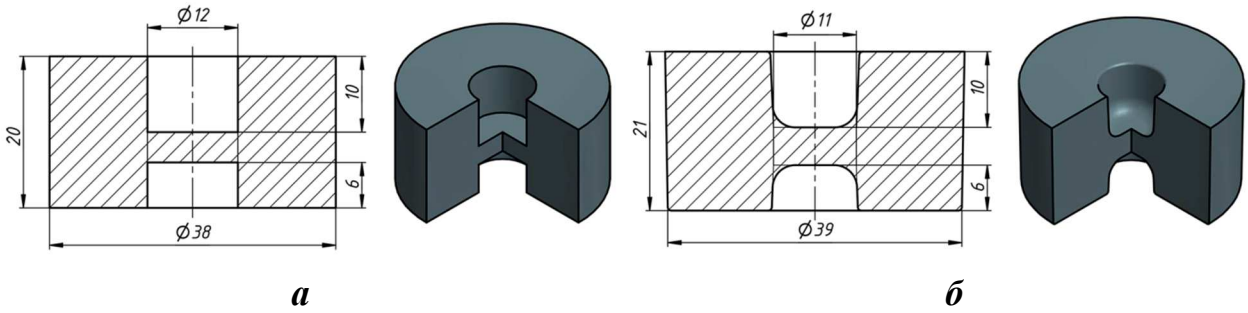


Рис. 3.18 – Физическая модель детали (***а***) и её поковка (***б***)

Параметры заготовки: диаметр 26 мм, минимальная длина (высота) 46 мм. Точность заготовки соответствует прокату круглого сечения с номинальным диаметром 26 мм, класса точности А1 по ГОСТ 2590-2006 при отрезки её на сортовых ножницах (точность 0.8 мм) и пламенном нагреве природным газом с угаром от 0.4 до 0.7 %. Данные параметры определяют наиболее тяжёлые условия формирования выступов, позволяющих компенсировать максимальную неточность заготовки. Расчётные значения длины заготовки [168] составляют от 46 до 50 мм (см. раздел 2.2.1).

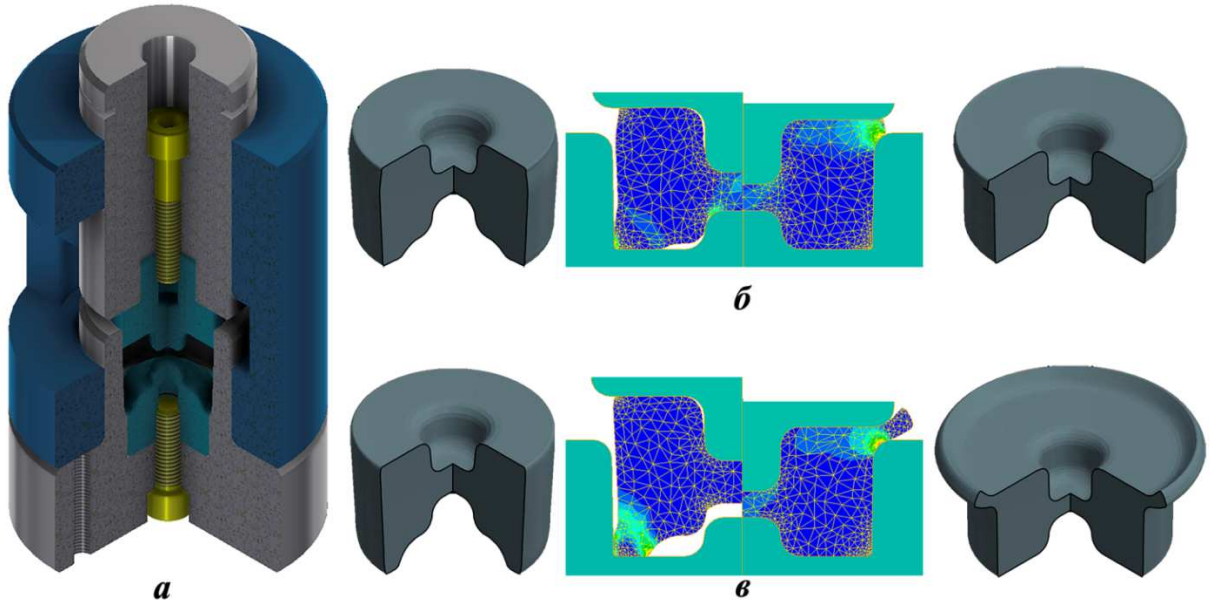


Рис. 3.19 – Результаты моделирования формообразования физической модели поковки: 3D-модель штампа предварительного перехода (***а***), формирование поковок минимальной (***б***) и максимальной (***в***) масс на окончательном переходе

На рисунке 3.19 приведены результаты моделирования в программе QForm 8.08 процесса штамповки на окончательном переходе физической модели поковки, позволяющей сформировать без образования зажимов штамповочный радиус на внешней стороне поковки равный 0.5 мм.

На рисунке 3.20 представлены фотографии штампа окончательного перехода и поковок физической модели после предварительного и окончательного переходов при минимальной и максимальной массе заготовок.

Рис. 3.20 – Фотографии штампа окончательного перехода (***а***), матрицы и вставок матрицы и пуансона предварительного перехода (***б***), поковок физической модели предварительного и окончательного переходов, полученных при минимальной (***в***) и максимальной (***г***) массе заготовок

Результаты расчётов технологических усилий штамповки и данные экспериментальных исследований приведены на рисунках 3.21 и 3.22.

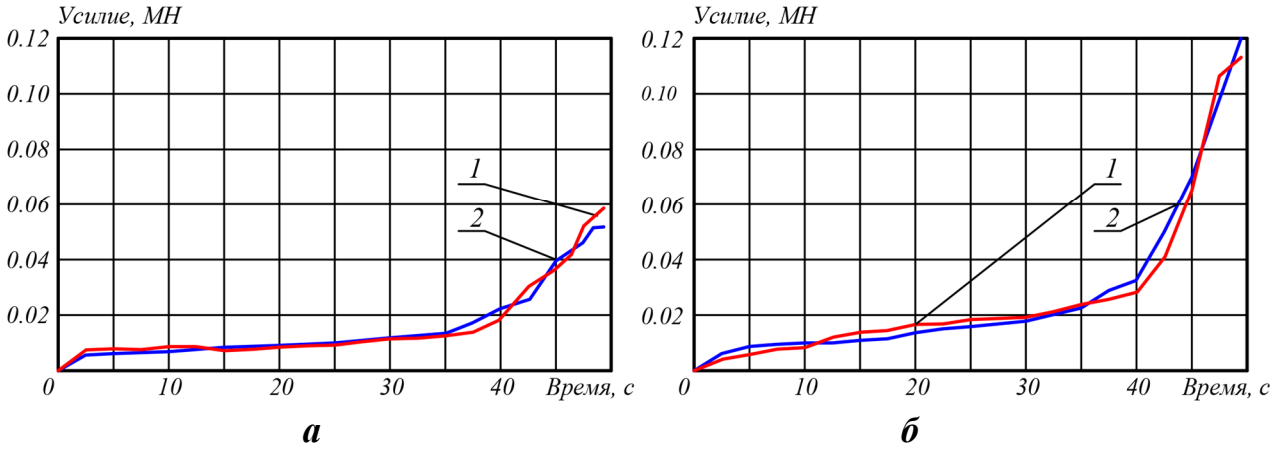


Рис. 3.21 – Предварительный переход. Графики изменения технологического усилия при минимальной (***а***) и максимальной (***б***) массе заготовки:
1 – данные эксперимента, 2 – данные моделирования

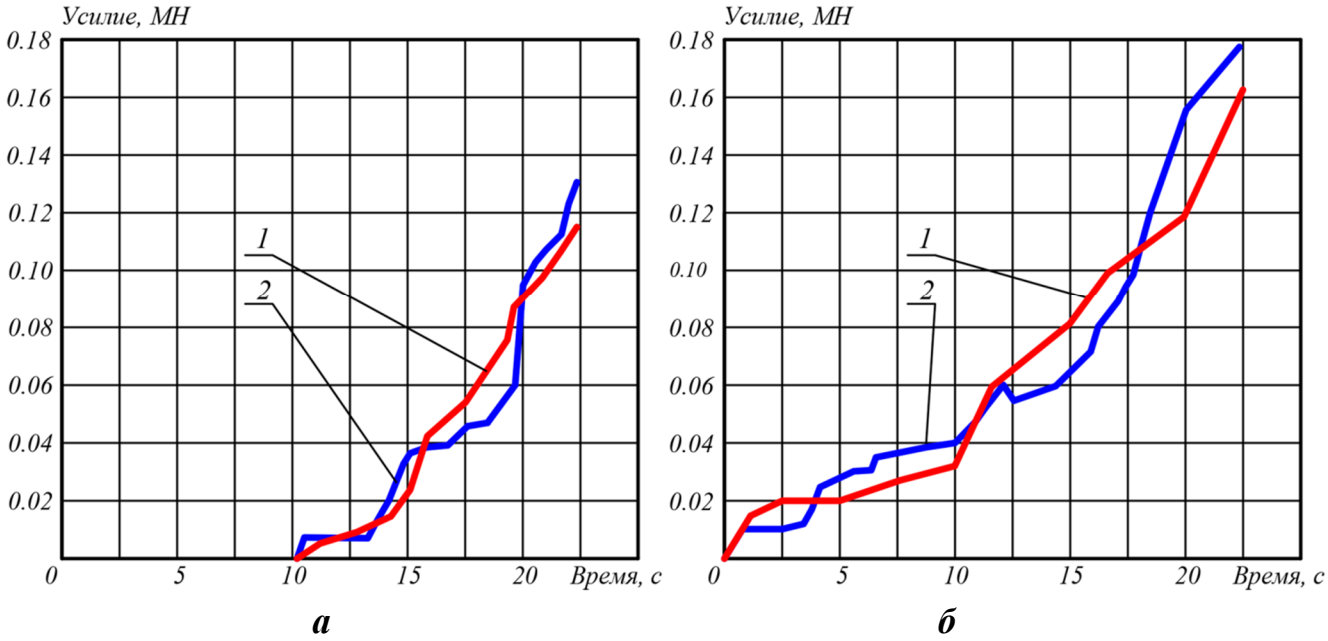


Рис. 3.22 – Окончательный переход. Графики изменения технологического усилия при минимальной (***а***) и максимальной (***б***) массе заготовки:
1 – данные эксперимента, 2 – данные моделирования

Анализ экспериментальных и теоретических данных говорит об их достаточно хорошей сходимости. Так формы отштампованных на предварительном и окончательном переходах поковок практически точно соответствуют теоретически построенным моделям (см. рисунки 3.19*б*, *в* и 3.20*б*, *в*). Отличие теоретических и экспериментальных средних значений технологических нагрузок (2.17) составляют 3.4% для предварительного перехода и 6.2% для окончательного перехода (см. рисунки 3.20*б* и 3.21*б*).

3.5.2. Исследование процесса изготовления круглой в плане поковки с формируемыми в открытом штампе на предварительном переходе технологическими выступами

Физическая модель детали и её поковка показаны на рисунке 3.23. Структура данных формы детали, в соответствии с (2.3):

$$Д(0,0,0) = D_0, H_0, L_0 \ -вD_0, вL_0 - нD_0, нL_0 = 38{,}20 - 12{,}7 - 12{,}7. \qquad (3.11)$$

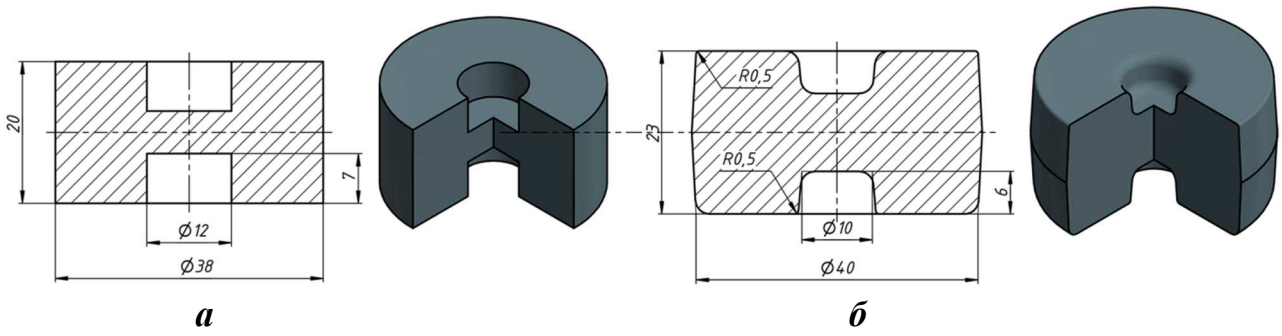


Рис. 3.23 – Физическая модель детали (***а***) и её поковка (***б***)

Поковка (см. рисунок 3.23*б*), спроектированная на основе (3.11), в соответствии с методикой [168] (см. раздел 2.2.2). Для наружной поверхности штамповочные уклоны приняты равными 3°, а радиусы R2. Для внутренней поверхности – уклоны 5°, радиусы R2. Исключением являются два радиуса, значение которых предполагается минимизировать. Их значения приняты равными 0.5 мм.

Параметры заготовки: диаметр 30 мм, высота 40 мм. Поскольку выступы, формируемыми на предварительном переходе не являются компенсаторами, в рамках данного исследования вопросы точности заготовки не рассматриваются.

На рисунке 3.24 показаны 3D-модель штампа предварительного перехода и результаты моделирования процессов формирования поковки на предварительном и окончательном переходах.

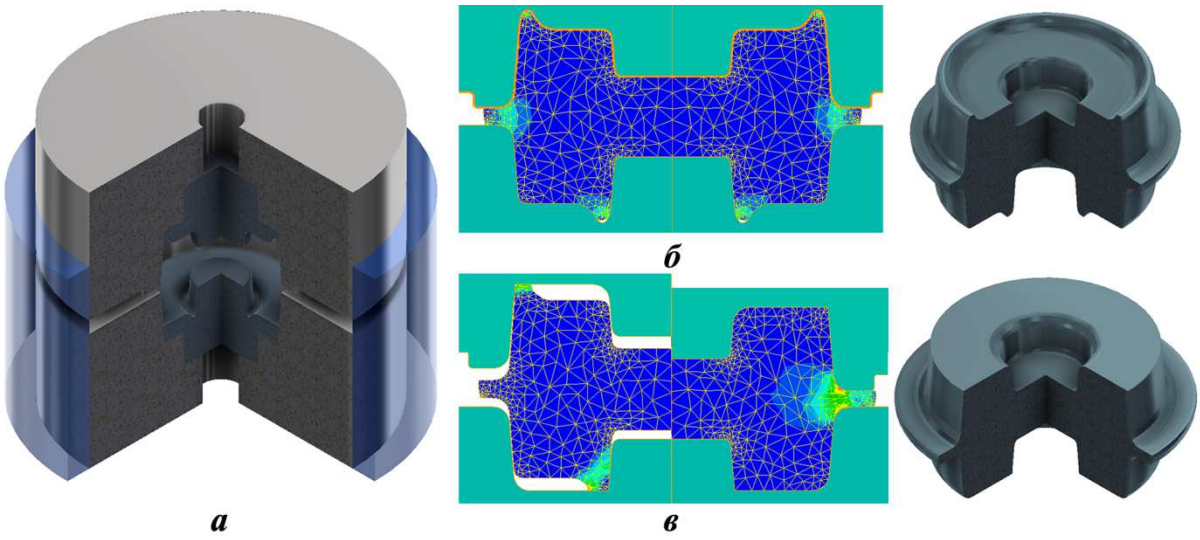
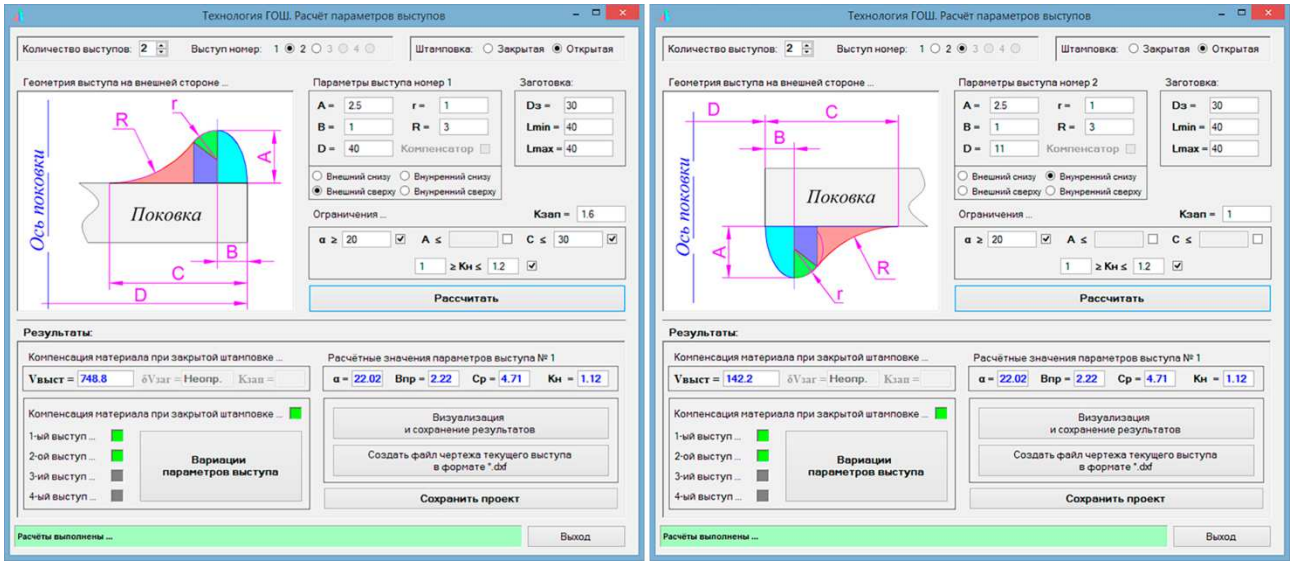


Рис. 3.24 – Результаты моделирования формообразования физической модели поковки: 3D-модель штампа предварительного перехода (***а***), формирование поковки на предварительном (***б***) и окончательном (***в***) переходах

Рис. 3.25 – Фотографии штампа и поковок (***а***), поковок физической модели предварительного (***б***) и окончательного (***в***) переходов

Результаты расчётов геометрических размеров гравюр штампов, формирующих выступы, показаны на рисунке 3.26.



а ***б***

Рис. 3.26 – Расчёт геометрических размеров гравюр штампов, формирующих выступы на внешней торцевой поверхности поковки сверху (***а***) и внутренней снизу (***б***)

Результаты расчётов технологических усилий штамповки и данные экспериментальных исследований приведены на рисунке 3.27.

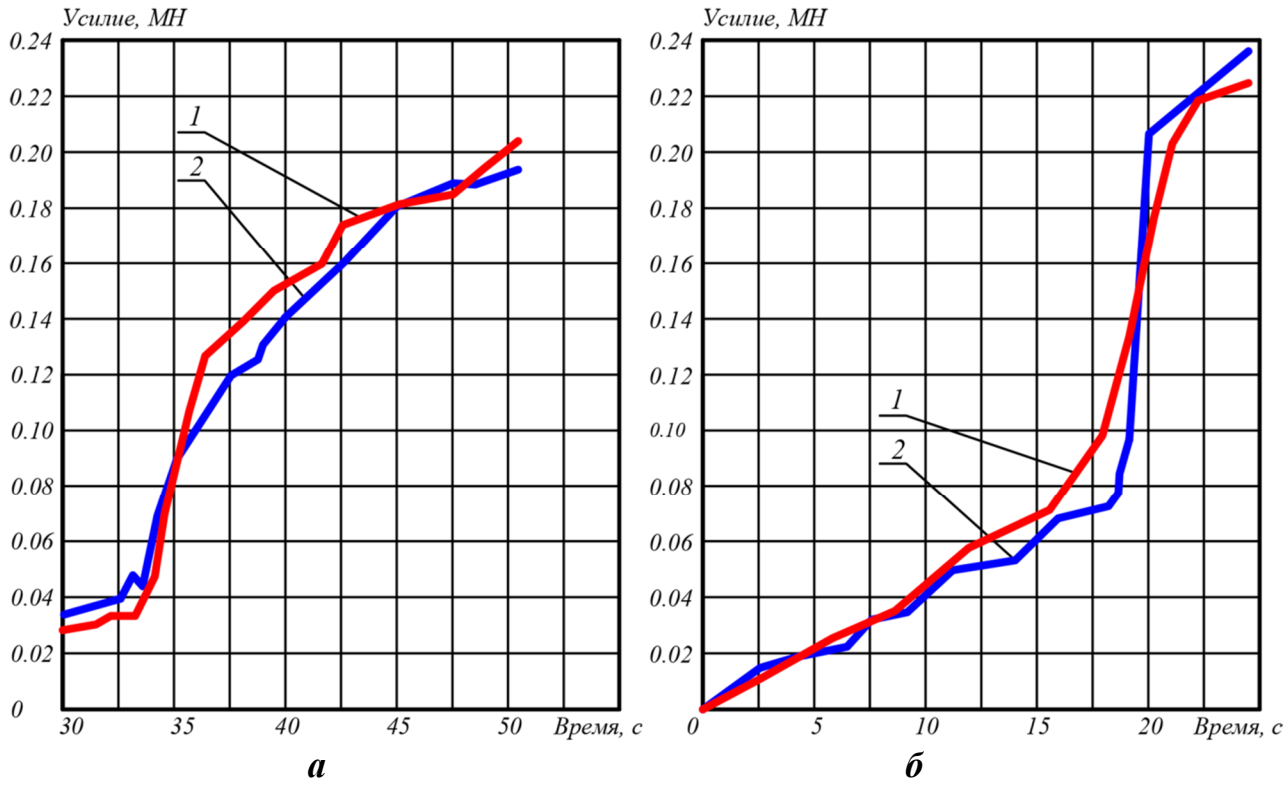


Рис. 3.27 – Графики изменения технологических усилий на предварительном (***а***) и окончательном (***б***) переходах:
1 – данные эксперимента, 2 – данные моделирования

Анализ приведённых данных показывает достаточно хорошую сходимость результатов численного и экспериментального моделирования. Формы отштампованных на предварительном и окончательном переходах поковок практически точно соответствуют теоретически построенным моделям (см. рисунки 3.24*б*, *в* и 3.25*б*, *в*). Отличие теоретических и экспериментальных значений технологических нагрузок (2.17) на предварительном и окончательном переходах минимальны (см. рисунки 3.27).

3.6. Выводы

1. Доказана возможность существенного повышения эффективности использования металла технологических процессов ГОШ за счёт уменьшения штамповочных радиусов поковок и, соответственно, припусков на их механическую обработку.

2. Исследована возможность уменьшения штамповочных радиусов поковок путём образования на предварительном переходе технологических выступов на их торцевых плоскостях с внешней и (или) внутренней стороны, деформация которых на окончательном переходе позволяет при минимальных технологических усилиях сформировать штамповочные радиусы размерами близкими к нулю.

3. Исследована возможность применения для образования выступов у полуфабрикатов поковок, полученных на предварительном переходе закрытых и открытых штампов. Доказана возможность использования выступов для компенсации металла вследствие неточностей заготовок при закрытой штамповке на предварительном переходе и дополнительное снижение, в сравнении с открытой штамповкой, металлоёмкости процесса ГОШ.

4. Рассмотрены особенности деформации технологических выступов на окончательном переходе. Установлено, что применение закрытых штампов на окончательном переходе, приводит к резкому снижению эффективности данного технологического процесса.

5. Разработана расчётная модель геометрии гравюры штампа, образующей выступ на полуфабрикате поковки предварительного перехода, и её программная реализация на ЭВМ, позволяющая гарантированно исключить зажимы при деформации выступа на окончательном переходе.

6. Разработана методика расчёта геометрии гравюр закрытых штампов предварительного перехода, образующих технологические выступы. Исследована эффективность технологических схем ГОШ, созданных в соответствии с этой методикой.

7. Разработана методика расчёта геометрии гравюр открытых штампов предварительного перехода, образующих технологические выступы, и исследована эффективность построенных в соответствии с данной методикой технологических схем ГОШ.

8. Экспериментально подтверждена работоспособность и эффективность новых технологических схем штамповки круглых в плане поковок и методик их расчётов.

4. ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ПРИМЕНЕНИЯ МЕТОДИК ПРОЕКТИРОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СХЕМ ГОШ НА КГШП КРУГЛЫХ В ПЛАНЕ ПОКОВОК

В главах 2 и 3 диссертации разработаны методики проектирования и анализа эффективности технологических схем штамповки на КГШП круглых в плане поковок и программы для их реализации на ЭВМ:

- автоматизация процесса назначения припусков и допусков при разработке чертежа поковки на основании структуры данных формы детали и расчёта коэффициента точности поковки [168, 193 – 196];
- анализ эффективности технологического процесса ГОШ на основе оценки значений его коэффициентов использования металла: среднего $K_И$ и минимального ${}_{min}K_И$ (2.11) [168, 194];
- анализ влияния на эффективность процессов ГОШ параметров заготовки на основе значения коэффициента K_V (2.18) [197];
- анализ эффективности процесса ГОШ на КГШП на основе оценки значений технологических усилий, определяемых коэффициентами запаса прочности $K_{ЗС}$, ${}_{ср}K_{ЗС}$ (2.17) [169, 198];
- анализ эффективности процесса ГОШ на основе оценки динамических процессов, развивающихся в элементах КГШП при его реализации, количественно определяемых показателями (2.43) – (2.49) [177, 178, 185, 193];
- расчёт геометрии гравюр штампов, предназначенных для реализации технологических процессов ГОШ с выступами на предварительном переходе (см. разделы 3.2, 3.3) [169, 170, 183, 186, 199].

Целью данной главы является их апробация на примере изготовления поковки детали “Каретка синхронизатора 2-ой и 3-ей передачи” (см. рисунок 4.1) на одном из ведущих предприятий России – автомобильном заводе “КАМАЗ”.

При обозначении данной детали в дальнейшем будем использовать её сокращённое название – “Каретка синхронизатора”.

Рисунок 4.1 – Каретка синхронизатора

Материал: Сталь 15ХГН2ТА ГОСТ 4543-71. Масса: 5.272 кг

4.1. Анализ эффективности традиционной технологической схемы ГОШ на КГШП поковки детали “Каретка синхронизатора”

4.1.1. Исследование металлоёмкости ГОШ на КГШП в зависимости от конфигурации поковки

На рисунке 4.2 показана структура данных, определяющая форму детали (см. раздел 2.1), в соответствии с которыми назначаются допуски и припуски поковки (на рисунке 4.2 условно показаны линией “—”).

Традиционная технологическая схема изготовления поковки (вариант №1) данной детали (см. рисунок 4.3) [14, 19, 80] включает четыре технологических перехода: осадку заготовки, предварительную штамповку, обрезку облоя и окончательную штамповку, пробивку перемычки.

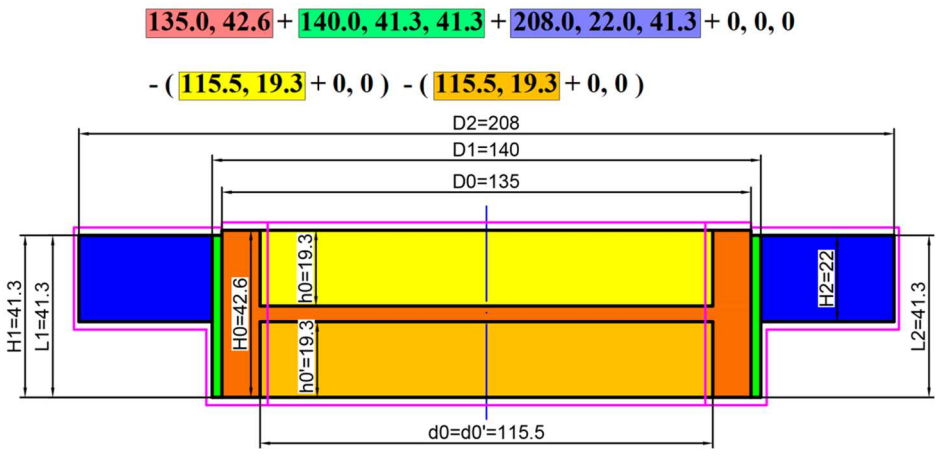


Рисунок 4.2 – Структура данных формы детали “Каретка синхронизатора”

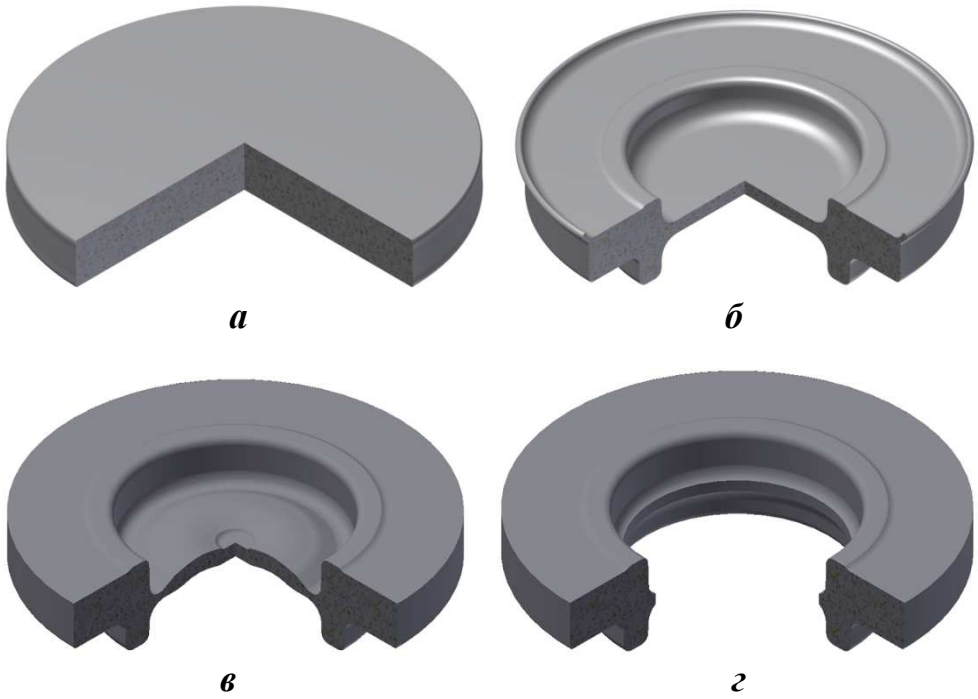


Рисунок 4.3 – Штамповочные переходы процесса ГОШ на КГШП изготовления детали в соответствии с традиционной технологией: ***а*** – осадка, ***б*** – предварительная штамповка, ***в*** – обрезка облоя и окончательная штамповка, ***г*** – пробивка перемычки

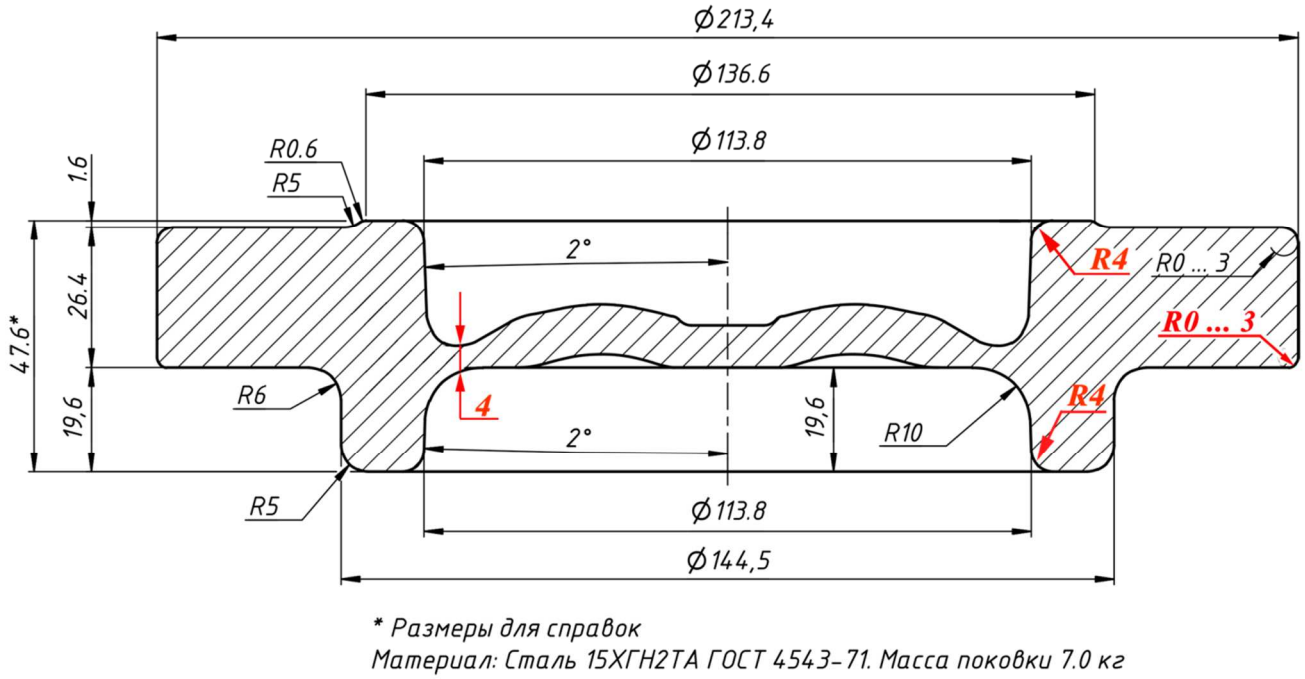


Рисунок 4.4 – Чертёж поковки детали “Каретка синхронизатора”

Чертёж готовой поковки с перемычкой, получаемой после окончательной штамповки (см. рисунок 4.3*в*), показан на рисунке 4.4.

Анализ влияния геометрии поковки на её металлоёмкость [168] приведен на рисунке 4.5.

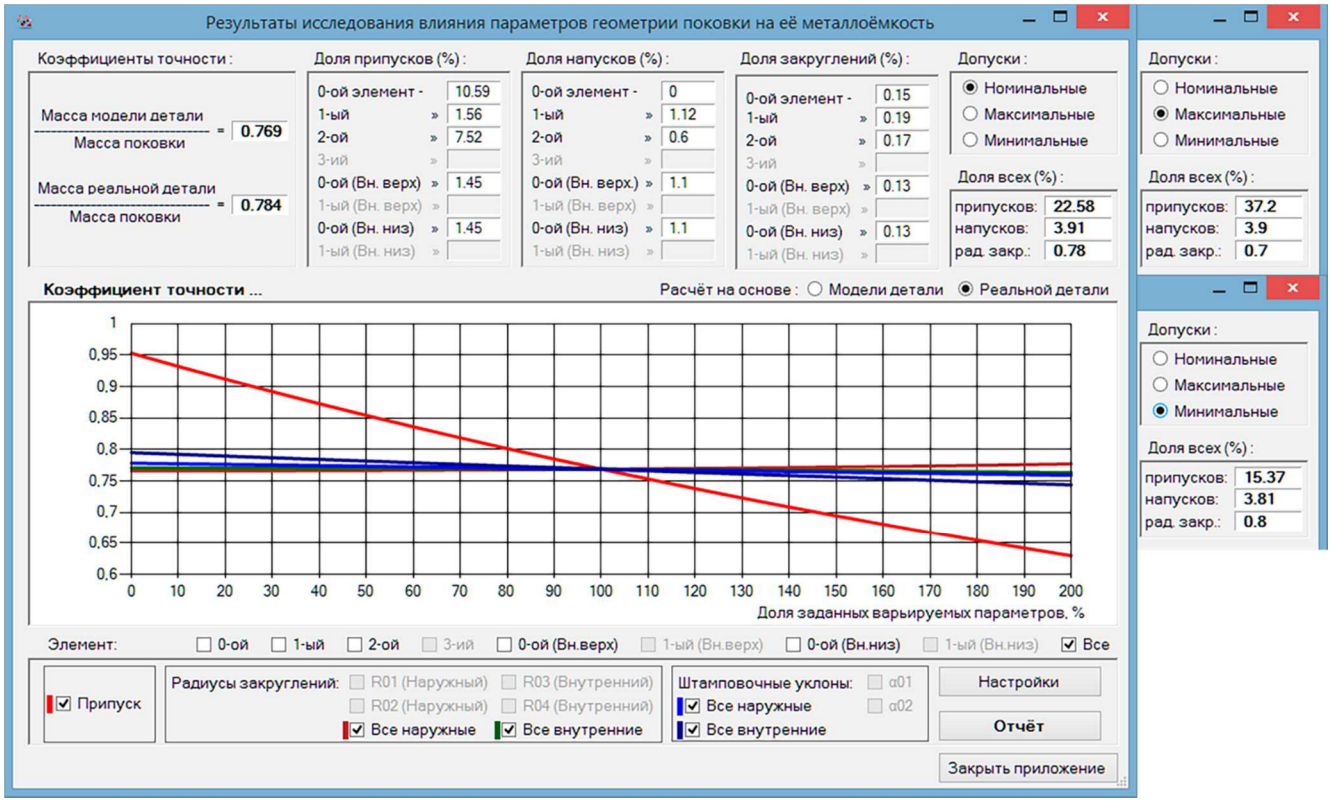


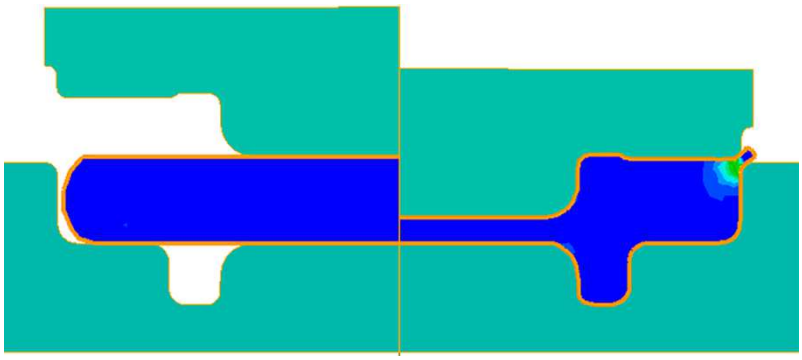
Рисунок 4.5 – Исследование металлоёмкости поковки детали “Каретка синхронизатора” в зависимости от величин назначенных припусков и напусков

Из анализа приведённых на рисунке 4.5 данных следует, что приблизительно от 15.37 до 37.2 процентов потерь металла при изготовлении поковки (без учёта массы облоя и перемычки) связаны с припусками на механическую обработку, значения которых зависят от радиусов закруглений наружных углов поковки (см. рисунок 3.1 и таблица 3.1).

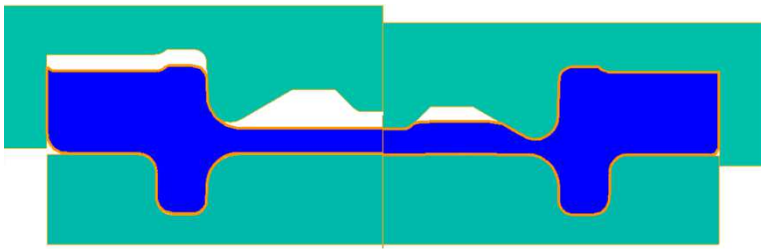
Значения коэффициента точности поковки $K_П$ (2.12), определяющего потери металла, связанные с конфигурацией поковки – от 0.733 до 0.850.

4.1.2. Исследование влияния точности заготовки, применяемой для штамповки поковки, на эффективность технологического процесса ГОШ

Потери, связанные с особенностями изготовления заготовки и технологической схемы штамповки, определяются коэффициентами использования металла (2.11) $K_И$ (средним), ${}_{min}K_И$ (минимальным). Выполнение расчётов предполагает наличие данных о минимальной массе заготовки, при которой возможна бездефектная штамповка поковки детали (см. раздел 2.2.1). На рисунке 4.6 показаны результаты моделирования в программе QForm ГОШ на КГШП модели К8544 поковки детали “Каретка синхронизатора” при минимальной массе заготовки. Установлено, что при номинальном диаметре заготовки равном 90 мм, минимальное значение её высоты должно составлять 140.5 мм.



а



б

Рисунок 4.6 – Моделирование процесса ГОШ поковки детали “Каретка синхронизатора” с целью определения минимальной массы заготовки: ***а*** – предварительный переход, ***б*** – окончательный переход

Максимальная высота заготовки, при заданной минимальной её величине, теоретически ограничена условием размещения осаженной заготовки в ручье штампа предварительного перехода. Точное значение массы заготовки обеспечи-

вается за счёт обрезки облоя перед закрытой штамповкой на окончательном переходе. Небольшие отклонения массы заготовки вследствие износа инструмента компенсируются за счёт вытеснения излишков металла в перемычку, что влечёт, как показывают исследования, выполненные в разделе 3.1.2, резкий рост технологического усилия.

На практике значение максимальной высоты заготовки имеет ограничение, связанное с технологией её изготовления (см. раздел 2.2.1). Результаты расчёта металлоёмкости технологического процесса ГОШ, с учётом потерь металла при изготовлении заготовки, полученные по методике, разработанной в разделе 2.2.1, представлены на рисунке 4.7.

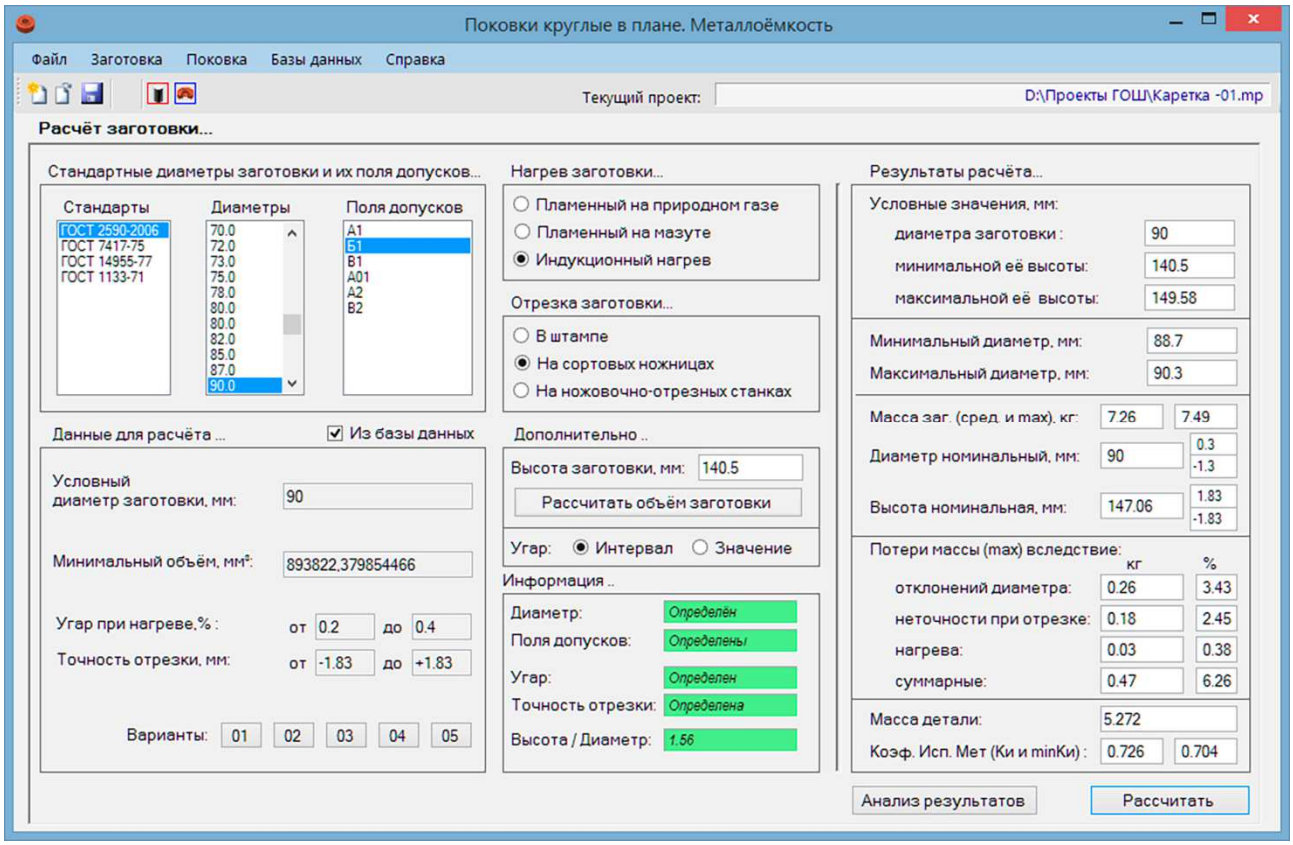


Рисунок 4.7 – Расчёт металлоёмкости технологического процесса ГОШ с учётом потерь металла при изготовлении заготовки

Коэффициенты использования металла, определяющие потери, связанные с особенностями изготовления заготовки, – $K_И = 0.726$ и ${}_{min}K_И = 0.704$.

Возможность реализации технологического процесса ГОШ при увеличении массы заготовки определяется значением коэффициента K_V (2.18). Как показано в разделе 2.4, использование этого коэффициента при исследованиях, связанных с возможностью реализации технологического процесса ГОШ, имеет принципиальное значение, когда на предварительном переходе применяется закрытая штамповка. В данном случае увеличение массы заготовки при фиксированном значении минимальной массы заготовки, ограничивается возможностями одновременного центрирования (при минимальной массе заготовки) и размещения (при максимальной массе заготовки) осаженной заготовки в ручье штампа предварительного перехода (см. рисунок 4.8).

а ***б*** ***в***

Рисунок 4.8 – Центрирование осаженной заготовки на предварительном переходе: ***а*** – при минимальной ${}_{З}L_{\min}$ = 140.5 мм) массе заготовки, ***б*** – превышение массы заготовки, приводящее к невозможности её центрирования (L = 154.5 мм), ***в*** – максимальная масса заготовки из условия её центрирования (L = 154.0 мм)

В соответствии (2.18) при ${}_{З}L_{\min}$ = 140.5, ${}_{З}L_{\max}$ = 149.58, ${}_{П}L_{\max}$ = 154.0 (см. рисунки 4.7 и 4.8):

$$0 \le K_V \le 1$$

$$K_V = \frac{{}_{П}M_{\max} - {}_{З}M_{\max}}{{}_{П}M_{\max} - {}_{З}M_{\min}} = \frac{{}_{П}L_{\max} - {}_{З}L_{\max}}{{}_{П}L_{\max} - {}_{З}L_{\min}} = \frac{154.0 - 149.58}{154.0 - 140.5} = 0.327$$

Таким образом, соотношение $0 \leq K_V \leq 1$ для предварительного перехода выполняется.

Для окончательного перехода масса полуфабриката, полученного после предварительного перехода и обрезки, теоретически есть величина постоянная. Соответственно исследование эффективности технологического процесса на окончательном переходе на основе анализа соотношения $0 \leq K_V \leq 1$ не актуально. На практике возможна ситуация, когда из-за неравномерности износа гравюр штампов предварительного и окончательного перехода, объём полуфабриката, сформированного на предварительном переходе, может оказаться больше допустимого, что приведёт к невыполнению соотношения $0 \leq K_V \leq 1$, в первую очередь из-за резкого роста технологического усилия при заполнении компенсатора излишками металла. Исследования этой ситуации в рамках данной работы не выполнялись.

4.1.3. Исследование эффективности технологического процесса ГОШ в зависимости от условий работы КГШП

На рисунке 4.9 и 4.10 представлены результаты расчёта технологического усилия на предварительном и окончательном переходе, полученные в результате моделирования процесса ГОШ на КГШП К8544 в программах QForm и ДКП [65, 66, 177, 185].

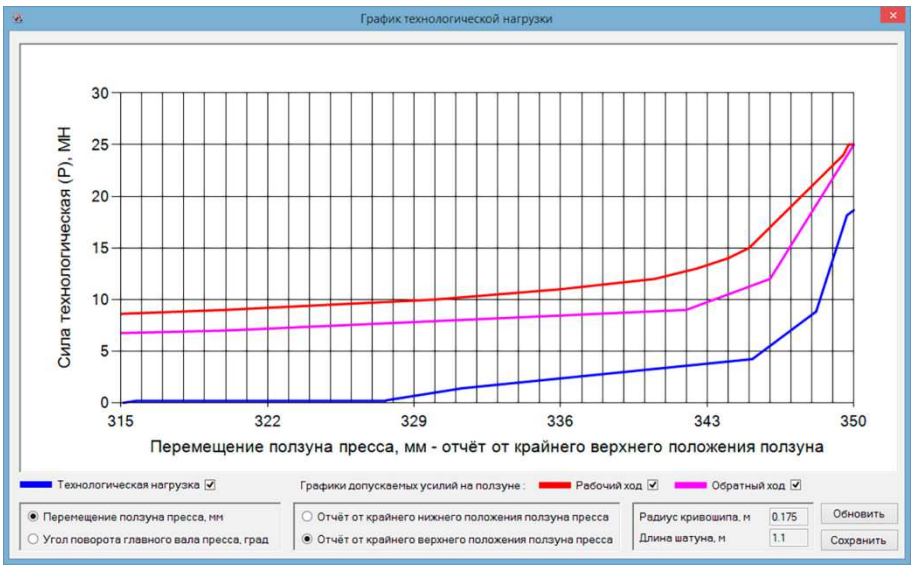


Рисунок 4.9 – Технологическое усилие штамповки на предварительном переходе

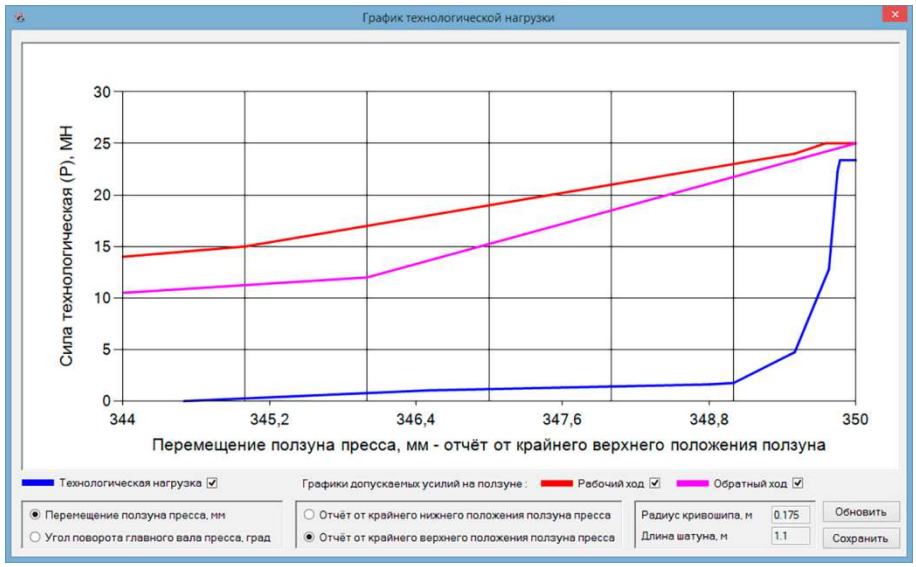


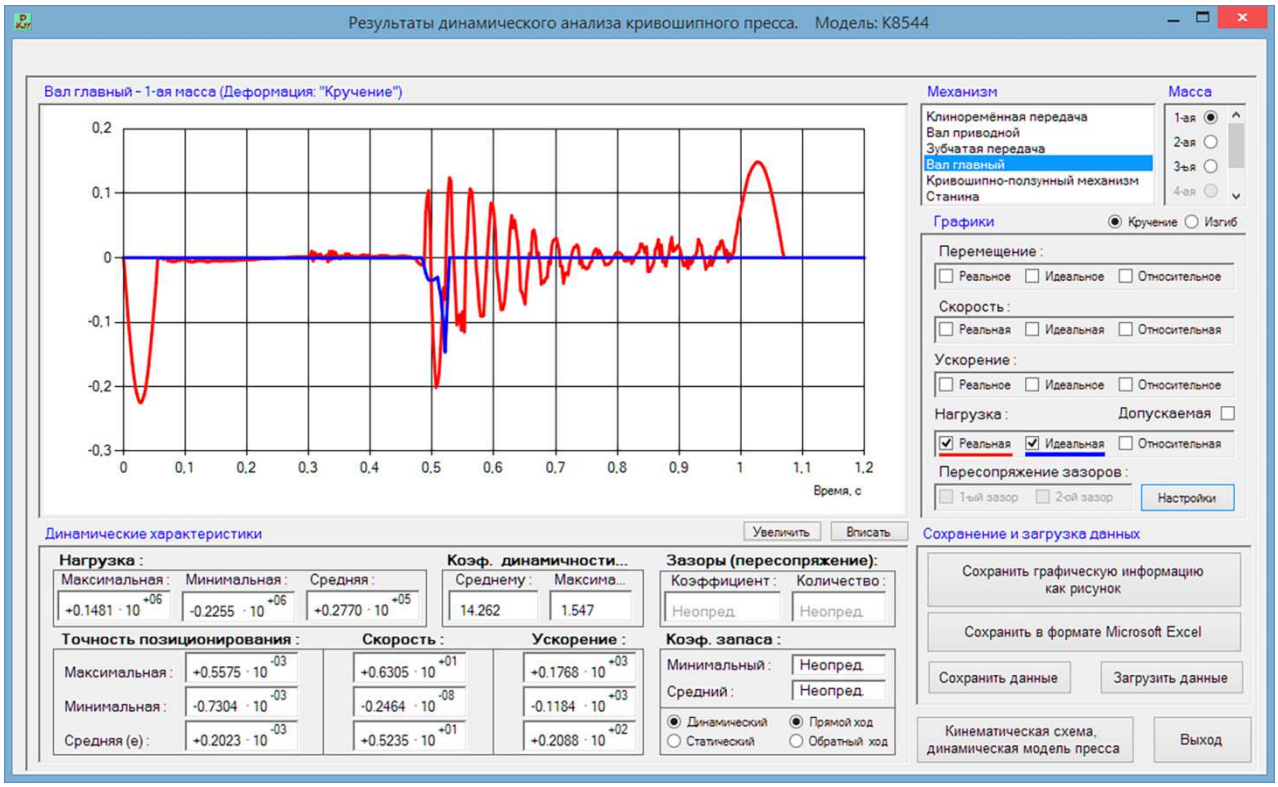
Рисунок 4.10 – Технологическое усилие штамповки на окончательном переходе

Масса заготовки – максимальная, соответствующая условной её высоте 149.58 мм (см. раздел 4.1.2, рисунок 4.7). Допускаемые усилия на ползуне определены по методике, приведённой в разделе 2.3. Коэффициенты запаса (2.18): $K_{ЗС}$ = 1.07, $срK_{ЗС}$ = 15.409 – для окончательного перехода, $K_{ЗС}$ = 1.34, $срK_{ЗС}$ = 6.496 – для предварительного перехода.

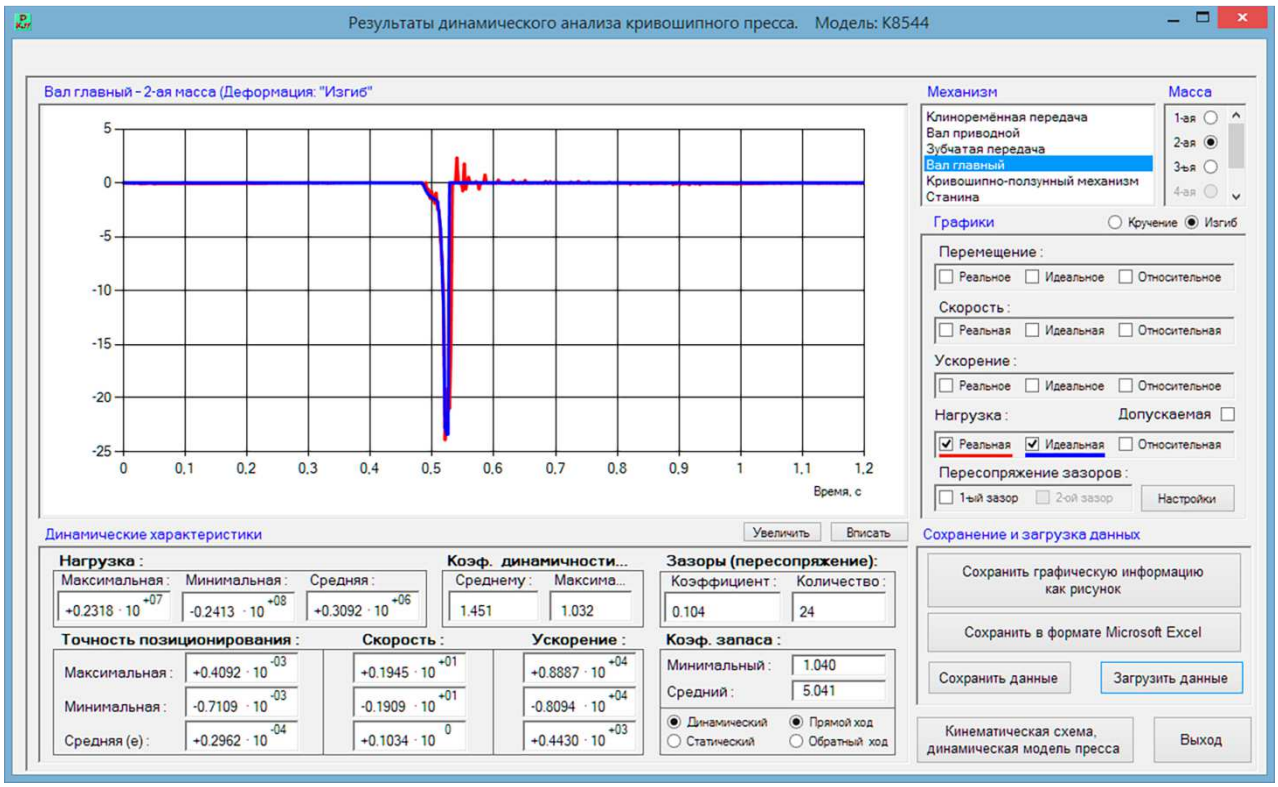
Очевидно, что усилие штамповки пресса на окончательном переходе близко к критическому значению, однако с учётом данных, приведённых в разделе 2.3 (см. рисунок 2.19), следует признать возможность применения пресса К8544 для штамповки поковки детали “Каретка синхронизатора”.

Вывод о возможности применения пресса для штамповки поковки детали “Каретка синхронизатора”, сделанный выше, требует уточнения, поскольку при его формулировке не учитывались динамические нагрузки в КГШП (см. раздел 2.5).

Методика оценки влияния динамических процессов в кривошипном прессе разработана в разделе 2.5.2. В соответствии с этой методикой работу пресса будем оценивать по 7-ми категориям параметров (2.43) – (2.49). Их расчёт выполняется в окне результатов моделирования динамических процессов в КГШП (см. рисунки 4.11 и 4.12).



а



б

Рисунок 4.11 – Моделирование динамических процессов в КГШП К8544. Окончательный штамповочный переход, главный вал пресса: ***а*** – крутящий момент, ***б*** – изгибающее усилие

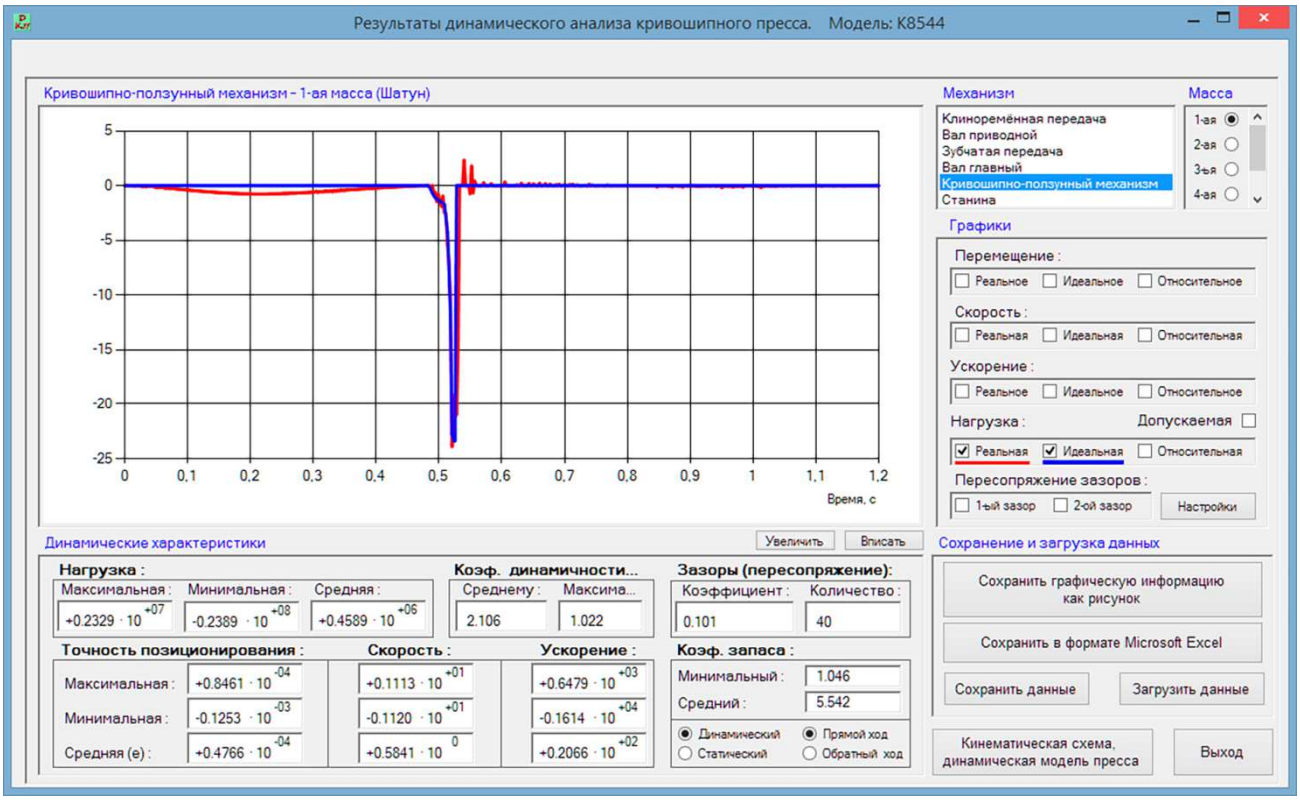


Рисунок 4.12 – Моделирование динамических процессов в КГШП К8544. Окончательный штамповочный переход, шатун пресса: усилие сжатия (растяжения)

В результате исследования динамики КГШП К8544 при штамповке на окончательном переходе поковки детали “Каретка синхронизатор” по традиционной технологии определены следующие показатели оценки уровня динамических процессов для главного вала и ползуна пресса:

1. Коэффициенты запаса прочности по динамическим усилиям (2.43):

- $K_{ЗД}$ = 1.040, $_{ср}K_{ЗД}$ = 5.041 – главный вал (изгиб);
- $K_{ЗД}$ = 1.046, $_{ср}K_{ЗД}$ = 5.542 – шатун.

2. Экстремальные значения динамических нагрузок (2.44), МН (МН·м):

- M_{max} = 0.148, M_{min} = 0.226 – главный вал (кручение);
- P_{max} = 2.318, P_{min} = 24.13 – главный вал (изгиб);
- P_{max} = 2.229, P_{min} = 23.89 – шатун.

3. Средние значения динамических нагрузок (2.45), МН:

- ${}_{ср}M_{Д}$ = 0.028 – главный вал (кручение);
- ${}_{ср}P_{Д}$ = 0.309 – главный вал (изгиб);
- ${}_{ср}P_{Д}$ = 0.459 – шатун.

4. Средние значения коэффициентов пересопряжения зазоров (2.46):

- ${}_{ср}K_{зазор}$ = 0.104 – главный вал (изгиб);
- ${}_{ср}K_{зазор}$ = 0.101 – шатун.

5. Количество пересопряжений зазоров в течение одного хода пресса (2.47):

- $N_{зазор}$ = 24 – главный вал (изгиб);
- $N_{зазор}$ = 40 – шатун.

6. Коэффициент динамичности по средней нагрузке (2.48):

- ${}_{ср}K_{Д}$ = 14.26 – главный вал (кручение);
- ${}_{ср}K_{Д}$ = 1.451 – главный вал (изгиб);
- ${}_{ср}K_{Д}$ = 2.106 – шатун.

7. Коэффициент динамичности по максимальной нагрузке (2.49):

- ${}_{max}K_{Д}$ = 1.547 – главный вал (кручение);
- ${}_{max}K_{Д}$ = 1.032 – главный вал (изгиб);
- ${}_{max}K_{Д}$ = 1.022 – шатун.

4.2. Совершенствование традиционной технологической схемы ГОШ на КГШП поковки детали “Каретка синхронизатора”

Анализ результатов исследования эффективности традиционной технологической схемы штамповки (см. раздел 4.1) позволяет определить следующие её основные недостатки:

- невозможность сформировать на окончательном переходе штамповочный радиус меньший 1.5 мм (см. рисунки 4.4 выделен красным цветом);

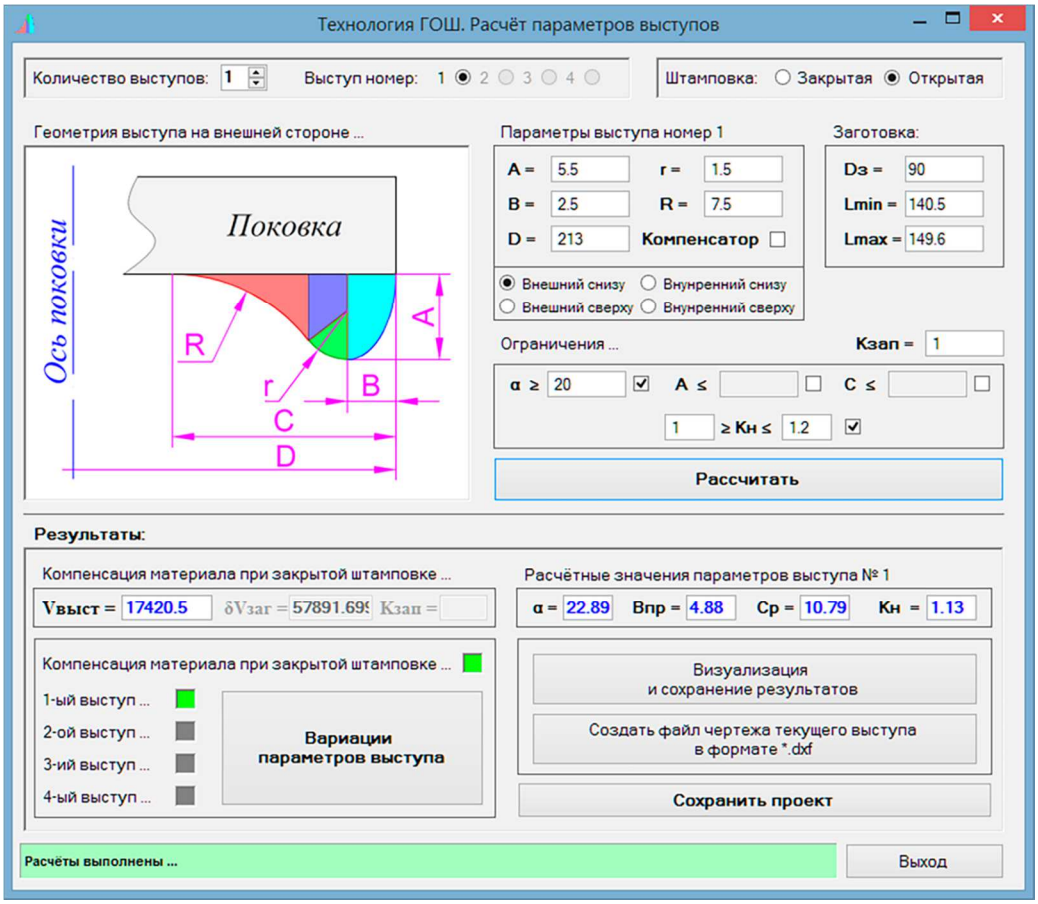
- резкий рост технологического усилия на окончательном переходе при попытке уменьшения указанного штамповочного радиуса до значения меньшего 3 мм из-за необходимости формирования на предварительном переходе поковки с массой превышающей готовую поковку и создания условий для сдерживания перемещения излишков этой массы в компенсатор.

Очевидно, что решение задачи формирования данного радиуса с меньшим значением при меньшем (или хотя бы уже существующем) технологическом усилии позволит улучшить большинство из показателей эффективности данного технологического процесса ГОШ, исследование которых выполнено в разделах 4.1.1 и 4.1.3.

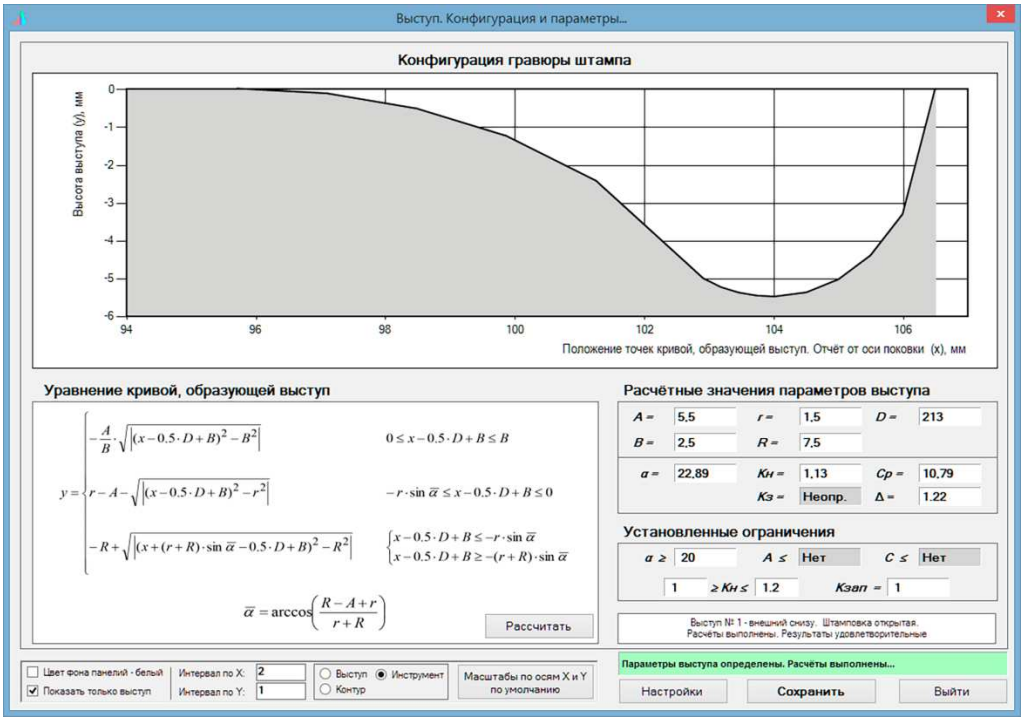
4.2.1. Технологическая схема ГОШ с выступом на внешней стороне полуфабриката поковки, формируемым на предварительном переходе

Методика разработки технологического процесса ГОШ с выступами, формируемыми на предварительном переходе способом открытой штамповки, рассмотрена в разделах 3.1.2, 3.3, 3.4. Однако её применение в данном конкретном случае имеет особенность, связанную с необходимостью полного заполнения гравюры штампа из-за обязательной точной дозировки объёма металла полуфабриката, получаемого на предварительном переходе. В результате полуфабрикат поковки, получаемой на предварительном переходе, будет отличаться не только наличием выступа, но и размерами, в данном случае высоты внешнего цилиндрического тела поковки, обозначенного синим цветом в структуре данных формы детали (см. рисунок 4.2).

Расчёт геометрических параметров выступа и конфигурации гравюры штампа, формирующей этот выступ, показаны на рисунке 4.13. На рисунках 4.14 4.15 приведены результаты моделирования технологического процесса ГОШ на КГШП К8544.



а



б

Рисунок 4.13 – Расчёт параметров выступов при проектировании процесса ГОШ поковки детали “Каретка синхронизатора”: ***а*** – расчёт параметров выступа, ***б*** – конфигурация гравюры штампа, формирующей выступ

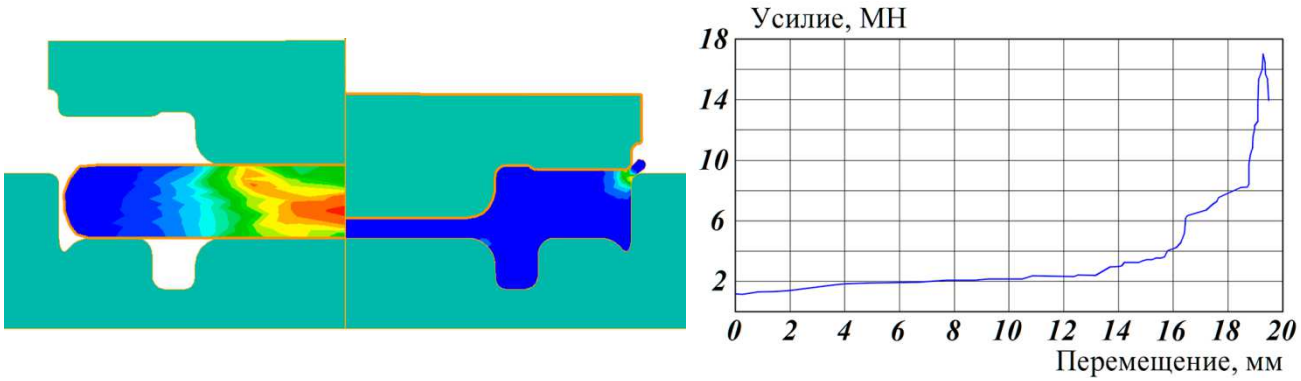


Рисунок 4.14 – Моделирование процесса ГОШ при формировании полуфабриката поковки на предварительном переходе из заготовки минимальной массы

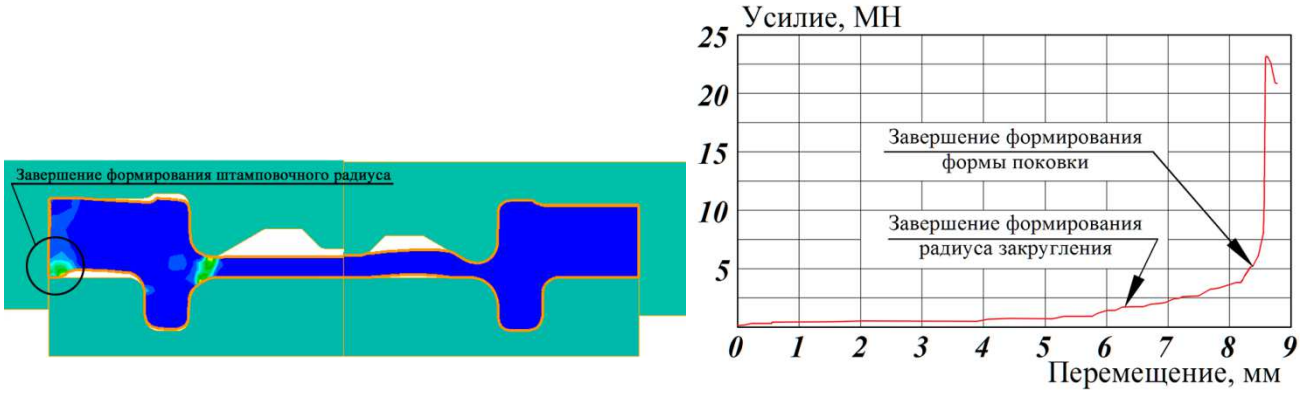


Рисунок 4.15 – Моделирование процесса ГОШ при формировании поковки на окончательном переходе

При проектировании данного варианта технологического процесса ГОШ (см. рисунок 4.14) точно выполнялось условие равенства объёмов поковок (без перемычки и облоя), получаемых на предварительном переходе, традиционным и данным способами за счёт уменьшения закрытой высоты штампа, а также – условие равенства толщины облоя, за счёт уменьшения высоты матрицы штампа. Оснастка и параметры окончательного перехода (см. рисунок 4.15) точно соответствуют традиционным. Выполнение этих условий позволило обеспечить приблизительное равенство технологических усилий на предварительных и окончательных переходах и, тем самым, определить пути совершенствования технологического процесса.

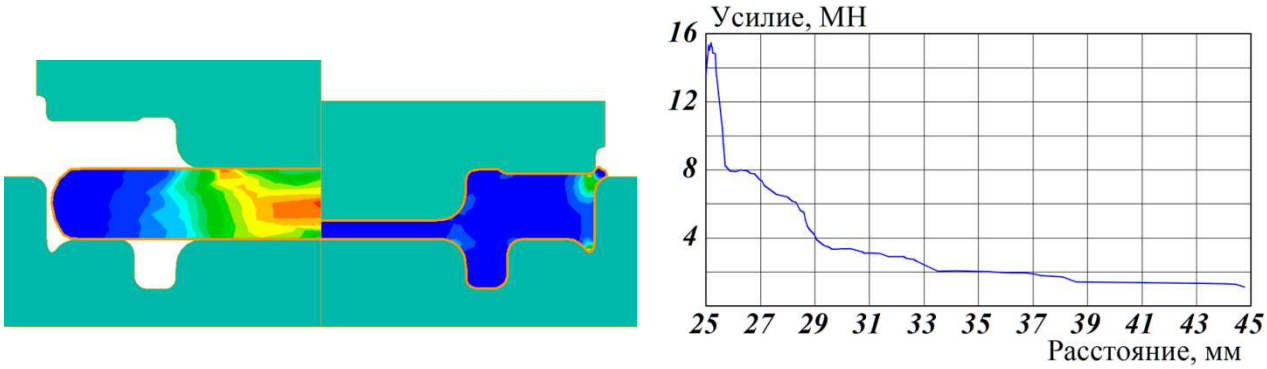
Анализ результатов моделирования процесса ГОШ поковки детали “Каретка синхронизатора” на окончательном переходе, полученной при минимальной массе поковки (см. рисунок 4.15), позволяет сделать следующие выводы:

- за счёт выступа, сформированного у полуфабриката поковки на предварительном переходе, заполнения штамповочного радиуса с размерами близкими к нулю при его деформации осуществляется в самом начале операции штамповки (см. рисунки 4.4 и 4.15) при усилии ≈ 3 МН;
- поскольку штамповочный радиус оказывается уже сформированным к концу рабочего хода пресса, нет необходимости формирования на предварительном переходе полуфабриката поковки с массой превышающей готовую поковку и создания условий для сдерживания перемещения излишков этой массы в компенсатор;
- с учётом сказанного в предыдущем пункте появляется возможность за счёт изменения геометрических параметров компенсатора, в первую очередь размера равного 4 мм (на рисунке 4.4 выделен красным цветом) уменьшить максимальное технологическое усилие штамповки;
- снизить массу готовой поковки за счёт уменьшения припуска на механическую обработку (показатель КП) внешней цилиндрической поверхности (см. рисунок 3.1 и таблица 3.1).

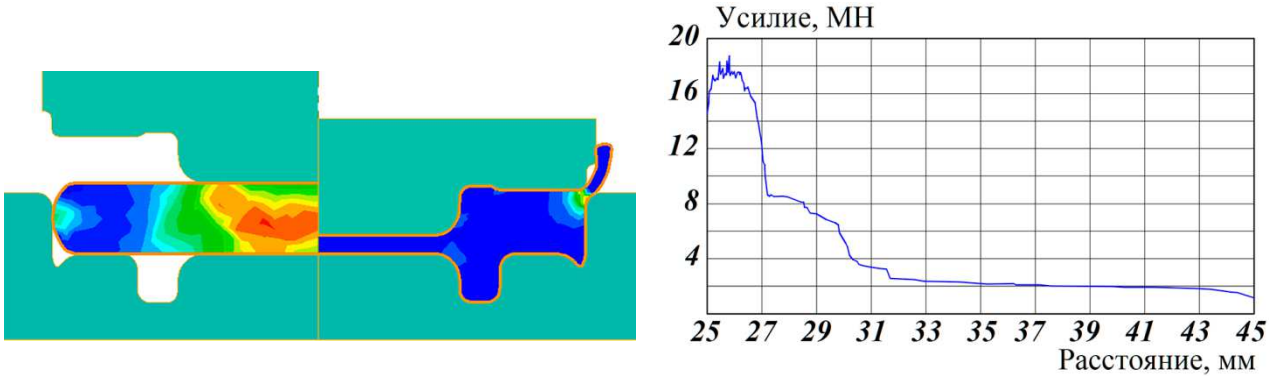
4.2.2. Повышение эффективности технологической схемы ГОШ на КГШП с выступом на внешней стороне полуфабриката поковки, формируемым на предварительном переходе

Результаты моделирования технологического процесса ГОШ на КГШП К8544, разработанного на основе исследований, выполненных в разделе 4.2.1, приведены на рисунке 4.16.

При разработке чертежа готовой поковки изменены значения припусков на механическую обработку цилиндрической поверхности, обозначенной в структуре данных формы детали индексом 2 (синий цвет), на значения 1.25 мм (в место 2.7 мм и 2.2 мм, установленных в соответствии с чертежом поковки, или 2.0 мм и 1.6 мм, рассчитанных в соответствии с ГОСТ 7505-89.



а



б

Рисунок 4.16 – Моделирование технологического процесса ГОШ. Предварительный переход: ***а*** – минимальная и ***б*** – максимальная массы заготовки

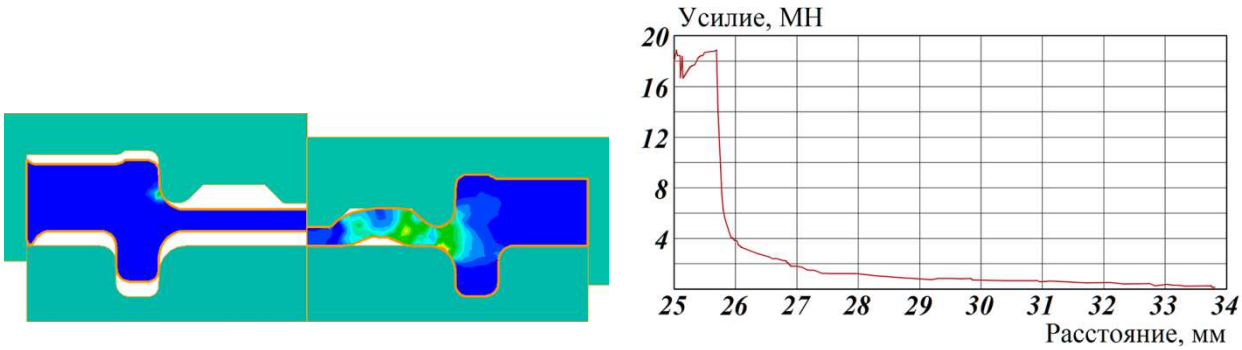
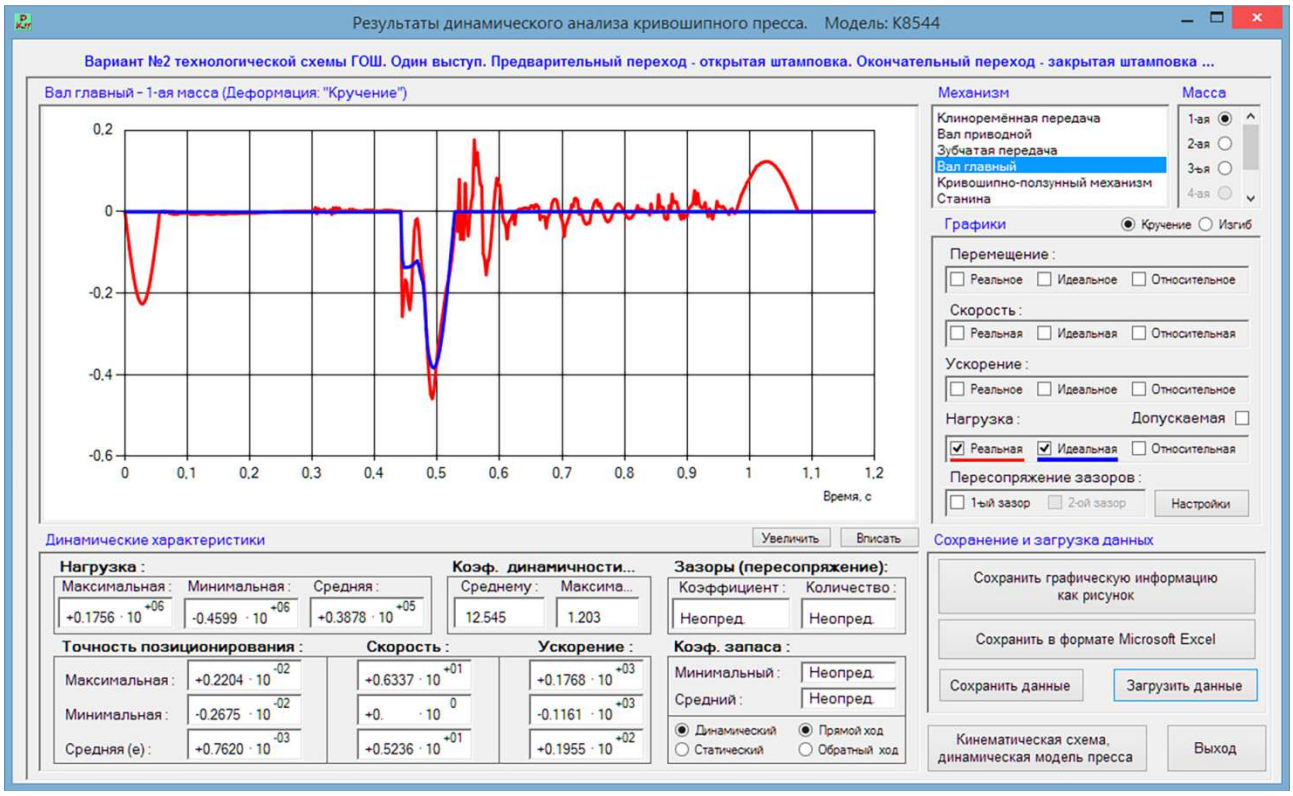
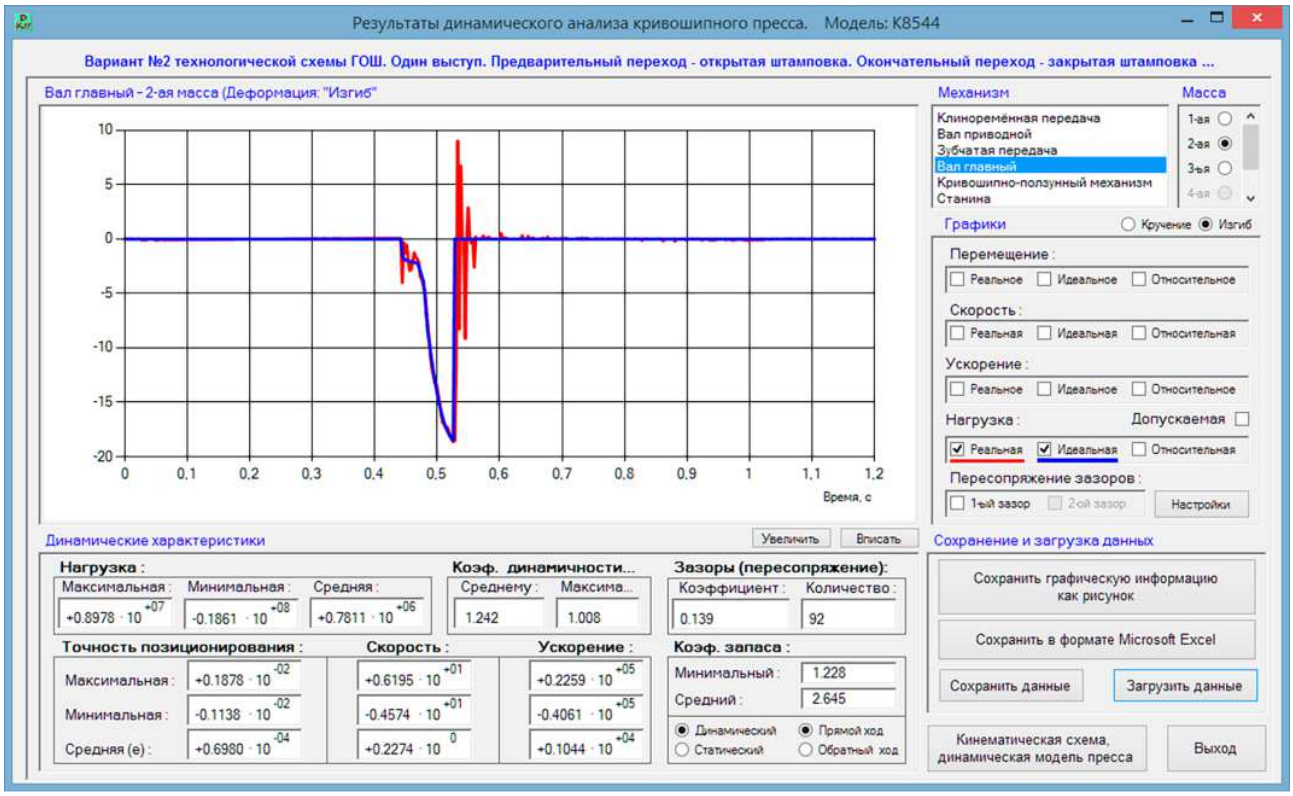


Рисунок 4.17 – Моделирование технологического процесса изготовления поковки “Каретка синхронизатора”. Окончательный переход

В результате изменений, внесённых в чертёж поковки, минимальная условная высота заготовки уменьшилась до значения 138.0 мм, а максимальная – до 147.0 мм. Соответственно улучшились показатели металлоёмкости технологического процесса ГОШ: $K_{И}$ = 0.738, $_{min}K_{И}$ = 0.717 (в процентном соотношении – ≈1.7%) и $K_{П}$ = 0.858. Значение коэффициента K_{V} не изменилось (K_{V} = 0.327).



а



б

Рисунок 4.18 – Моделирование динамических процессов в КГШП К8544. Предварительный штамповочный переход, главный вал пресса: ***а*** – крутящий момент, ***б*** – изгибающее усилие

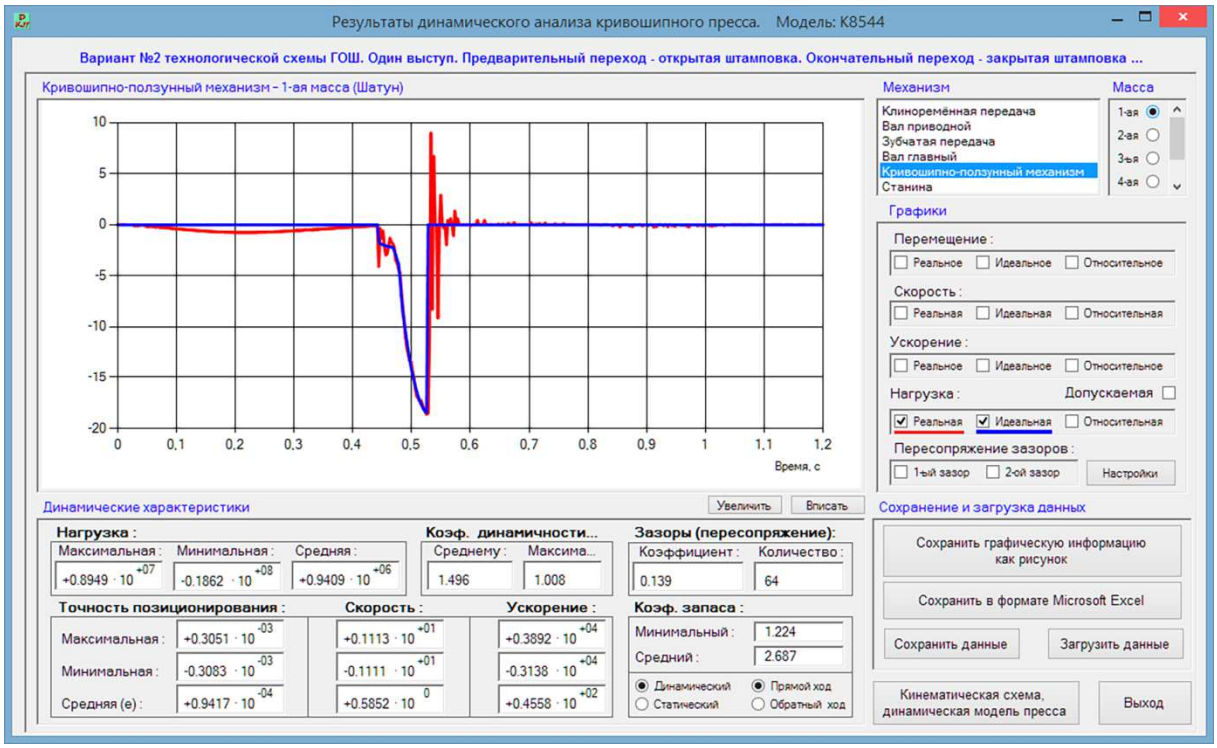


Рисунок 4.19 – Моделирование динамических процессов в КГШП К8544. Предварительный штамповочный переход, шатун пресса: усилие сжатия (растяжения)

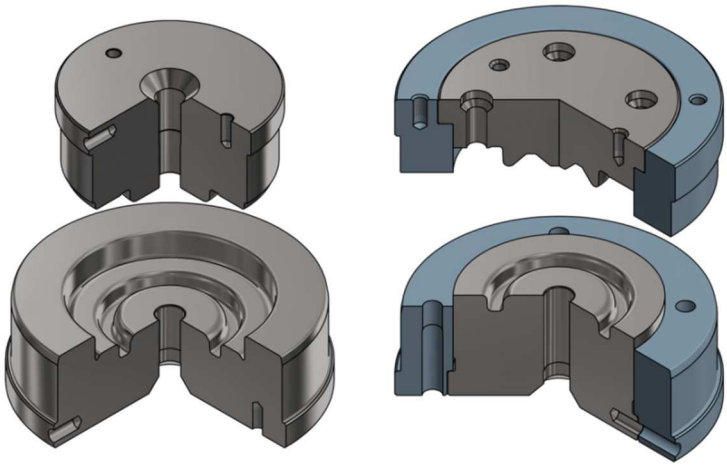
Разработанная технологическая схема штамповки (вариант №2) позволила значительно улучшить показатели, характеризующие условия работы пресса и штамповых вставок. Максимальное значение технологического усилия на окончательном переходе уменьшилось со значения 23.37 МН (близкого к критическому) до 18.38 МН. Значения технологических нагрузок на предварительном переходе практически остались неизменными (см. рисунок 4.16).

Результаты динамического анализа рассматриваемой технологической схемы штамповки представлены на рисунках 4.18, 4.19.

4.2.3. Результаты внедрения усовершенствованной технологической схемы ГОШ на КГШП поковки детали “Каретка синхронизатора”

Для внедрения новой технологической схемы штамповки на КЗ ПАО «КАМАЗ» выполнена модернизация существующих штампов предварительного и окончательного перехода (см. рисунок 4.20).

На рисунке 4.20 представлены 3D-модели новых деталей: вставки нижняя и верхняя предварительного перехода (***а***), вставка пуансон с пуансонодержателем и вставка с матрицей окончательного перехода (***б***).



а ***б***

Рисунок 4.20 – Конструкции деталей штампов предварительного (***а***) и окончательного (***б***) переходов, разработанные для штамповки поковки детали “Каретка синхронизатора” в соответствии с новой технологической схемой

Поковки (после предварительного и окончательного переходов), изготовленные по технологии, разработанной в соответствие с методикой, предложенной автором (см. разделы 3.2 – 3.4 и [199]), представлены на рисунке 4.21.

Рисунок 4.21 – Поковки детали “Каретка синхронизатора”, полученные после предварительного и окончательного переходов, на КЗ ПАО «КАМАЗ»

Акты передачи и использования результатов разработки новой технологии и методики её реализации представлены приложениях Д и Е.

4.3. Разработка и исследование технологической схемы ГОШ на КГШП поковки детали “Каретка синхронизатора” в открытых штампах предварительного и окончательного переходов

В результате исследований, выполненных в предыдущем разделе данной работы, установлены следующие факторы, препятствующими дальнейшему повышению эффективности технологической схемы, представленной на рисунках 4.16 и 4.17:

- зависимость усилия на окончательном переходе от различного рода неточностей, возможных при реализации технологического процесса, таких как износ гравюр штампов, настройки закрытой высоты пресса;
- усложнение и, соответственно, снижение надёжности, конструкции штампа окончательного перехода, связанного с необходимостью обрезки облоя перед штамповкой.

Следует обратить внимание, что численные значения усилий штамповки на предварительном (18.50 МН) и окончательном (18.38 МН) переходах находятся близко к границе применимости пресса К8542 с номинальным усилием 16 МН.

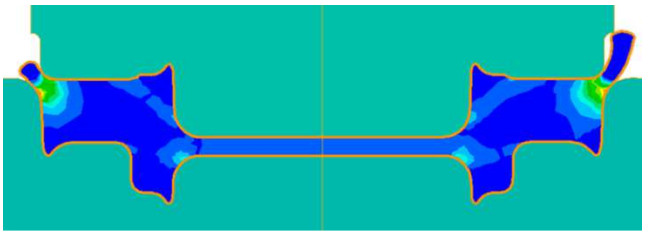
Разработка технологической схемы ГОШ на КГШП, позволяющей снизить усилие штамповки (≈16%), приведёт к значительному повышению эффективности данного конкретного технологического процесса путём возможности применения для его реализации КГШП с номинальным усилием 16 МН, например, К8542.

Кроме того, применение дополнительных выступов на поверхности, образующей отверстие в поковке позволяет уменьшить припуски на механическую обработку и, возможно, улучшить коэффициенты металлоёмкости $K_И$, ${}_{min}K_И$ и $K_П$.

4.3.1. Моделирование технологического процесса ГОШ на КГШП К8542 в открытых штампах предварительного и окончательного переходов

С целью уменьшения припусков на механическую обработку в конструкцию поковки предварительного перехода, в сравнении с вариантом №2 (см. п. 4.22) добавлены два выступа с внутренней стороны (см. рисунок 4.21). Размеры (в миллиметрах)

выступов (D = 113): A = 4.0, B = 1.5, r = 1.5, R =5.0 (α = 22.62°, K_H = 1.16). Соответственно уменьшены припуски на механическую обработку на диаметр отверстия до 1.25 мм. Расчёт размеров выступов выполнен в соответствии с методикой, разработанной в главе 3. На рисунках 4.22 – 4.24 представлены результаты моделирования процесса ГОШ на КГШП К8542 поковки детали “Каретка синхронизатора”, технологическая схема которого рассмотрена в разделе 3.1.2 (см. рисунки 3.4 и 3.5).



а ***б***

Рисунок 4.22 – Предварительный переход. Заготовки минимальной (***а***) и максимальной (***б***) массы

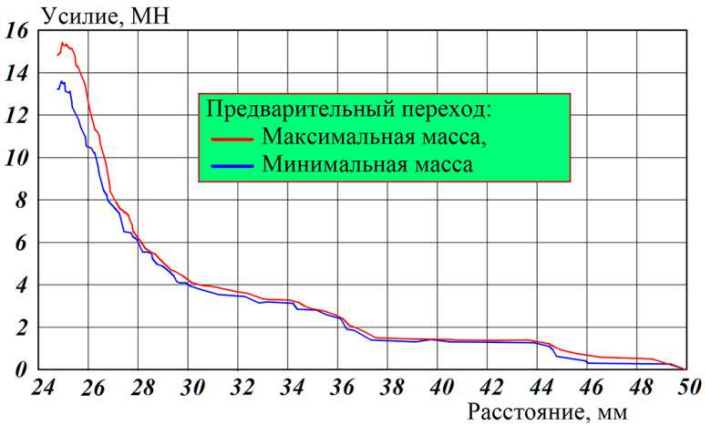


Рисунок 4.23 – Предварительный переход. Усилие штамповки

Как следует из расчётов металлоёмкости, уменьшение штамповочного радиуса до значения близкого к нулю и, соответственно, припусков на механическую обработку до значения 1.25 мм даёт возможность увеличить коэффициент точности поковки КП с 0.858 до значения 0.863 (снижение массы поковки на ≈0.035 кг). Однако, как показали исследования (см. рисунок 4.22), конкретно для поковки данной конфигурации, из-за трудностей с заполнением выступов при увеличенной толщине облоя (с 3.0 мм до 3.5 мм) с целью снижения технологического усилия, эту возможность улучшения показателей металлоёмкости реализовать не удаётся. Окончательно значение условной минимальной величины заготовки составило 138.5 мм. Соответственно имеем незначительное снижение $K_И$ с 0.738 ($_{min}K_И$ = 0.717) до 0.736 ($_{min}K_И$

= 0.714). Средний расход металла на одну деталь для варианта №3 в сравнении с вариантом №2 оказался больше на ≈0.03 кг.

Максимальная масса заготовки ${}_{П}L_{max}$ = 154.0 (2.18) ограничена условием размещения её после осадки в штампе предварительного перехода. При ${}_{З}L_{min}$ = 138.5 и ${}_{З}L_{max}$ = 147.5 имеем K_V = 0.419.

Поскольку обрезка облоя после предварительного перехода при реализации данного технологического процесса не предусмотрена, то его толщина может быть увеличена. Соответственно снижено технологическое усилие штамповки до 14.56 МН (см. рисунок 4.23).

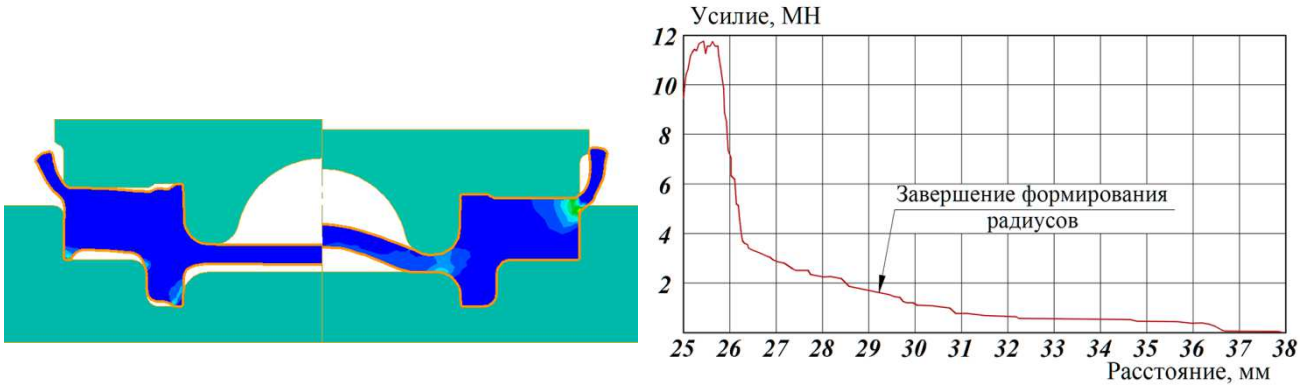


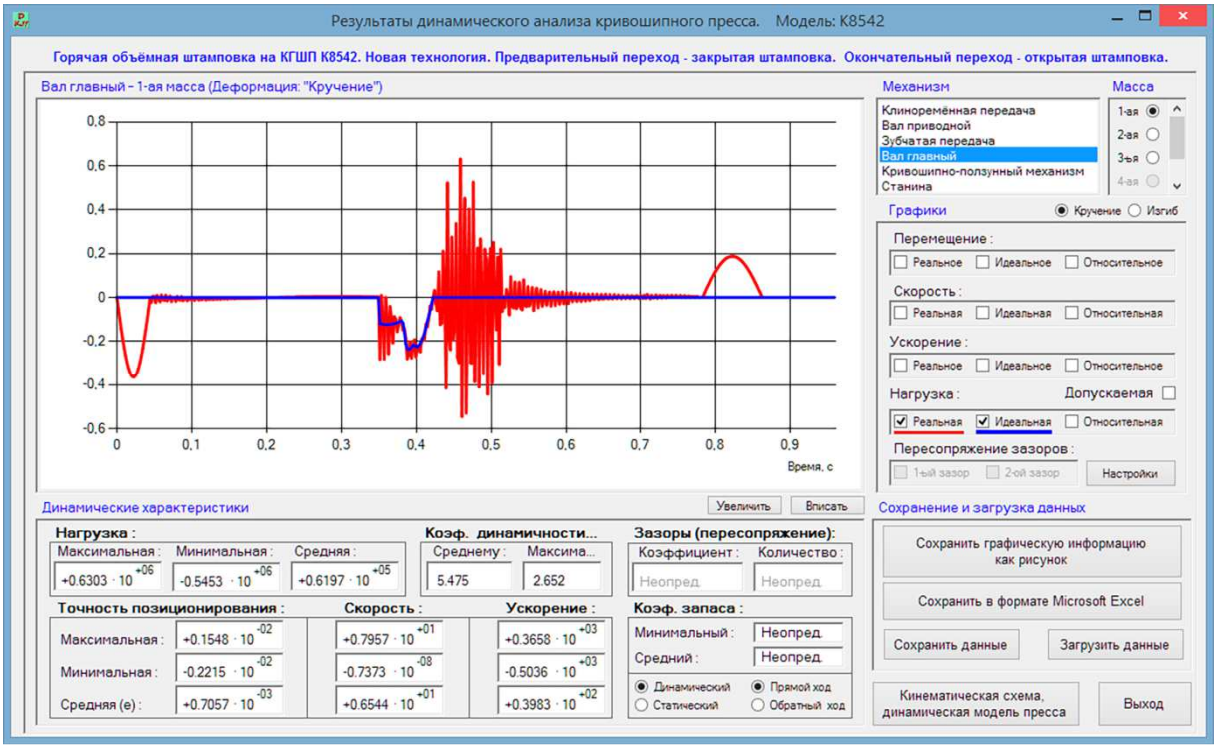
Рисунок 4.24 – Окончательный переход. Заготовка максимальной массы

Технологическое усилие на окончательном переходе (см. рисунок 4.24) снижено до значения 11.76 МН за счёт изменения конструкции компенсатора. Последнее оказалось возможным, поскольку формирование радиусов закруглений внешних углов поковки начинается с началом процесса её деформирования и заканчивается при достижении технологического усилия штамповки значения равного 1.64 МН (см. рисунок 4.24).

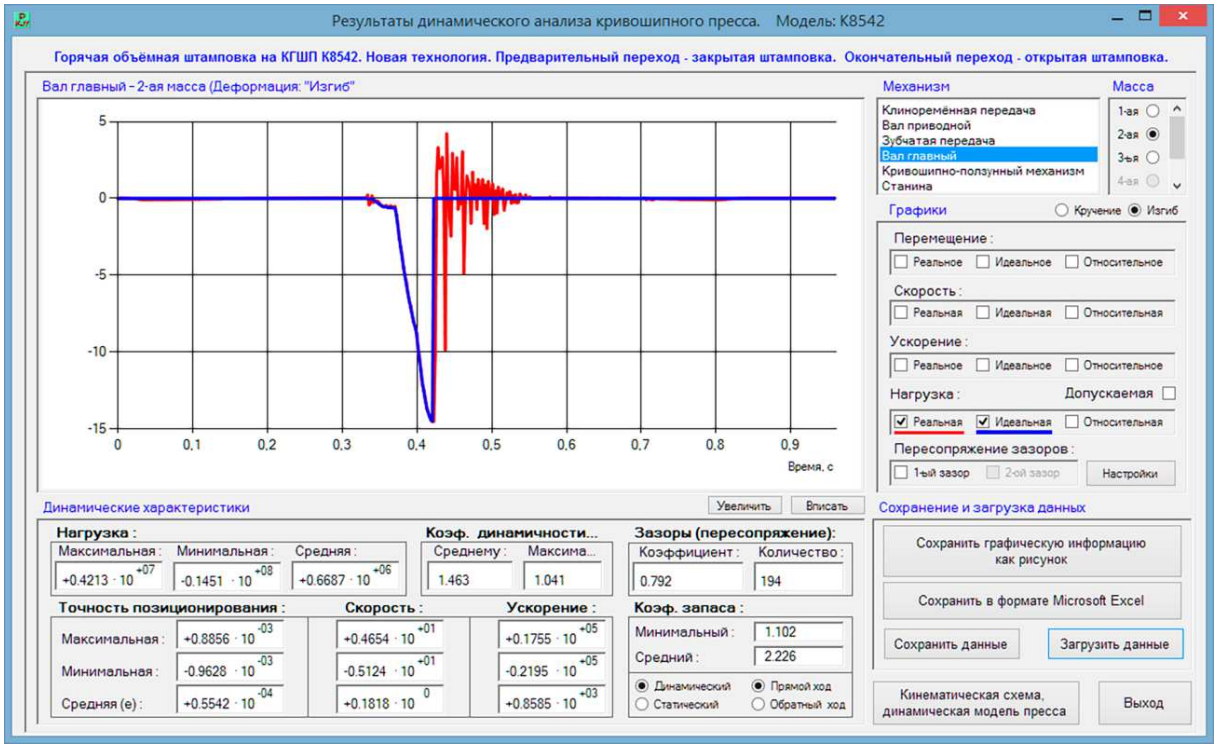
4.3.2. Исследование эффективности применения КГШП К8542 для ГОШ в открытых формообразующих штампах поковки детали “Каретка синхронизатора”

Исследование эффективности применения КГШП К8542 для штамповки поковки детали “Каретка синхронизатора” в соответствии с рассматриваемой технологической схемой выполнены по методике, разработанной в разделе 2.5.

Основные результаты исследований представлены на рисунках 4.25, 4.26.



а



б

Рисунок 4.25– Моделирование динамических процессов в КГШП К8542. Предварительный штамповочный переход, главный вал:

а – крутящий момент, ***б*** – изгибающее усилие

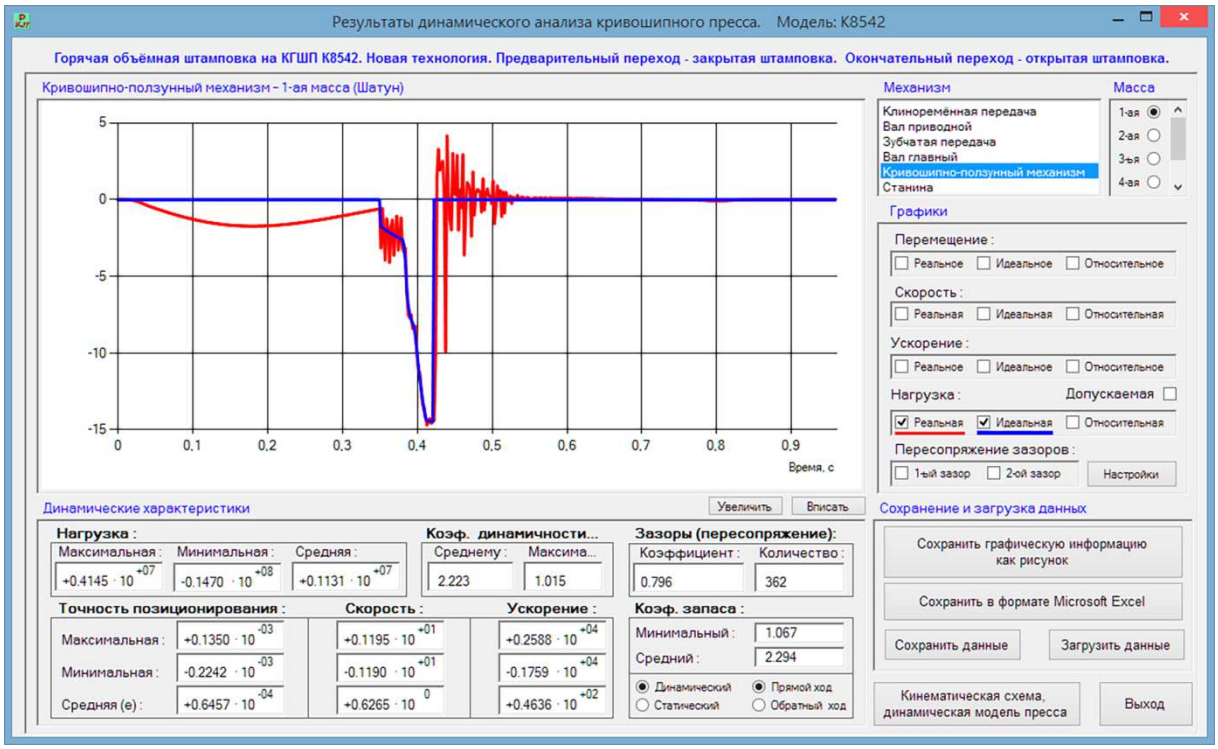


Рисунок 4.26 – Динамические усилия в шатуне КГШП К8542

Анализ результатов позволяет сделать вывод о возможности применения пресса модели К8542 для изготовления данной поковки. При этом важно отметить, что, хотя минимальные значения коэффициентов запаса близки к единице, тем не менее, они превышают соответствующие показатели традиционной технологии:

- предварительный переход (главный вал – изгиб): $K_{ЗД}$ = 1.04, $_{ср}K_{ЗД}$ = 5.041 – традиционная и $K_{ЗД}$ = 1.102, $_{ср}K_{ЗД}$ = 2.226 – новая технологическая схема;
- предварительный переход (ползун): $K_{ЗД}$ = 1.035, $_{ср}K_{ЗД}$ = 4.999 – традиционная и $K_{ЗД}$ = 1.099, $_{ср}K_{ЗД}$ = 2.295 – новая технологическая схема.

4.3.3. Экспериментальное исследование процесса изготовления поковки детали “Каретка синхронизатора” с выступами, формируемыми на предварительном переходе способом открытой штамповки

Целью экспериментальных исследований является подтверждение:

- возможности формирования поковки детали “Каретка синхронизатора” в соответствии с новой технологической схемой штамповки;

- корректности методики расчёта параметров выступов, формируемых на предварительном переходе.

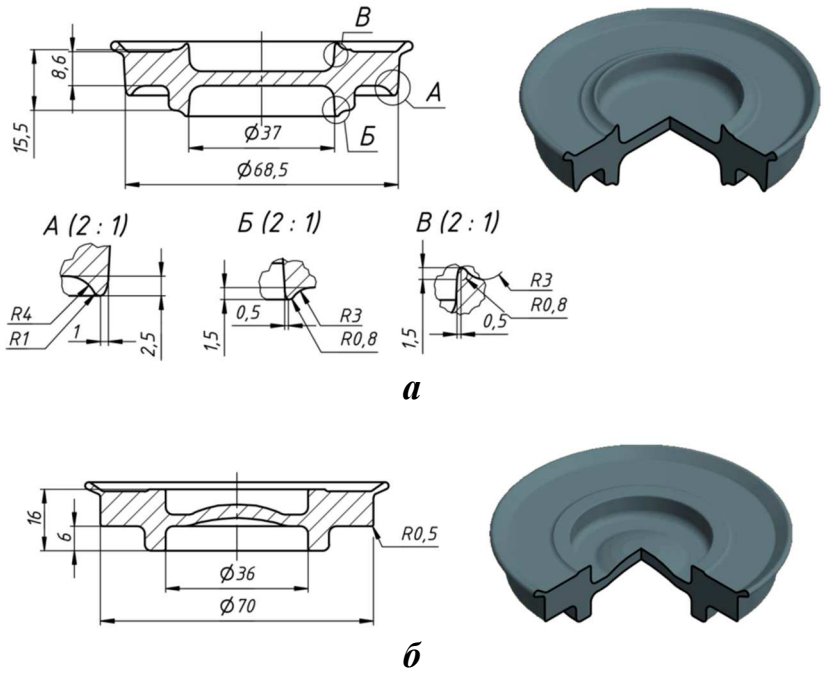


Рисунок 4.27 – Чертежи физической модели поковки:
а – предварительный, ***б*** – окончательный переходы

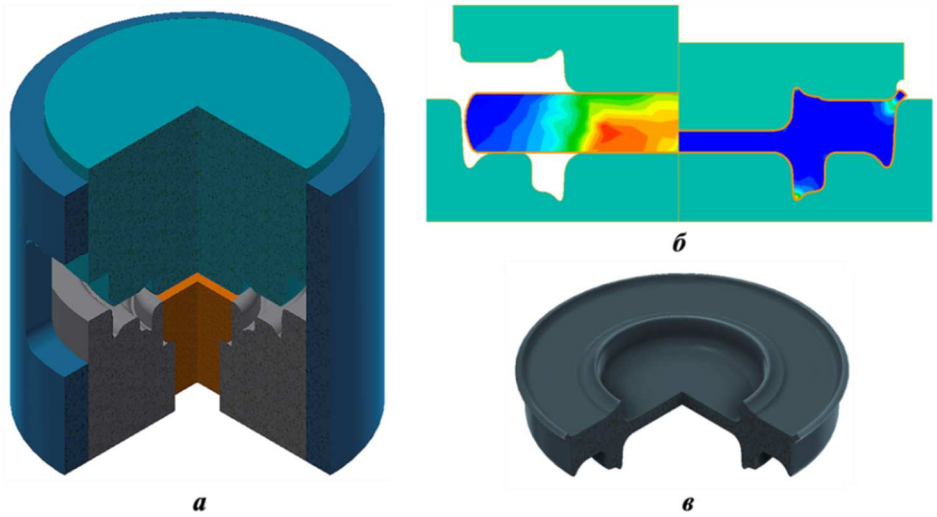


Рисунок 4.28 – Результаты моделирования формообразования физической модели поковки: 3D-модель штампа предварительного перехода (***а***), формирование поковки на предварительном переходе (***б***) и 3D-модель поковки (***в***)

Эксперимент проводился на физической модели поковки (см. рисунок 4.27), представляющей собой уменьшенную копию реальной поковки (см. рисунок 4.4),

изготовленную из свинца, механические свойства которого определены в разделе 3.5. Деформация осуществлялась на гидравлическом прессе.

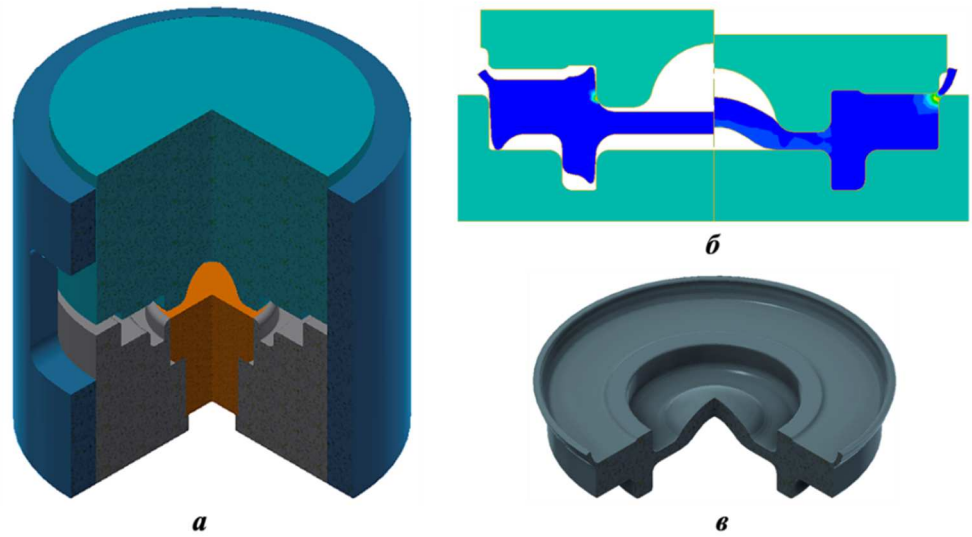


Рисунок 4.29 – Результаты моделирования формообразования физической модели поковки: 3D-модель штампа окончательного перехода (***а***), формирование поковки на окончательном переходе (***б***) и 3D-модель поковки (***в***)

На рисунках 4.28, 4.29 приведены результаты моделирования в программе QForm процесса штамповки физической модели поковки, позволяющей сформировать штамповочные радиусы равные 0.5 мм.

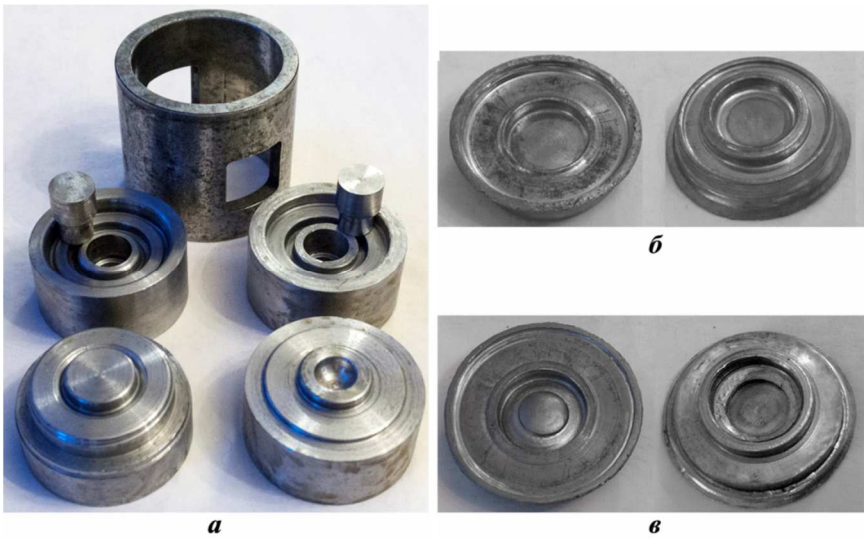
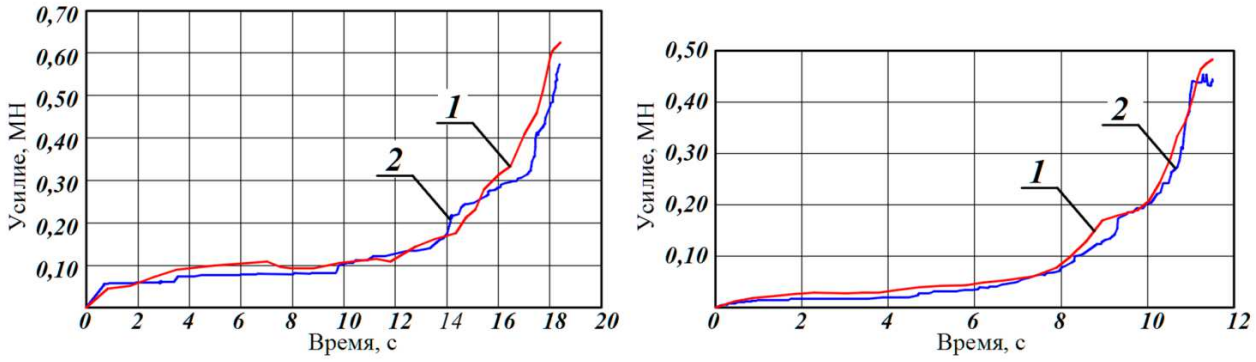


Рис. 4.30 – Фотография штампа: матрицы (с выталкивателями) и пуансоны предварительного и окончательного переходов, поковки физической модели: предварительный (***б***) и окончательный (***в***) переходы

На рисунке 4.30 представлены фотографии конструкции штампа и поковок физической модели после предварительного и окончательного переходов.



а ***б***

Рис. 4.31–Графики технологических усилий штамповки на предварительном (***а***) и окончательном (***б***) переходах. Данные: 1 –эксперимента, 2 –моделирования

Результаты расчётов технологических усилий штамповки и данные экспериментальных исследований, приведены на рисунке 4.31.

Анализ выполненных на физической модели поковки исследований, как численных значений, так и визуальный, показывает достаточно хорошую сходимость данных, полученных теоретически и экспериментально, что свидетельствует об эффективности разработанной технологической схемы штамповки и методик её расчёта.

4.4. Разработка и исследование технологической схемы ГОШ на КГШП поковки детали “Каретка синхронизатора” в закрытом штампе предварительного и открытом штампе окончательного переходов

Данная технологическая схема ГОШ разработана и исследована в разделах 3.3.1 и 3.5.1 на примере детали “Втулка”. Предварительный анализ полученных результатов позволяет с высокой степенью вероятности спрогнозировать снижение технологических усилий штамповки на предварительном и окончательном переходах, а также некоторое снижение металлоёмкости за счёт уменьшения массы (длины) заготовки. Все формообразующие операций ГОШ выполняются на КГШП К8542.

Исследуемая технологическая схема – вариант №4, включает, кроме осадки, закрытую штамповку на предварительном переходе и открытую штамповку на окончательном переходе. При формировании полуфабриката на предварительном переходе в закрытом штампе, полости гравюр штампов, формирующих выступы, являются одновременно компенсаторами неточностей заготовки. Предварительные исследования показали, что для компенсации излишков металла требуется два выступа, расположенных на внешних сторонах поковки. Размещение выступов на внутренних сторонах поковки при этом оказывается невозможным. Таким образом, вариант №4 готовой поковки оказался полностью идентичен варианту №2. Соответственно коэффициент точности поковки $K_П = 0.858$.

Геометрические размеры выступов определены для заготовки длиной 138 – 147 мм (вариант №2). Затем уточнён минимальный объём заготовки, выполнены повторный расчёт параметров выступов и моделирование формирования поковки при минимальной и максимальной массе заготовки. Результаты расчётов и моделирования представлены на рисунках 4.32 – 4.35.

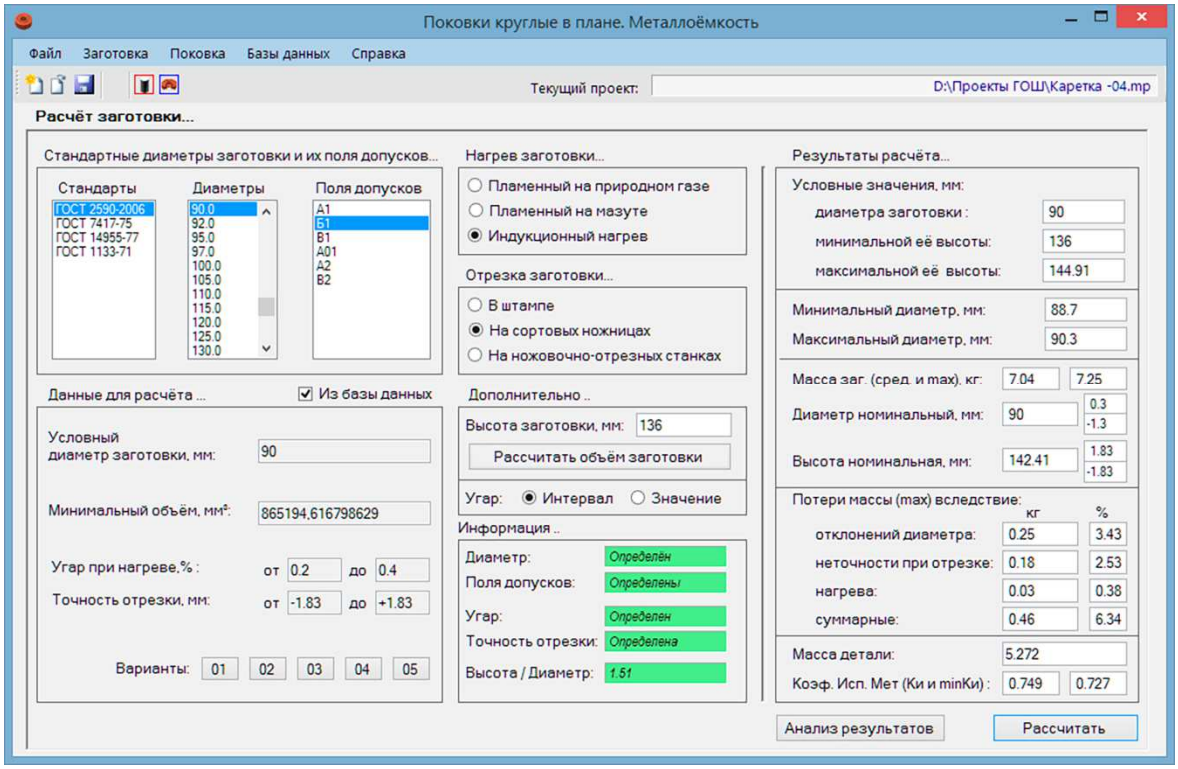


Рисунок 4.32 – Расчёт металлоёмкости технологического процесса ГОШ с учётом потерь металла при изготовлении заготовки

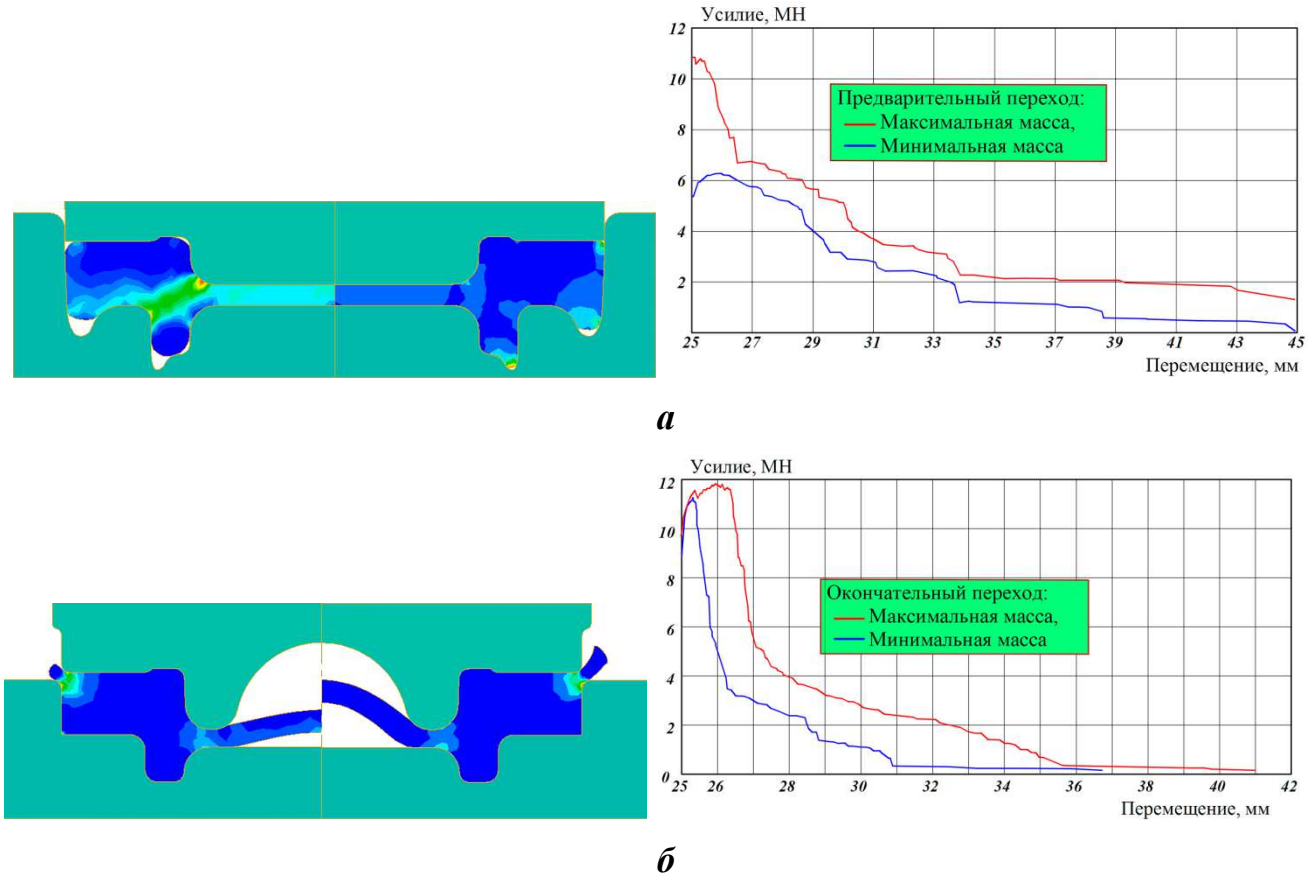


Рисунок 4.33 – Моделирование технологического процесса ГОШ предварительном (***а***) и окончательном (***б***) переходах

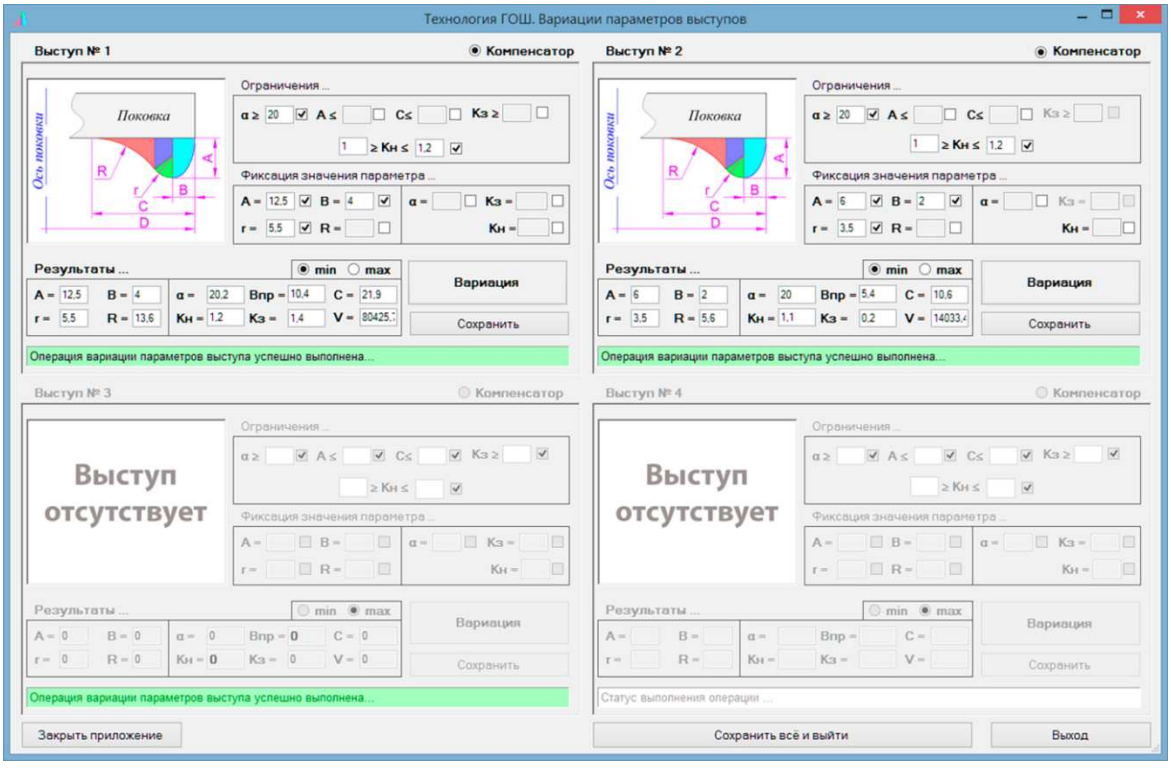
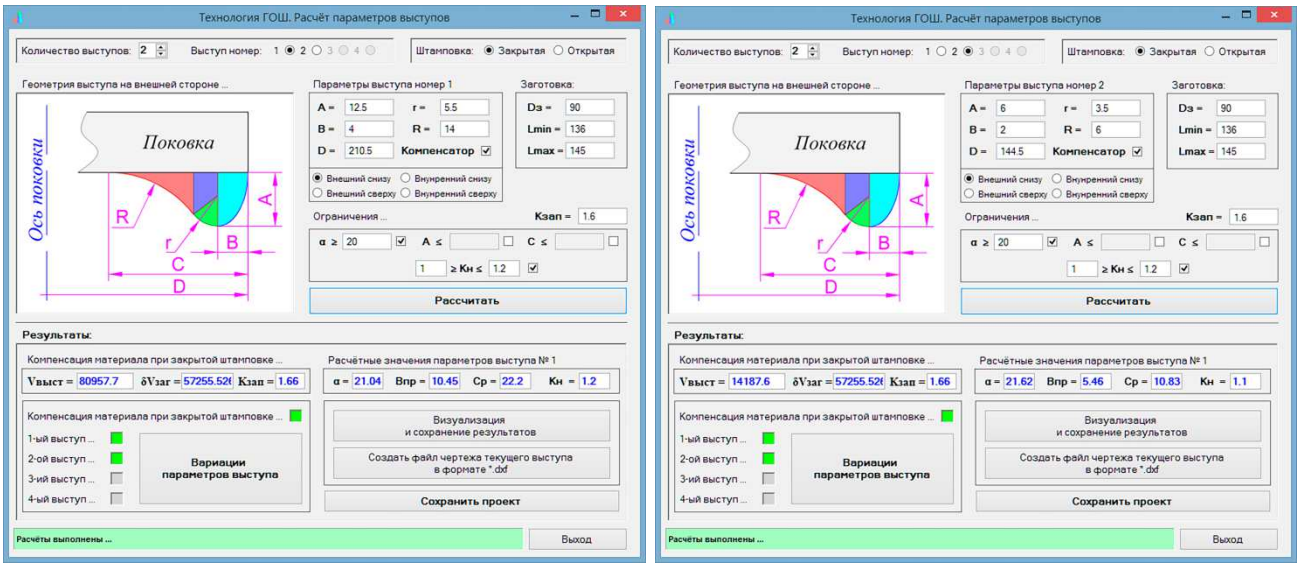


Рисунок 4.34 – Расчёт геометрических параметров гравюр штамповых вставок, формирующих выступы (вариация параметров)



а ***б***

Рисунок 4.35 – Расчёт геометрических параметров гравюр штамповых вставок, формирующих выступы: ***а*** – вариация параметров, ***б*** – коэффициент запаса

Условие реализуемости ГОШ определяется переполнением выступов компенсаторов на предварительном переходе при $_{П}L_{\max}$ = 145.8. При $_{З}L_{\min}$ = 136, $_{З}L_{\max}$ = 145, в соответствии с (2.18) получим K_V = 0.082 >0.

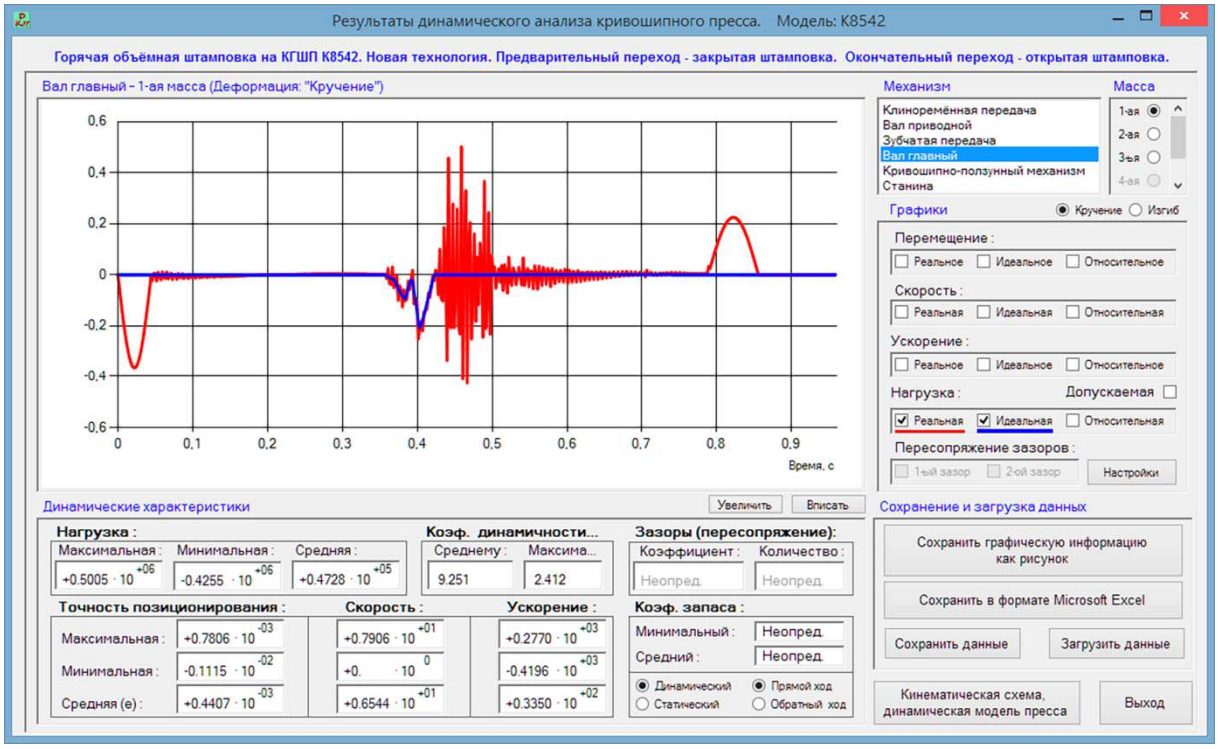


Рисунок 4.36 – Моделирование динамических процессов в КГШП К8542. Окончательный штамповочный переход, главный вал пресса: крутящий момент

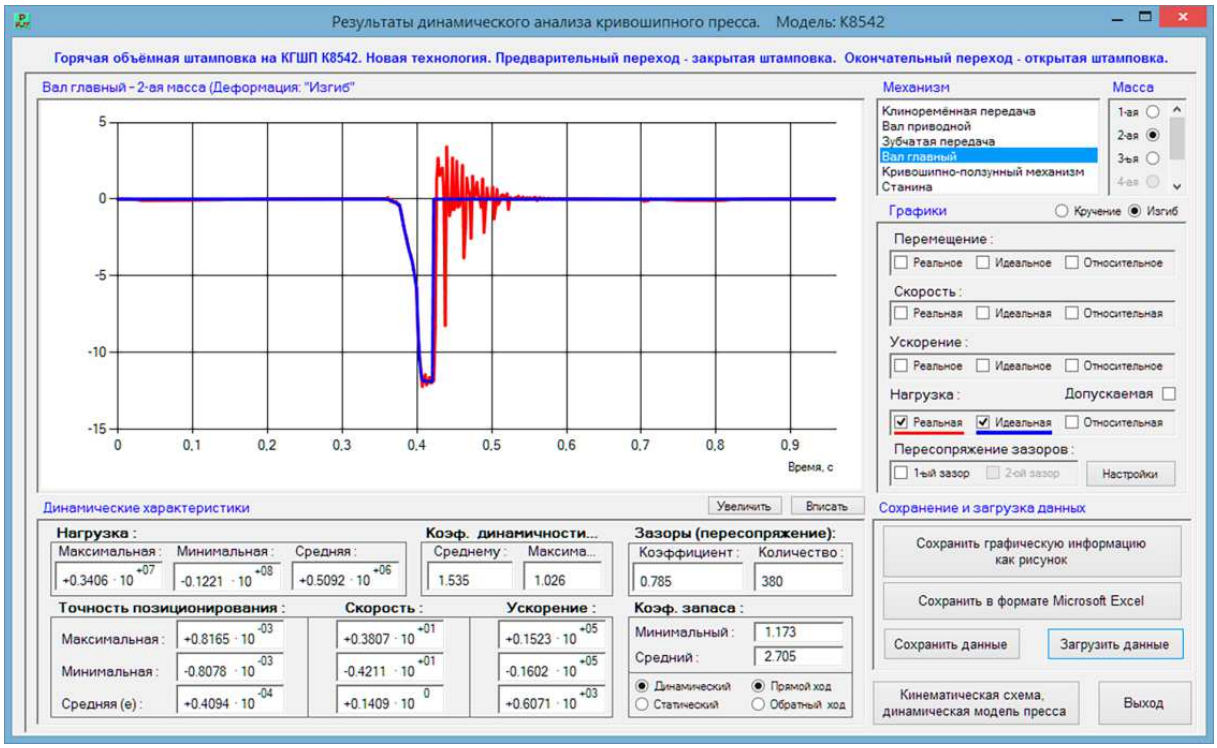


Рисунок 4.37– Моделирование динамических процессов в КГШП К8542. Окончательный штамповочный переход, главный вал пресса: изгибающее усилие

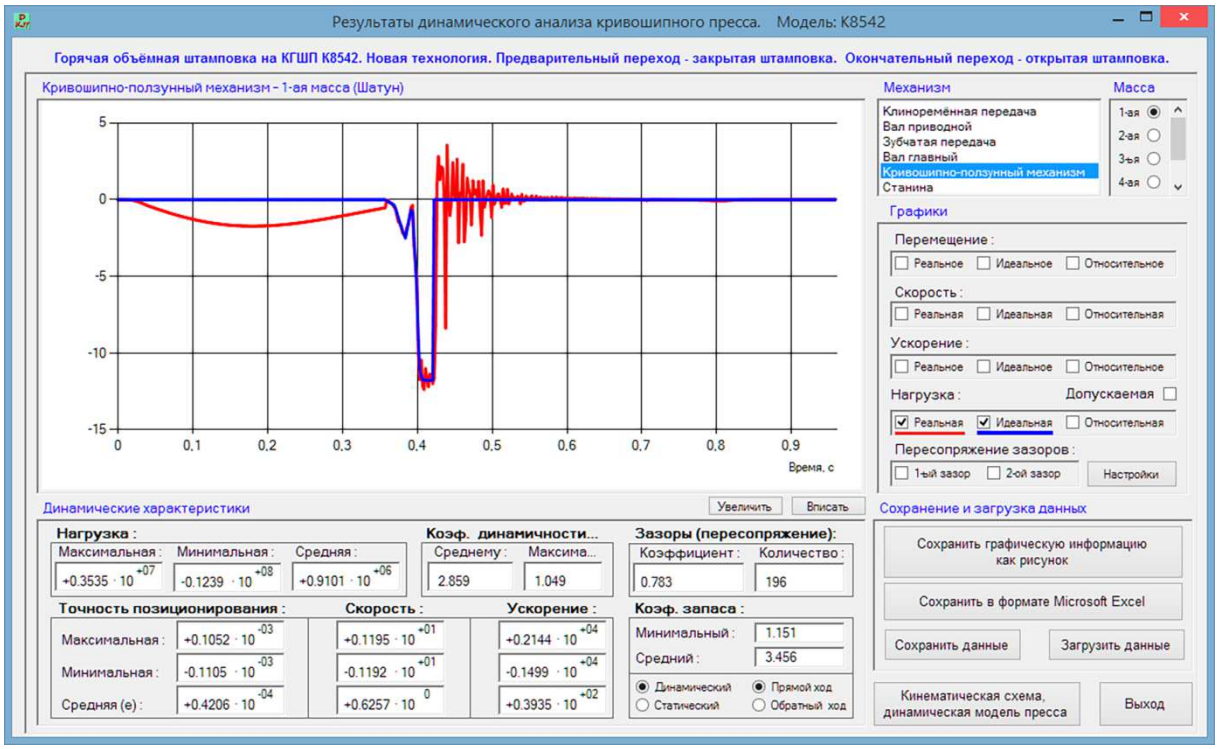


Рисунок 4.38 – Динамические усилия в шатуне КГШП К8542. Окончательный переход, заготовка максимальной массы

Исследование эффективности применения КГШП К8542 для штамповки поковки детали “Каретка синхронизатора” в соответствии с рассматриваемой технологической схемой, выполнены по методике, разработанной в разделе 2.5. Рассматривались технологические нагрузки, полученные при применении заготовки максимальной массы при формообразовании на окончательном переходе. Полученные результаты представлены на рисунках 4.36 – 4.38.

Приведённые данные позволяют сделать вывод о возможности применения пресса модели К8542 для изготовления данной поковки.

4.5. Анализ полученных результатов

В главе 4 данной работы выполнен анализ эффективности технологического процесса ГОШ на КГШП на основе методик, разработанных автором, следующих технологических схем изготовления поковки детали “Каретка синхронизатора”:

1. Традиционная технологическая схема, включающая осадку, предварительную штамповку в открытом штампе, обрезку облоя и окончательную штамповку в закрытом штампе.

2. Усовершенствованная технологическая схема штамповки, включающая осадку, предварительную штамповку в открытом штампе с формированием выступа на внешней стороне полуфабриката, и окончательную штамповку в закрытом штампе, в результате которой сформированный на предварительном переходе выступ позволяет образовать на внешней стороне поковки штамповочный радиус со значением близким к нулю и, тем самым, уменьшить припуски на механическую обработку, назначаемые на эту поверхность.

3. Технологическая схема штамповки в открытых штампах предварительного и окончательного перехода без обрезки облоя. На предварительном переходе формируются выступы на внешних и внутренних сторонах полуфабриката, деформация которых на окончательном переходе позволяет сформировать штамповочные радиусы поковки со значением близкими к нулевым и тем самым уменьшить припуски на механическую обработку поверхностей поковки.

4. Технологическая схема штамповки в закрытом штампе предварительного перехода с формированием выступов, на внешних и внутренних сторонах полуфабриката, используемых в качестве компенсаторов, деформация которых в открытом штампе окончательного перехода позволяет сформировать штамповочные радиусы поковки со значениями близкими к нулевым и тем самым уменьшить припуски на механическую обработку поверхностей поковки.

В качестве основных критериев, определяющих эффективность технологического процесса ГОШ, использовались показатели, определяющие

- металлоёмкость технологического процесса ГОШ;
- технологические усилия штамповки;
- динамические процессы, возникающие в КГШП при выполнении технологической операции.

Таблица 4.1 – Результаты исследования эффективности технологической схемы ГОШ на КГШП на основе оценки её металлоёмкости

Схема ГОШ	Показатели металлоёмкости (ссылка на расчётную зависимость)				Рейтинг эффективности
	$K_И$ (2.11)	$_{min}K_И$ (2.11)	$K_П$ (2.12)	K_V (2.20)	
1	0.726	0.704	0.784	0.327	**4**
2	0.738	0.717	0.858	0.327	**2**
3	0.736	0.714	0.863	0.419	**3**
4	**0.749**	0.727	0.858	0.082	**1**

Таблица 4.2 – Результаты исследования эффективности технологической схемы ГОШ на основе оценки технологических усилий штамповки

Схема ГОШ	Технологическое усилие штамповки, МН при максимальной массе заготовки			Рейтинг эффективности
	Предварительный переход	Окончательный переход	Суммарное усилие штамповки на формообразующих переходах	
1	18.65	23.37	42.02	**4**
2	18.6	18.38	36.74	**3**
3	14.49	**11.76**	26.25	**2**
4	**10.86**	11.81	23.1	**1**

Таблица 4.3 – Результаты исследования эффективности технологической схемы ГОШ на основе оценки динамических процессов в КГШП

Схема ГОШ	Динамические характеристики пресса (ссылка на расчётную зависимость)							Рейтинг эффективности
	$K_{ЗС}$; $cpK_{ЗС}$ (2.18)		$K_{ЗД}$; $cpK_{ЗД}$ (2.43)		P_{max}; P_{min}, МН (2.44)		$cpP_Д$, МН (2.45)	
1	1.07	15.4	1.04	5.04	+2.32	-23.37	0.361	**2**
2	1.29	5.32	**1.23**	2.65	+8.98	-18.61	0.781	**1**
3	1.10	5.61	1.10	2.23	+4.21	-14.51	0.668	**2**
4	1.21	7.74	**1.17**	2.71	+3.41	-12.21	0.509	**1**

Таблица 4.4 – Результаты исследования эффективности технологической схемы ГОШ на основе оценки динамических процессов в КГШП

Схема ГОШ	Динамические характеристики пресса (ссылка на расчётную зависимость)				Рейтинг эффективности
	$cpK_{зазор}$ (2.46)	$N_{зазор}$ (2.47)	$cpK_Д$ (2.48)	$_{max}K_Д$ (2.49)	
1	0.104	24	1.451	1.032	**2**
2	0.139	92	**1.242**	1.008	**1**
3	0.792	194	**1.463**	1.041	**1**
4	0.785	380	1.535	1.026	**2**

Таблица 4.5 – Результаты исследования эффективности технологической схемы ГОШ на основе оценки динамических процессов в КГШП

Схема ГОШ	Динамические характеристики пресса (ссылка на расчётную зависимость)				Рейтинг эффективности
	Главный вал – кручение: 1-ая масса		Шатун – растяжение-сжатие: 1-ая масса		
	$cpK_Д$ (2.48)	$_{max}K_Д$ (2.49)	$cpK_Д$ (2.48)	$_{max}K_Д$ (2.49)	
1	14.262	1.547	2.106	1.022	**2**
2	**12.545**	1.203	**1.496**	1.008	**1**
3	**5.475**	2.652	**2.223**	1.015	**1**
4	9.251	2.412	2.859	1.049	**2**

Схемы №1 и №2 реализуются на КГШП К8544, схемы №3 и №4 – КГШП К8542. Динамические характеристики пресса в таблицах 4.3 и 4.4 приведены для главного вала пресса (изгиб) при формировании поковки на окончательном переходе (схемы №1и №4) и предварительном переходе (схемы №2 и №3). Поковка максимальной массы.

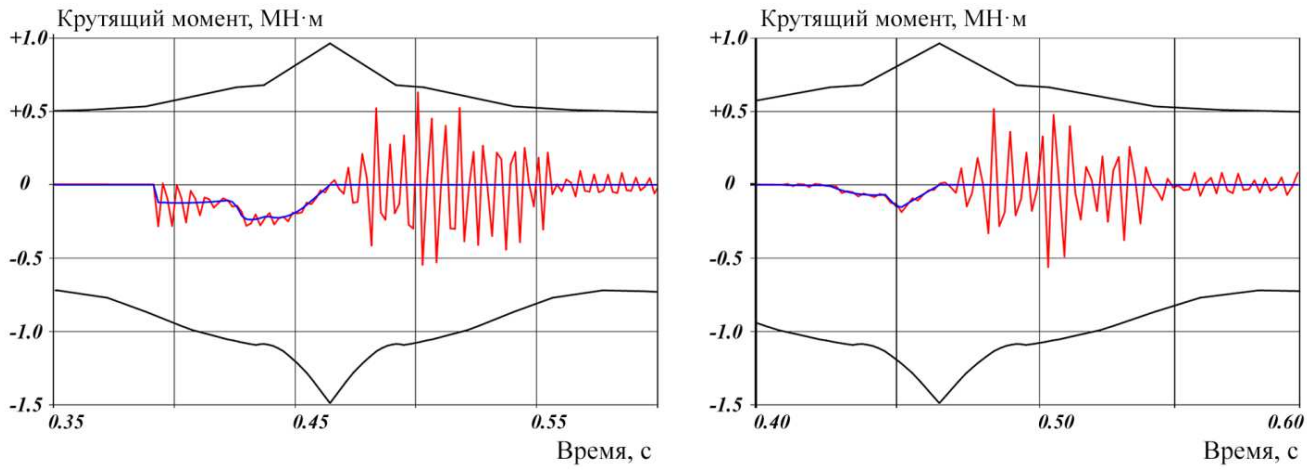
В таблице 4.5 приведены аналогичные результаты для главного вала (кручение) и шатуна пресса (растяжение-сжатие).

В таблицах 4.1 – 4.5 и на рисунках 4.39, 4.40 представлены сводные данные, позволяющие оценить эффективность разработанных и исследованных автором технологических схем штамповки на КГШП поковки детали “Каретка синхронизатора”.

При анализе результатов эффективности технологических схем ГОШ, следует отметить, что реализация схем №1 и №2 возможна лишь на КГШП К8544 с номинальным усилием 25 МН.

Показатель использования металла для традиционной схемы штамповки (вариант №1) будем использовать в качестве базового. Его значение оказалось минимальное. Показатель использования металла для схемы №2 превышает аналогичный показатель схемы №3, хотя у коэффициентов точности поковки ситуация обратная. Лучшее значение имеет показатель металлоёмкости схемы №4, которая, с учётом наиболее низких значений технологических усилий штамповки, оказалась наиболее эффективной. Вместе с тем, следует учесть, что значение коэффициента K_V, определяющего возможность реализации технологического процесса, для схемы №4 значительно ниже, чем у всех остальных технологических схем, хотя и превышает критическое значение равное нулю.

Средние потери металла в порядке убывания по вариантам технологических схем: №1 – 1.997 кг, №3 – 1.891 кг, №2 – 1.872 кг, **№4 – 1,764 кг**.

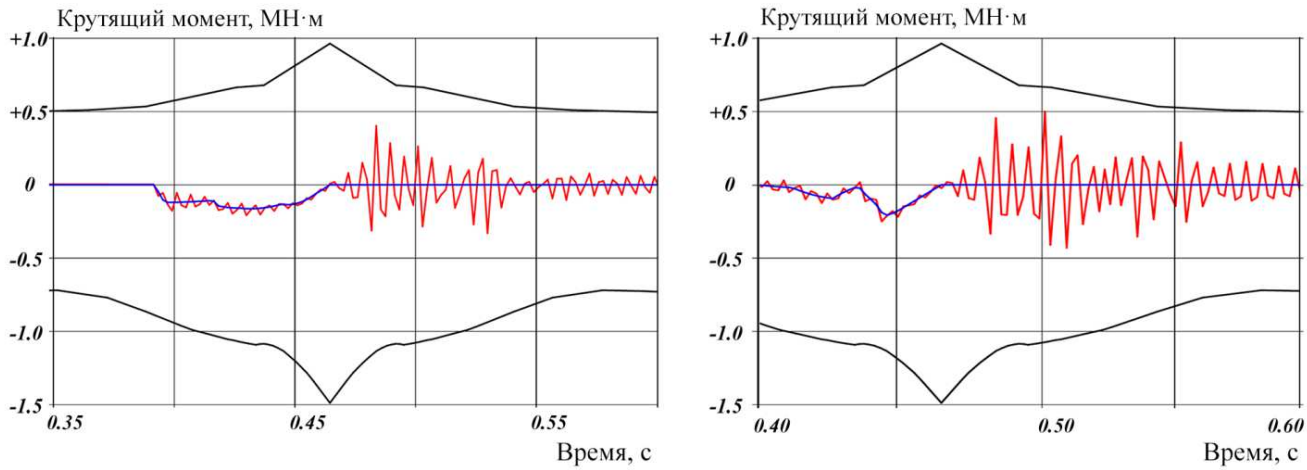


а ***б***

Рисунок 4.39 – Вариант технологической схемы №3.

Главный вал, 1-ая масса: предварительный (а) и окончательный (б) переходы.

Моменты: — статический, — динамический, — допускаемый



а ***б***

Рисунок 4.40 – Вариант технологической схемы №4.

Главный вал, 1-ая масса: предварительный (а) и окончательный (б) переходы

Моменты: ▬ статический, ▬ динамический, ▬ допускаемый

Сравнивать эффективность технологических схем на основе оценки интенсивности динамических процессов, протекающих в КГШП, имеет смысл только для схем №3 и №4. Реализация данных схем в результате модернизации технологических процессов ГОШ оказалась возможной на оборудовании с меньшим номинальным усилием. Это несомненное их преимущество перед схемами №1 и №2 и в тоже время вероятное ухудшение показателей пресса.

Исследование динамики КГШП К8542 на основе анализа значений коэффициентов запаса по динамическим нагрузкам, коэффициентам динамичности и анализе пересопряжения зазоров показало, что явное преимущество между схемами №3 и №4 отсутствует. Однако, более детальное исследование динамических процессов, возникающих на участке главного вала перед эксцентриком, позволило сделать вывод о большей интенсивности динамических процессов при реализации варианта №3 (см. рисунки 4.39, 4.40 и таблица 4.5).

Следует отметить, что графики допускаемых усилий здесь получены в соответствии с методикой раздела 2.3. Их значения не являются предельно допустимыми при оценке прочности главного вала. На рисунках 4.39 и 4.40 они использованы для более наглядного представления моментов сил, возникающих вследствие крутильных колебаний главного вала.

Важно, что при ГОШ на КГШП возможно значительное превышение сил динамических над статическими, как вначале операции штамповки, так и после её завершения. При исследовании крутильных колебаний главного вала (см. рисунок 4.39*а*) в начале операции штамповки и после её завершения (вариант №3, предварительный переход) имеем превышение крутящего момента более чем 2.6 раза при среднем коэффициенте динамичности 5.48.

Исследование динамики пресса при реализации технологической схемы №4 на окончательном переходе показали худшие показатели коэффициентов динамичности (см. рисунок 4.40 и таблицу 4.5). Так среднее значение коэффициента динамичности для главного вала пресса оказалось равным 9.25, а шатуна – 2.86.

Вместе с тем следует иметь в виду, что такие показатели динамических характеристик пресса как коэффициенты динамичности, пересопряжения зазоров необходимо рассматривать вместе со значением технологической силы, возникающей при реализации данной технологической схемы штамповки, а также показателями её металлоёмкости (в первую очередь K_H) и реализуемости (K_V).

С учётом сказанного для использования в производственном процессе можно рекомендовать технологические схемы ГОШ на КГШП К8542, считая несколько более эффективной схему №4, а также технологическую схему №2, при возможности использования КГШП К8544.

4.6. Выводы

1. На базе традиционной, разработаны три схемы ГОШ на КГШП штамповки поковки детали “Каретка синхронизатора”, отличающихся наличием выступов, формируемых на предварительном переходе на торцевых плоскостях цилиндрических поверхностей поковки, деформация которых на окончательном переходе позволяет образовать штамповочные радиусы со значениями близкими к нулевым и, тем самым уменьшить припуски на механическую обработку поверхностей поковки. На конструкцию штампа для открытой объёмной штамповки, в котором реализована идея формирования выступов, рассчитываемых в соответствии разработанной мето-

дикой (см. глава 3 и приложение Г) подана заявка на выдачу патента РФ на полезную модель (№2016129658 от 19.07.2016).

2. Выполнено тестирование разработанных автором методик, позволяющих:

- на этапе проектирования оценить металлоёмкость процесса изготовления круглых в плане поковок, в данном случае на примере поковки детали “Каретка синхронизатора”;
- оценки динамических процессов, протекающих в КГШП при выполнении операций ГОШ.

3. Выполнено тестирование разработанной автором методики расчёта геометрических параметров гравюр штампов предварительного перехода, формирующих выступы.

4. Выполнены экспериментальные исследования на основе физических моделей разработанных технологических схем ГОШ и доказана их работоспособность.

5. Приняты к использованию в производстве методики проектирования технологических переходов и инструмента для горячей объёмной штамповки круглых в плане поковок КЗ ПАО «КАМАЗ» (см. Приложения Д и Е).

6. Внедрены результатов научных исследований в учебный процесс на кафедре оборудования и процессов машиностроительных производств ФГБУ ВО «ЛГТУ» (см. Приложение Ж).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертации решена актуальная задача разработки методики проектирования высокоэффективных технологических схем горячей штамповки круглых в плане поковок на кривошипных прессах. Её применение на КЗ ПАО «КАМАЗ» (см. Приложение Д и Е) для изготовления поковок детали каретка синхронизатора 2-ой и 3-ей передачи привело к снижению расхода металла на 1.62% и уменьшению технологической силы штамповки на окончательном переходе на 21.35%. Последнее позволило поставить вопрос о применении для выполнения операции ГОШ КГШП усилием 16 МН вместо 25 МН.

Основные выводы и результаты:

1. Установлена система показателей и математические зависимости для их расчёта на основе модели детали, позволившая оценить эффективность различных вариантов технологических схем ГОШ на КГШП и определить пути её повышения. Применение данной системы показателей эффективности позволило разработать новые технологические схемы штамповки, отличающиеся более высокими значениями коэффициента использования металла без увеличения технологических сил штамповки на окончательном переходе.

2. Установлена зависимость коэффициента использования металла для заготовок, изготовленных из сортового проката круглого сечения с соотношением длины к диаметру от 1.25 до 2.5, от минимально допустимой массы поковки, точности диаметра сортового проката, способа отрезки и нагрева заготовки. Показано, что при применении сортового проката круглого сечения обыкновенной точности (ГОСТ 2590-2006) основная доля потерь (≈3% – ≈5.5%) связана с неточностями диаметра. Потери, возникающие вследствие неточностей при отрезке, составляют от ≈1.5% до ≈2.5%, угар – от ≈0.35% до ≈1.5%. Суммарные потери металла при изготовлении заготовки могут достигать от 5 до 10 процентов и практически не зависят от её диаметра. Процесс исследования реализован в виде программы для ЭВМ.

3. Разработана методика исследования коэффициента точности поковки при заданных геометрических параметрах детали, изготовляемой из неё. Данная мето-

дика реализована в виде программы для ЭВМ и объединена в единый программный продукт с исследованием точности изготовления заготовки. Методика позволила автоматизировать процесс назначения припусков, напусков, допусков поковки, и дала возможность определения потерь металла вследствие их назначения для каждого из геометрических объектов, образующих поковку. Установлено, что максимальные потери при изготовлении поковки связаны с назначением припусков. Их доля составляет от ≈13% при минимальных допусках, до ≈38% – при максимальных допусках, в среднем – ≈22%. При этом доля напусков – ≈4%. Потери, связанные с радиусами закруглений – ≈1%.

4. Определено выражение для расчёта показателя, позволившего определить возможность реализации разработанной технологической схемы ГОШ на КГШП. Если процесс ГОШ открытая штамповка, то значение данного показателя от ≈0.3 до ≈0.5. Ограничение – условие размещения осаженной заготовки в штампе предварительного перехода. При закрытой штамповке значение данного показателя может приближаться к нулю.

5. Разработана методика расчёта динамических и статических процессов (рассчитываются параллельно), протекающих в КГШП при изгибной и крутильной деформациях эксцентрикового вала, крутильной деформации приводного вала, деформациях с учётом зазоров в кинематических парах ползуна, шатуна, зубчатой передачи, а также деформации станины. Данная методика реализована в виде программы для ЭВМ. Исследования операций ГОШ, выполненных с применением данной методики, показали, что в отдельных элементах пресса динамические нагрузки могут превышать статические:

- более чем в 2 раза (главный вал в сечении между эксцентриком и зубчатым колесом, кручение) в начале обратного хода пресса, и в начале выполнения операции штамповки;
- при незначительном превышении динамических нагрузок вследствие растяжения-сжатия шатуна и изгиба главного вала пресса в момент завершении операции штамповки (≈3% – ≈7%), средний коэффициент динамичности для этих элементов может достигать значений, равных 3.

6. Разработана методика расчёта геометрических параметров штампа, реализующего бесподпорную технологию ГОШ с уменьшенными радиусами закругления наружных углов поковки и сниженными технологическими силами за счёт формирования на предварительном переходе выступов на торцевых поверхностях полуфабриката поковки. Установлены предельные значения геометрических соотношений параметров гравюр штампа, образующих выступы, гарантирующих их бездефектную деформацию на окончательном переходе, а также возможность их использования в качестве компенсаторов при применении закрытой штамповки на предварительном переходе. Расчёт параметров выступов реализован в виде программы для ЭВМ.

7. Разработаны и исследованы новые эффективные технологические схемы штамповки поковки детали каретка синхронизатора 2-ой и 3-ей передачи автомобиля «КАМАЗ»:

- технологическая схема: осадка заготовки, предварительная открытая штамповка с формированием одного выступа на внешней поверхности, окончательная закрытая штамповка. Уменьшение радиуса закругления наружного угла поковки позволило уменьшить припуски на механическую обработку и увеличить коэффициент использования металла с 0.726 до 0.738, а коэффициент точности поковки с 0.784 до 0.858. Технологическая сила штамповки уменьшилась с 18.65 МН до 18.6 МН на предварительном переходе и с 23.37 МН до 18.38 МН на окончательном переходе. Средний коэффициент динамичности, рассчитанный для шатуна пресса, уменьшился с 2.106 до 1.496;

- технологическая схема: осадка заготовки, предварительная открытая штамповка с формированием трёх выступов (1 – на внешней поверхности, 2 – на внутренней поверхности), окончательная открытая штамповка. Уменьшение радиуса закругления наружного угла поковки позволило уменьшить припуски на механическую обработку и увеличить коэффициент использования металла с 0.726 до 0.736, а коэффициент точности поковки с 0.784 до 0.863. Технологическая сила штамповки уменьшилась с 18.65 МН до 14.49 МН на предварительном переходе и с 23.37 МН до

11.76 МН на окончательном переходе. Для выполнения штамповочных операций появилась возможность применение пресса с номинальным усилием 16МН (К8542). Средний коэффициент динамичности, рассчитанный для шатуна пресса – 2.223;

- технологическая схема: осадка заготовки, предварительная закрытая штамповка с формированием двух выступов на внешних поверхностях, используемых в качестве компенсаторов, окончательная открытая штамповка. Уменьшение радиуса закругления наружного угла поковки позволило уменьшить припуски на механическую обработку и увеличить коэффициент использования металла с 0.726 до 0.749, а коэффициент точности поковки с 0.784 до 0.858. Технологическая сила штамповки уменьшилась с 18.65 МН до 10.86 МН на предварительном переходе и с 23.37 МН до 11.81 МН на окончательном переходе. КГШП К8542. Средний коэффициент динамичности, рассчитанный для шатуна пресса – 2.859.

Диссертация является законченной научно-квалификационной работой, имеющей перспективы дальнейшей разработки по направлениям, среди которых исследование возможности применения полученных результатов для осесимметричных поковок; разработка методик проектирования технологических схем ГОШ на КГШП поковок не круглых в плане; создание динамических, математических моделей и программ для их реализации на ЭВМ, отвечающих требованиям, предложенным в диссертации, для других типов кузнечно-прессового оборудования; исследование возможности применения результатов диссертационной работы для проектирования технологических схем ГОШ на других типах кузнечно-прессового оборудования, например, винтовых и гидравлических прессах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Губкин, С.И. Теория обработки металлов давлением / С.И. Губкин. – М.: Металлургиздат, 1947. – 532 с.

2. Смирнов-Аляев, Г. А. Элементарные основы теории обработки металлов давлением. Библиотека кузнеца-новатора, вып. 2; под ред. А.В. Камнева. – М.: МАШГИЗ, 1958. – 164 с.

3. Унксов, Е.П. Инженерные методы расчета усилий при обработке металлов давлением / Е.П. Унксов. – М.: Машгиз, 1955. – 280 с.

4. Унксов, Е.П. Инженерная теория пластичности / Е.П. Унксов. – М.: Машгиз, 1959. – 328 с.

5. Губки, С.И. Пластическая деформация металлов. В 3-х томах. Т. 1 / С.И. Губкин. – М.: Металлургиздат, 1960. – 376 с.

6. Губки, С.И. Пластическая деформация металлов. В 3-х томах. Т. 2 / С.И. Губкин. – М.: Металлургиздат, 1960. – 416 с.

7. Губки, С.И. Пластическая деформация металлов. В 3-х томах. Т. 3 / С.И. Губкин. – М.: Металлургиздат, 1960. – 306 с.

8. Тарновский, И.Я. Деформации и усилия при обработке металлов давлением / Н.Я. Тарновский, А.А. Поздеев, О.А. Ганаго. – М.: Машгиз, 1959. – 304 с.

9. Теория обработки металлов давлением / И.Я.Тарновский, А.А. Поздеев, О.А. Гонаго [и др.]. – М.: Металлургия, 1963. – 672 с.

10. Тарновский, И.Я. Автоматизация проектирования технологии горячей штамповки / И.Я. Тарновский, Р.А. Вайсбурд, Г.А. Еремеев. – М: Машиностроение, 1969, – 240 с.

11. Тарновский, И.Я. К вопросу определения усилий при обработке металлов давлением: в сб.: Обработка металлов давлением. Вып.3. / И.Я. Тарновский, А.А. Поздеев, Н.Н. Красовский. – М.: Металлургиздат, 1954. – С. 24 – 28.

12. Сторожев, М.В. Теория обработки металлов давлением / М.В. Сторожев, Е.А. Попов. – М.: Машиностроение, 1971. – 423 с.

13. Соколов, Н.Л. Горячая штамповка выдавливанием стальных деталей / Н.Л. Соколов. – М.: Машиностроение, 1967. – 192 с.

14. Ковка и объёмная штамповка стали. Справочник в двух томах. Колл. авторов. Под ред. д-ра техн. наук М.В. Сторожева. Том 2. Изд. 2-е, перераб. – М.: Машиностроение, 1967. – 448 с.

15. Mises, R. V. The differential and integral equations of mechanics and physics / R. M. Mises, P. Frank, H. Weber, B. Riemann // 2nd expanded. ed, 2 vols. New York, Mary S. Rosenberg, 1943.

16. Thomsen, E.G. Mechanics of Plastic Deformation in Metal Processing / E. G. Thomsen C.T. Yang, S. Kobayashi. – New York, 1965.

17. Calladine, C.R. Engineering plasticity. – Pergamon Press, 1969. – 318 с.

18. Johnson, W. Engineering plasticity / P.B. Mellor. – New York: Ellis Harwood, 1983, pp. 646.

19. Ковка и объёмная штамповка: справочник. В 4 т. Т. 2. Горячая объёмная штамповка. – 2-ое изд., перераб. и доп. / Под общ. ред. Е.И. Семёнова. – М.: Машиностроение, 2010. – 720 с.

20. Семёнов Е.И. Ковка и горячая штамповка: учебник / Е.И. Семёнов. – М: МГИУ, 2011. – 414 с.

21.Сосенушкин, Е.Н. Механика немонотонных процессов пластического деформирования / Е.Н.Сосенушкин, Е.А. Яновская, А.Е. Сосенушкин, В.В. Емельянов // Вестник машиностроения. – 2015. – № 9. – С. 29 – 33.

22. Сосенушкин, Е.Н. Напряженное состояние и деформируемость металла при осесимметричной вытяжке / Е.Н. Сосенушкин, Е.А. Яновская, В.В. Емельянов // СТИН. – 2014. – № 12. – С. 21-25.

23. Сосенушкин, Е.Н. Влияние кинематики течения металла на эволюцию микроструктуры и свойств заготовок при равноканальном угловом прессовании / Е.Н. Сосенушкин, Л.М. Овечкин, В.Н. Климов, А.Е. Сосенушкин, И.Ю. Сапронов // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. – 2012. – № 11. – С. 19-22.

24. Сосенушкин, Е.Н. Разработка ресурсосберегающей технологии производства фланцевых поковок на универсальном оборудовании / Е.Н. Сосенушкин, В.В. Белокопытов // Вестник МГТУ Станкин. – 2010. – № 3. – С. 35 – 41.

25. Колмогоров, В.Л. Принцип возможных изменений напряженно-деформированного состояния / В.Л. Колмогоров // Инженерный журнал. Механика твердого тела. – 1967. – № 2. – С. 143 – 148.

26. Колмогоров, В.Л. Механика обработки металлов давлением. Учебник для вузов. 2-ое изд. перераб. и доп. / В.Л. Колмогоров. – Екатеринбург: Изд-во Уральского технического университета. – УПИ, 2001. – 836 с.

27. Колмогоров, В.Л. Численное моделирование больших пластических деформаций и разрушения металлов / В.Л. Колмогоров // Кузнечно-штамповочное производство. – 2003 .- № 2.- С. 4-16.

28. Колмогоров, В.Л. Примеры использования обобщенного вариационного принципа для идеальной пластической среды / В.Л. Колмогоров, В.Л. Соловей, С.Н. Буркин [и др.] // Обработка металлов давлением. – ВИЛС, 1976. – С. 63 – 68.

29. Дмитриев, А.М. Технология ковки и объемной штамповки. Ч. 1. Объемная штамповка выдавливанием: Учебник для вузов / А.М. Дмитриев, А.Л. Воронцов. – М.: Машиностроение-1, 2005. – 500 с.

30. Голенков, В.А. Теория обработки металлов давлением: учебник для вузов / В.А. Голенков, С.П. Яковлев, С.А. Головин, С.С. Яковлев, В.Д. Кухарь; под ре. В.А. Голенкова, С.П. Яковлева. – М.: Машиностроение, 2009. – 442 с.

31. Яковлев, С.П. Штамповка анизотропных заготовок / С.П. Яковлев, В.Д. Кухарь // М.: Машиностроение, 1986. – 136 с.

32. Яковлев, С.П. Обработка давлением анизотропных материалов / С.П. Яковлев, С.С. Яковлев, В.А. Андрейченко. – Кишинёв: Квант, 1997. – 332 с.

33. Володин, И.М. Моделирование процессов горячей объёмной штамповки / И.М. Володин. – М.: Машиностроение-1, 2006. – 253 с.

34. Охрименко, Я. М. Технология кузнечно-штамповочного производства. Учебник для вузов. / Я. М. Охрименко. – М.: «Машиностроение», 1976. – 560 с.

35. Брюханов, А. Н. Ковка и объёмная штамповка. Учебное пособие для ма-

шиностроительных вузов / А. Н. Брюханов. – М.: Машиностроение, 1975. – 408 с.

36. Крук, А.Т. Штамповка поковок фланцев трубопроводов на тяжелых кривошипных горячештамповочных прессах / А.Т. Крук, В.Ф. Федоркевич // Кузнечно-штамповочное производство. – 1999. – №6. – С.35-40.

37. Северденко, В.П. Теория обработки металлов давлением / В.П. Северденко. – Минск: Высшая школа, 1966. – 224 с.

38. Смирнов-Аляев, Г.А. Сопротивление материалов пластическому деформированию [Текст] / Г.А. Смирнов-Аляев. – Л.: Машиностроение, 1978. – 368 с.

39. Смирнов, А.Н. Вариационные уравнения принципа возможного изменения деформированного состояния для задач с ранее неизвестными границами пластического очага деформации / В.К. Смирнов // Труды Уральского политехнического института. Вып. 196. – Свердловск; изд. УПИ, 1972, – С.4 – 11.

40. Перлин, И.Л. Теория прессования металлов / И.Л. Перлин, Л.Х. Райтбарг. – М.: Металлургия, 1975. – 448 с.

41. Золотухин, П.И. Основные положения обработки металлов давлением / П.И. Золотухин, И.М. Володин. – Липецк: Изд-во ЛГТУ, 2013. – 243 с.

42. Гун, Г.Я. Теоретические основы обработки металлов давлением / Г.Я. Гун. – М.: Металлургия, 1980 – 450 с.

43. Томленов, А.Д. Теория пластического деформирования металлов / А.Д. Томленов. – М.: Металлургия, 1972. – 408 с.

44. Шофман, Л.А. Основы расчета процессов штамповки и прессования / Л.А. Шофман. – М., Машгиз, 1961. – 340 с.

45. Радаев, Ю.Н. Пространственная задача математической теории пластичности: учеб. пособие. 2-е изд., перераб. и доп. / Ю.Н. Радаев // Федер. агентство по образованию. – Самара: Издательство ”Самарский университет”, 2006. – 340 с.

46. Абдуллах, М.Н. Повышение эффективности изготовления фланцевых поковок на основе анализа технологических схем штамповки: диссертация ... канд. техн. наук: 05.16.05 / Абдуллах Мохаммед Наджиб. – Липецк, 2011. – 162 с.

47. Тетерин, Г.П. Основы оптимизации и автоматизации проектирования технологических процессов горячей объёмной штамповки / Г.П. Тетерин, П.И. Полухин. – М.: Машиностроение, 1979. – 284 с.

48. Алиев, Ч.А. Система автоматизированного проектирования технологии горячей объёмной штамповки / Ч.А. Алиев, Г.П. Тетерин. – М.: Машиностроение, 1987. – 224 с.

49. Сосёнушкин, Е.Н. Автоматическая классификация деталей машиностроения, изготовляемых холодной и полугорячей объемной штамповкой / Е.Н. Сосёнушкин // Заготовительные производства в машиностроении. – 2006. – № 5. – С. 20-27.

50. Антонов, А.В. Системный анализ. Учеб. для вузов / А.В. Антонов. – М.: Высш. ШК., 2004. – 454 с.

51. Чернышов, В.Н. Теория систем и системный анализ : учеб. пособие / В.Н. Чернышов, А.В. Чернышов. – Тамбов : Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 2008. – 96 с.

52. Кулагин, О.А. Принятие решений в организациях: учеб. пособие / О. А. Кулагин. – СПб.: Изд. дом «Сентябрь», 2001. – 148 с.

53. Руденко, Ф.Г. Критерии оценки выбора уровня эффективности технологий и их влияние на экономичность функционирования предприятий ОПК [Электронный ресурс] / Ф.Г. Руденкт // – Режим доступа: http://teoria-practica.ru/rus/files/arhiv_zhurnala/2013/2/ekonomika/rudenko.pdf (дата обращения 01.10.2016).

54. Надёжность и эффективность в технике: Справочник. В 10 т. Т. 3. Эффективность технических систем / Под общ. ред. В.Ф. Уткина, Ю.В. Крючкова. – М.: Машиностроение, 1988. – 224 с.

55. Ковка и объёмная штамповка: справочник. В 4 т. Т. 1. Материалы и нагрев. Оборудование. Ковка – 2-ое изд., перераб. и доп. / Под общ. ред. Е.И. Семёнова. – М.: Машиностроение, 2010. – 720 с.

56. Шмунк, М.М. Оценка эффективности использования металла в Российском машиностроении / М.М. Шмунк // Вестник ОГУ. – № 11. – 2008. – С. 90 – 93.

57. Татарских, Б.Я. Организационно-экономические вопросы развития заготовительных производств в машиностроении / Б.Я. Татарских // Заготовительное производство в машиностроении. – 2007. – № 2. – С. 3 – 8.

58. ГОСТ 27782-88 Металлоёмкость изделий машиностроения. Термины и определения. – Введ. 1989–01–01. – М.: Издательство стандартов, 1988. – 7 с.

59. ГОСТ 18970-84 (изменения № 344 от 29.03.91) Обработка металлов давлением. Операции ковки и штамповки. Термины и определения. – Введ. 1987–01–07. – М.: Издательство стандартов, 1991. – 53 с.

60. Ковка и объёмная штамповка стали. Справочник в двух томах. Колл. авторов. Под ред. д-ра техн. наук М.В. Сторожева. Том 1. Изд. 2-е, перераб. – М.: Машиностроение, 1967. – 435 с.

61. Малеев, И.И. Об определении усилия пресса и веса падающих частей молота при горячей штамповке / И.И. Малеев // Оборудование технология штамповки, сб. научных трудов ЧПИ. – Челябинск, 1969. – С. 18 – 32.

62. Определение усилий горячей штамповки и выбор типоразмера КГШП: РТМ. – Воронеж: ЭНИКМАШ. – 1970. – 167 с.

63. Лавриненко, Ю. А. Объемная штамповка на автоматах : учеб. пособие / Ю.А. Лавриненко, С.А. Евсюков, В.Ю. Лавриненко. – М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2014. – 259 с.

64. Букарев, И.М. Моделирование процесса объемной штамповки в DEFORM 3D И QFORM 3D [Электронный ресурс] / И.М. Букарев, Д.М. Бабин // – Режим доступа: http://studvesna.ru/db_files/articles/179/article.pdf (дата обращения 02.10.2016).

65. QForm 8. Руководство пользователя.

66. Вакалов, А.А Применение программ компьютерного моделирования при разработке процессов горячей штамповки заготовок лопаток [Электронный ресурс] / А.А. Вакалов // – Режим доступа: http://www.qform3d.ru/files_ru/2011_0002.pdf (дата обращения 01.10.2016).

67. Efimov, M. Experience of Simulation Implementation to Development of Technological Processes for Production of Large Forged Products at Energomash-spetsstal (Kramatorsk) [Электронный ресурс] / Maksim Efimov1, Aleksandr Selutin, Andrey Kolomoyets, Anatoly Ryabcev, Vladimir Pashinsky, Sergey Stebunov // – Ре-

жим доступа: http://qform3d.ru/files_ru/2014_0002.docx (дата обращения 01.10.2016).

68. Ellinghausen, T. The Revolution of Simulation Software Development [Электронный ресурс] / Tom Ellinghausen // – 2013. – Режим доступа: http://qform3d.ru/files_ru/2013_0001_0.pdf (дата обращения 01.10.2016).

69. DEFORM™ - 3D – Режим доступа: http://www.tesis.com.ru/infocenter/downloads/deform/deform_3d.pdf (дата обращения 02.10.2016).

70. Кухарь, В.В. Применение пакета DEFORM 3D для анализа вариантов технологий штамповки поковок «СУППОРТ» / В.В. Кухарь, Р.С. Николенко, В.А. Бурко // Вісник Національного технічного університету України "Київський політехнічний інститут". Серія: Машинобудування. – 2015. –№ 2 (74). – С. 77-83.

71. Константинов, И.Л. Моделирование процесса горячей объемной штамповки поковки из алюминиевого сплава АК6 / И.Л. Константинов, И.Ю. Губанов, И.О. Астрашабов, С.Б. Сидельников, Н.А. Белан // Известия вузов. Цветная металлургия. – 2015; – №1. – С. 45-48. DOI:10.17073/0021-3438-2015-1-45-48.

72. Харламов, А.А. Моделирование обработки металлов давлением с помощью комплекса DEFORM / А.А. Харламов, А.П. Латаев, В.В. Галкин, П.В. Уланов // САПР и графика. – 2005. – №5. – С. 2 – 4.

73. Ланской, Е. Н. Элементы расчета деталей и узлов кривошипных прессов / Е. Н. Ланской, А. Н. Банкетов. – М.: Машиностроение, 1966. – 380 с.

74. Власов, В.И. Кривошипные кузнечно-прессовые машины / В. И. Власов, А. Я. Борзыкин, И. К. Букин-Батырев и др. Под ред. В. И. Власова. – М.: Машиностроение, 1982. – 424 с.

75. Банкетов, А. Н. Кузнечно-штамповочное оборудование / А. Н. Банкетов, Ю. А. Бочаров [и др.] – М.: Машиностроение, 1982. – 576 с.

76. Надёжность и эффективность в технике: Справочник. В 10 т. Т. 10. Справочные данные по условиям эксплуатации и характеристикам надёжности / Под ред. В.А Кузнецова. – М.: Машиностроение, 1990. – 336 с.

77. Складчиков, Е.Н. Моделирование динамики работы привода кривошипного пресса простого действия // Кузнечно-штамповочное производство. – 1985. – №4. – С. 30 – 32.

78. Телегин, В.В. Анализ влияния на динамику кривошипного пресса технологических схем штамповки / В.В. Телегин, М.Н. Абдуллах // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2010. – Т. 12. –№4(3). – С. 629 – 633.

79. Телегин, В.В. Динамика механизмов многопозиционных холодноштамповочных автоматов: монография / В.В. Телегин. – Липецк: ЛГТУ, 2006. – 204 с.

80. ГОСТ 7505-88 Поковки стальные штампованные. Допуски, припуски и кузнечные напуски. – Введ. 1990–01–07. – М.: ИПК Издательство стандартов, 1989. – 37 с.

81. Штильников, А.А. Поиск рациональных технологических параметров малоотходной горячей штамповки на основе минимизации избытка штампуемого металла: Автореф. дис. … канд. техн. наук: 05.02.09; [Место защиты: Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова]. – Магнитогорск, 2012. – 20 с.

82. Володин, И.М. Система основных принципов проектирования процессов горячей объемной штамповки / Проблемы механики сплошных сред и смежные вопросы технологии машиностроения: Сборник докладов третьей конференции. Владивосток – Комсомольск-на-Амуре, сентябрь 2004 г. – Комсомольск-на-Амуре: ИМиМ ДВО РАН, 2004. – С. 270 – 277.

83. Володин, И.М. Система основных принципов проектирования процессов горячей объемной штамповки и созданные на ее основе технологии / И.М. Володин, А.А. Ромашов // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. – 2008. – № 9. – С. 19 – 29.

84. Прикладные численные методы в заготовительном производстве: учеб. пособие / П.И. Золотухин [и др.]. – Липецк: Изд-во ЛГТУ, 2012. – 127 с.

85. Патент РФ № 2275271. Способ изготовления штампованных поковок / И.М. Володин, А.А. Ромашов, В.С. Мартюгин [и др.] (РФ).- № 2004125009/02; Заявлено 16.08.2004/ Опубл. 27.04.06. Бюл. №12 // Изобретения.

Полезные модели. – 2006. – № 12. – С. 392.

86. Патент РФ № 2509620. Способ изготовления полых фланцевых поковок / И.М. Володин, Г.С. Логунов, В.С. Мартюгин, и др. - № 2011135292/02; Заявлено 23.08.2011/ Опубл. 27.02.2013. Бюл. № 6 // Изобретения полезные модели. – 2014. – Бюл. № 8.

87. Маликов, С.А. Разработка технологии изготовления поковок с отростками на основе принципа поэлементной штамповки / С.А. Маликов, И.М. Володин И.М. // Известия Московского государственного технического университета МАМИ. – 2013. – Т. 2. –№ 2. – С. 80-84.

88. Володин, А. И. Повышение качества круглых в плане поковок на основе совершенствования технологии штамповки: диссертация ... канд. техн. наук: 05.02.09 / Володин Александр Игоревич. – Липецк, 2010. – 171 с.

89. Михайлов, В. Н. Объемная штамповка поковок колец синхронизатора коробки передач автомобиля «КАМАЗ»: диссертация ... канд. техн. наук: 05.02.09 / Михайлов Виктор Николаевич. – Липецк, 2016. – 146 с.

90. Сидняев, Н.И. Введение в теорию планирования эксперимента / Н.И. Сидняев, Н.Т. Вилисова. – М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана. – 2011. – 463 с.

91. Реброва, И.А. Планирование эксперимента: учеб. пособие / И.А. Реброва. – Омск: СибАДИ. – 2010. – 105 с.

92. Норри, Д. Введение в метод конечных элементов: Пер. с англ. / Д. Норри, Ж. де Фриз. – М.: Мир. – 1981. – 304 с.

93. Зенкевич, О. Метод конечных элементов в технике: Пер. с англ. / О. Зенкевич. – М.: Мир. – 1975. – 541 с.

94. Галлагер, Р. Метод конечных элементов. Основы: Пер. с англ. / Р. Галлагер. – М.: Мир. – 1984. – 428 с.

95. Воронков, В.И. Выбор геометрии инструмента для изотермической штамповки поковок с отростками и рёбрами в закрытых штампах: диссертация ... канд. техн. наук: 05.02.09 / Воронков Виктор Иванович. – Москва, 2014. – 203 с.

96. Субич, В.Н. Расчёт и проектирование процессов объёмной и листовой штамповки: учеб. пособие / В.Н. Субич, Н.А. Шестаков, В.А. Дёмин, А.В. Власов. – М.: МГИУ. – 2007. – 414 с.

97. Плаксин, А. В. Создание ресурсосберегающей технологии штамповки поковок фланцев воротниковых на основе комбинированной схемы деформации: диссертация ... канд. техн. наук: 05.16.05 / Антон Викторович. – Челябинск, 2009. –210 с.

98. Полищук, Е.Г. Система расчёта пластического деформирования «Рапид» / Е.Г. Полищук, Д.С. Жиров, Р.А. Вайсбурд // Кузнечно-штамповочное производство. – 1997. – №8. – С. 16 –18.

99. Чумаченко, Е.Н. Моделирование и расчёт 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.

100. Гатин, Ф.Ф. Совершенствование процесса многопереходной горячей штамповки стержневых изделий с головками чашкообразной формы на горизонтально-ковочной машине: диссертация ... канд. техн. наук: 05.02.09 / Гатин Федор Фидаилевич. – Магнитогорск, 2015. – 124 с.

101. Борисов А.В. Разработка ресурсосберегающей технологии изготовления поковок венечных шестерен: диссертация ... канд. техн. наук: 05.16.05 / Борисов Артём Владимирович. – Липецк, 2012. – 184 с.

102. Седов, Л.И. Механика сплошной среды. Т.1. / Л.И. Седов. – М.: Наука, 1983. – С. 528.

103. Хилл, Р. Математическая теория пластичности / Р. Хилл. – М.: Гостехиздат, 1956. – 462 с.

104. Полухин, П.И. Сопротивление пластической деформации металлов и сплавов. 2-е изд. / П.И. Полухин, Г.Я. Гун, А.М. Галкин – М.: Металлургия, 1983. – 352 с.

105. ГОСТ 25.503-97 Расчёты и испытания на прочность. Методы механических испытаний материалов. Методы испытания на сжатие. – Введ. 1997–07–01. – М.: ИПК Издательство стандартов, 1998. – 26 с.

106. Третьяков, А.В. Механические свойства металлов и сплавов при обработке давлением / А.В. Третьяков, В.И. Зюзин – М.: Металлургия, 1973. – 224 с.

107. Хензель, А. Расчёт энергосиловых параметров в процессах обработки металлов давлением: Справ. изд. Перераб. с нем./ А. Хензель, Т. Шпиттель. – М.: Металлургия, 1982. – 360 с.

108. Золоторевский, В.С. Механические свойства металлов: учебник для вузов. 2-ое изд. / В.С. Золоторевский. – М.: Металлургия, 1983. – 352 с.

109. Грудев А.П. Трение и смазка при обработке металлов давлен: Справ. изд. / А.П. Грудев, Ю.В. Зильберг, В.Т. Тилек. – М.: Металлургия, 1982. – 312 с.

110. Леванов А.Н. Контактное трение в процессах обработки металлов давлением / Леванов А.Н. [и др.]. – М.: Металлургия, 1976. – 416 с.

111. Чиченев, Н.А. Методы исследования обработки металлов давлением / Н.А. Чиченев, А.Б. Кудрин, П.И. Полухин. – М.: Металлургия, 1977. – 311 с.

112. Ангерер, А. Техника физического эксперимента: Пер. с нем. / А. Ангерер. – М.: Физматгиз, 1962. – 452 с.

113. Семашко, М.Ю. Комплексное исследование процесса интенсивной пластической деформации алюминиевого сплава / М.Ю. Семашко, П.А. Чигинцев // Вестник ЮУрГУ. Серия «Металлургия». – 2016. – Т. 16. – № 2. – С. 63–67. DOI: 10.14529/met160209.

114. Кельтон, В. Имитационное моделирование. Классика CS / В. Кельтон, А. Лоу. – СПБ.: Питер: Киев: Издательская группа BHV, 2004. – 847 с.

115. Рыбин, Ю.И. Математическое моделирование и проектирование технологических процессов обработки металлов давлением / Ю.И. Рыбин, А.И. Рудской, А.М. Золотов. – СПб.: Изд-во СПбГПУ, 2004. – 644 с.

116. Лоу, А. Имитационное моделирование: учеб. пособие / А. Лоу, В. Кельтон. - 3-е изд. - СПб: Питер, 2004. – 847 с.

117. Чукин, М.В. Применение полнофакторного эксперимента в процессе волочения со сдвигом / М.В. Чукин, А.Г. Рааб, В.И. Семёнов и др. // Вестник МГТУ им. Носова. – 2012. – №4. – С. 33 – 37.

118. Harold, J. Dynamics of mechanical system / J. Harold, L. H. Ronald . – CRC

Press, 2002 – 757 p.

119. Anh, L. X. Dynamics of Mechanical Systems with Coulomb Friction / L. X. Anh. – Springer, 2003. – 269 p.

120. Ambekar, A.G. Mechanism and Machine Theory / A.G. Ambekar. – PHI Learning Pvt. Ltd, 2007 – 1004 p.

121. Артоболевский, И.И. Теория механизмов и машин. Учебник для втузов / И.И. Артоболевский. – Наука, 1988, – 640 с.

122. Кожевников, В.А. Кузнечно-прессовые машины с безмуфтовым приводом / В.А. Кожевников, В.Я. Чинарев. – Воронеж: ВГУ, 1980. – 136 с.

123. Левитский, Н.И. Теория механизмов и машин / Н.И. Левитский. – М.: - Наука, 1990. – 592 с.

124. Вейц, В. Л. Динамика управляемых машинных агрегатов / В. Л. Вейц, М. З. Коловский, А. Е. Кочура. – М.: Наука, 1984. – 351 с.

125. Вейц, В. Л. Колебательные системы машинных агрегатов / В. Л. Вейц, А. Е. Кочура, А. И. Федотов. – Л.: Изд-во Ленингр. ун-та, 1979. – 256 с.

126. Вульфсон, И.И. Динамические расчеты цикловых механизмов / И.И. Вульфсон. – Л.: Машиностроение, 1976, – 328 с.

127. Кобринский, А.А. Динамика и устойчивость / А.А. Кобринский, А.Е. Кобринский. – М.: Наука, 1981. – 335 с.

128. Решетов, Л.Н. Конструирование рациональных механизмов / Л.Н. Решетов. – М.: Машиностроение. 1972. – 256 с.

129. Кривошеев, И. А. Моделирование динамических процессов в сложных системах / И. А. Кривошеев, Д. А. Ахметзянов. – Уфа : УГАТУ, 2003. – 99 с.

130. Вульфсон, И.И. Колебания машин с механизмами циклового действия / И.И. Вульфсон. – Л.: Машиностроение, 1990. – 592 с.

131. Лурье, А.И. Аналитическая механика / А.И. Лурье – М.: Наука, 1979. – 576 с.

132. Исследования крутильных колебаний валов: учеб. пособие / В.П. Ржевский [и др.]. – Самара, Изд. Самарский гос. аэрокосм. ун-т, 2011. – 40 с.

133. Никишин, В.Н. Угловые колебания коленчатого вала и характеристики дизеля / В.Н. Никишин //Автомобильная промышленность. – 2007. – № 2. – С. 11 – 14.

134. Никишин, В.Н. Крутильные колебания коленчатого вала автомобильного дизеля и вибрации блока цилиндров / В.Н. Никишин // Материалы 77-й международной научно-технической конференции ААИ «Автомобиле- и тракторостроение в России: приоритеты развития и подготовка кадров». – 2012. – С. 176–181.

135. Сторожев, М.В. О динамике фрикционного пресса / М.В. Сторожев // Вестник машиностроения. – 1959. – №12. –С. 30-33.

136. Зимин, А.И. О динамическом расчете кривошипных горячештамповочных прессов на примере их работы холостыми ходами / А.И. Зимин // Кузнечно-штамповочное производство. – 1968. – №3. – С. 24 – 28.

137. Живов, Л.И. Динамические нагрузки и устойчивость вырубных прессов / Л.И. Живов // Кузнечно-штамповочное производство. - 1971. - №6. - С.26-30.

138. Миропольской, Ю.А. Холодная объемная штамповка на автоматах / Ю.А. Миропольской. – М.: Машиностроение, 2001. – 456 с.

139. Власов, В.И. Влияние зазоров в сочленениях кривошипно-шатунного механизма на динамику пресса / В.И. Власов, И.К. Токарев и др.] // Известия ВУЗов. Машиностроение. – 1971. –№10. – С. 49 – 53.

140. Власов, В.И. Учет динамических нагрузок и зазоров при расчете главных исполнительных механизмов кривошипных прессов / В.И. Власов, В.В. Лебедев // Научно-технический реферативный сб. кузнечно-прессовое машиностроение. – М.: НИИМАШ. – 1972. – №3. – С. 7 – 12.

141. Ланской, Е.Н. Динамические процессы при разгрузке кривошипных прессов / Е.Н. Ланской, Г.Г. Поздняков / /Кузнечно-штамповочное производство. – 1966. – №11. – С. 27 – 31.

142. Ланской, Е.Н. Динамика исполнительного механизма кривошипных прессов и автоматов / Е.Н. Ланской, Г.Г. Позняк // Сб. «Повышение точности и автоматизация штамповки и ковки». – 1967. – №8. – М.: Машиностроение.– С. 226 – 242.

143. Бочаров, Ю. А. Кузнечно-штамповочное оборудование / Ю. А. Бочаров. – М.: Издательский центр «Академия», 2008. – 480 с.

144. Сафонов, А.В. К вопросу определения жесткости кривошипных горячештамповочных прессов / А.В. Сафонов, А.Т. Крук // Вестник МГТУ. Сер. Маши-

ностроение. – 1998. – №2. – С. 73 – 83.

145. Власов, А.В. Разработка метода функционального проектирования кузнечно-штамповочного оборудования на основе анализа его работоспособности по динамическим нагрузкам технологического цикла: диссертация ... д-ра техн. наук: 05.03.05 / Власов Андрей Викторович. – Москва, 2001. – 442 с.

146. Телегин, В.В. Построение имитационных моделей в задачах исследования динамики механических систем / В.В. Телегин // Фундаментальные исследования. – 2014. – № 12 (часть 10). – С. 2125 – 2130.

147. Telegin ,V. Computer realization of research into the dynamics of mechanical systems [Text] / V. Telegin, A. Kozlov // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. – 124 (2016) 012101 doi:10.1088/1757-899X/124/1/012101 d.

148. Кулаев, Д.Х. Динамика кривошипно-ползунного механизма с зазорами в шатунных подшипниках [Электронный ресурс] /Д.Х. Кулаев // – Режим доступа: http://refrigeration.ihbt.ifmo.ru/file/article/7715.pdf (дата обращения 10.10.2016).

149. Autodesk Inventor 2014. Справка [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://help.autodesk.com/view/INVNTOR/2014/RUS/ (дата обращения 10.10.2016).

150. Телегин, В.В. Технология цифровых прототипов в задачах исследования динамики кузнечно-прессовых машин / В.В. Телегин // Известия Самарского научного центра Российской академии наук.– 2012. –Т. 14. – № 4-5. – С. 1306 – 1309.

151. Вульфсон, И.И. Частотный анализ цикловых машин, включающих крутильно-изгибные колебательные системы с периодической структурой и переменными параметрами / И.И. Вульфсон // Вестник научно-технического развития. – 2011. – №2 (42). – С. 13 – 22.

152. Петрухин, В.В. Основы вибродиагностики и средства измерениявибраций: учебное пособие / В.В. Пертухин, С.В. Петрухин. – М.: Инфра-Инженерия. – 2010. – 176 с.

153. Тарко, Л.М. Упругие волны в штоке штамповочного молота / Л.М. Тарко // Кузнечно-штамповочное производство. – 1959, – №6. – С. 27 – 32.

154. Тарко, Л.М. Волновые процессы в трубопроводах / Л.М. Тарко. – М.: Машгиз, 1963. – 184 с.

155. Телегин, В.В. Моделирование динамических процессов в главном исполнительном механизме кривошипного пресса / В.В. Телегин // Сборник научных и научно-методических докладов международной научно-практической конференции преподавателей, сотрудников и аспирантов. Старый Оскол: СТИ НИТУ МИСиС. – 2009. – Т.1. – С. 285–289.

156. Телегин, В.В. Исследование влияния характера изменения технологического усилия штамповки на динамику кривошипного горячештамповочного пресса / В.В. Телегин, И.М. Володин, М.Н. Абдуллах // Вести высших учебных заведений Черноземья. – 2009. – № 2. – С. 78 – 82.

157 . Телегин, В.В. Объектно-ориентированный подход в задачах моделирования динамических процессов в механизмах кузнечно-прессового оборудования / В.В. Телегин // Известия ТулГУ. Серия. Механика деформируемого твёрдого тела и обработка металлов давлением. – Тула: ТулГУ. – Вып. 1. – 2006. – С. 336 – 345.

158. Tickoo, S. Autodesk Simulation Mechanical 2016 for Designers, 3rd Edition / Sham Tickoo. – CADCIM Technologies, USA. – 2015. – 430 p.

159. Tickoo, S. SOLIDWORKS 2016 for Designers, 14th Edition / Sham Tickoo. – CADCIM Technologies, USA. – 2016. – 1090 p.

160. Jiang, B. Buffer Analysis of Multifunction Office Chair Based on ADAMS and ANSYS / Bo Jiang, Hai Tao Wu, Hong Bin Liu, Hai Tao Liu // Advanced Materials Research. – 2013. – Vol. 655–657. – P. 249–252.

161. Zhu, C.X. Dynamics Simulation Analysis of Flexible Multibody of Parallel Robot / C.X. Zhu, Yong Xian Liu, Guang Qi Cai, L.D. Zhu // Applied Mechanics and Materials. – 2008. – Vol. 10 – 12. – P. 647 – 651.

162. Сметанников, О.Ю. Моделирование динамического поведения сложных механизмов в среде ADAMS-EASY5 / О.Ю. Сметанников, К.А. Могильников // Научно-технический вестник Поволжья. – 2013. – № 5. – С. 54 – 58.

163. Гимадиев, А. Г. LMS Imagine.Lab AMESim как эффективное средство моделирования динамических процессов в мехатронных системах: электрон. учеб.

пособие [Электронный ресурс] / А.Г. Гимадиев, П.И. Грешняков, А.Ф. Синяков // Самара: Изд-во СамНЦ РАН, 2014. – Режим доступа: http://www.ssc.smr.ru/media/publications/978-5-93424-722-6.pdf (дата обращения 15.10.2016).

164. Понятский, В.М. Исследование динамики роботов и машин в среде MATLAB по 3D-иодели САПР PRO/ENGINEER или SOLIDWORKS / В.М. Понятский, Э.Н. Давыдов, В.Г. Федорищева, А.В. Осадчий, И. В. Кислинский // Общая и прикладная механика. Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского, – 2011. – № 4 (2). – С. 283 – 284.

165. Маничев, В.Б. Моделирование динамики сложных технических систем с использованием программного комплекса ПА9 / В.Б. Маничев, М.Ю. Уваров, В.Ю. Спицын. – М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 1999. – 20 с.

166. Жук, Д.М. Моделирование динамических систем с помощью программы РА10 [Электронный ресурс] / Д.М. Жук, В.Б. Маничев, С.В. Родионов: МГТУ им. Н.Э.Баумана. – Режим доступа: http://pa10.ru/doc/pa10modeling.pdf (дата обращения 15.10.2016).

167. Телегин, В.В. Исследование динамики кривошипного горячештамповочного пресса в системе dam / В.В. Телегин, М.Н. Абдуллах // Естественные и технические науки. – 2010. – №4. – С. 252 – 257.

168. Телегин, И.В. Поковки круглые в плане (осесимметричные). Анализ металлоёмкости / И.В. Телегин, И.М. Володин: св. о гос. рег. прог. для ЭВМ Росс. Фед. № 2014661697 от 11.11.2014. Дата поступления 16.09.2014.

169. Телегин, И.В. Исследование и совершенствование технологического процесса горячей объёмной штамповки круглых в плане поковок / И.В. Телегин, И.М. Володин // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2012.– Т. 14. – №4(5). – С. 1310 – 1312.

170. Телегин И.В. Повышение эффективности технологической схемы горячей объёмной штамповки на кривошипном прессе поковки детали “Каретка синхронизатора” / И.В. Телегин, И.М. Володин // Современные наукоемкие технологии. – 2016. – №10-1. – С. 97 – 101.

171. ГОСТ 2590-2006 Прокат сортовой стальной горячекатаный круглый. – Введ. 2009–07–01. – М.: Стандартинформ, 2008. – 16 с.

172. ГОСТ 7417-75 Сталь калиброванная. Сортамент. – Введ. 1976–01–01. – М.: Издательство стандартов, 1976. – 5 с.

173. ГОСТ 14955-77 Сталь качественная круглая со специальной отделкой поверхности. Технические условия. – Введ. 1979–01–01. – М.: Издательство стандартов, 1979. – 7 с.

174. ГОСТ 1133-71 Сталь кованная круглая и квадратная. Сортамент. – Введ. 1973–01–01. – М.: Издательство стандартов, 1973. – 3 с.

175. Справочник конструктора-машиностроителя: в 3-х т. Т.1. – 9-е изд., перераб. и доп./ под ред. И.Н. Жестковой. – М: Машиностроение, 2006. – 928 с.

176. Бронштейн, И.Н., Семендяев К.А. Справочник по математике для инженеров и учащихся втузов. 13-е изд., исправленное / И.Н. Бронштейн, К.А. Семендяев. – М: – Наука, Гл. ред. физ.-мат. лит., 1986. – 544 с.

177. Телегин, И.В. Компьютерное моделирование динамических процессов в кривошипном горячештамповочном прессе / И.В. Телегин // Фундаментальные исследования. – 2013. – № 10 (15). – С. 3414 – 3418.

178. Телегин, И.В. Исследование динамики кривошипных прессов при различных технологических схемах штамповки круглых в плане поковок / И.В. Телегин // Спецпроект: аналіз наукових досліджень : матеріали VIII Міжнар. наук.-практ.конф., 30–31 трав. 2013 р. : у 6 т. – Дніпропетровськ : Біла К. О., 2013. Т. 3 : Наукові дослідження в технічних галузях. – 2013. – С. 16 – 20.

179. Телегин, И.В. Разработка и исследование технологического процесса горячей объёмной штамповки на КГШП круглых в плане поковок / И.В. Телегин // Современная металлургия нового тысячелетия. Липецк: Изд-во ЛГТУ. – 2012. – С. ??

180. Володин, И.М. Разработка и исследование технологической схемы горячей объёмной штамповки кольцевых поковок / И.М. Володин, И.В. Телегин // Естественные и технические науки, – 2011. – № 5 (55). – С. 363 – 365.

181. Биргер. Сопротивление материалов / И.А. Биргер, Р.В. Мавлютов. – М.: Изд. МАИ, 1994. – 511 с.

182. Расчет на прочность деталей машин: справочник / И.А. Биргер, Б.Ф. Шорр, Г.Б. Иосилевич. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1979. – 702 с.

183. Телегин, И.В. К вопросу о снижении металлоёмкости процессов горячей объёмной штамповки круглых в плане поковок на кривошипных прессах / И.В. Телегин // Общество, современная наука и образование: проблемы и перспективы: сб. науч. тр. по мат-лам Междунар. науч.-практ. конф. 30 ноября 2012 г. Тамбов. – 2012. – Часть 10. – С. 147 – 148.

184. Телегин, В.В. Учёт зазоров в кинематических парах при динамическом моделировании механизмов в системе dam / В.В. Телегин // Современная металлургия начала нового тысячелетия: сб. науч. тр. Часть II. – Липецк: Изд-во ЛГТУ, – 2011, – С. 158 – 163.

185. Телегин, И.В. Динамика кривошипного пресса / И.В. Телегин: св. о гос. рег. прог. для ЭВМ Росс. Фед. № 2013618511 от 10.09.2013. Дата поступления 16.07.2013.

186. Телегин И.В. Технология ГОШ. Расчёт параметров инструмента / И.В. Телегин: св. о гос. рег. прог. для ЭВМ Росс. Фед. № 2016660707 от 21.09.2016. Дата поступления 27.07.2016.

187. Данченко, В. Н. Исследование влияния геометрических характеристик заготовки и матриц на формоизменение при прессовании биметаллических алюминиево-магниевых прутков / В.Н., Данченко Х. Дыя, А. Н. Головко, Ш. Берски, С. М. Беляев // Обработка материалов давлением. – 2011. – № 1 (26). – С. 107 – 112.

188. Головко, А. Н. Исследование энергосиловых параметров процесса прессования труб из алюминиевого сплава системы Al-Mg-Sc / А.Н. Головко, В. В. Андреев, А. Ю. Третяк // Научный вестник ДГМА. – 2012. – № 2. – С. 24 – 29.

189. Резвых, Р.В. Корректировка исходных данных для уточнения результатов моделирования процессов холодной объемной штамповки с помощью программы QForm [Электронный ресурс] / Р.В. Резвых, П.С. Мордвинцев – Режим доступа: http://qform3d.ru/files/2012_0002.pdf (дата обращения 18.04.2015).

190. Васильев, Ф.П. Численные методы решения экстремальных задач / Ф.П. Васильев. – М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1980. – 520 с.

191. Габасов, Р. Методы оптимизации / Р. Габасов, Ф.М. Кириллова. – Мн.: Изд-во БГУ, 1975. – 200 с.

192. Марчук, Г.И. Методы вычислительной математики / Г.И. Марчук. – М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1980. – 536 с.

193. Телегин, И.В. Динамические аспекты реализации технологических процессов горячей объёмной штамповки на кривошипных горячештамповочных прессах / И.В. Телегин // Современные тенденции развития науки и технологий. – – 2015. – № 4-1. – С. 145 – 148.

194. Телегин, И.В. Анализ металлоёмкости операций отрезки и нагрева заготовок из сортового проката круглого сечения / И.В. Телегин, И.М. Володин // Фундаментальные исследования. – 2015. – № 7-4. – С. 722 – 726.

195. Телегин, И.В. Структурная формула и оценка металлоёмкости изготовления поковки осесимметричной детали / И.В. Телегин // Символ науки. – 2015. – № 5. – С. 58 – 64.

196. Телегин, И.В. Оценка металлоёмкости горячей объёмной штамповки поковок из сортового проката круглого сечения / И.В. Телегин // Научный альманах. – 2015. – № 7 (9). – С. 817 – 821.

197. Телегин, И.В. Влияние точности заготовки на эффективность горячей объёмной штамповки на кривошипных прессах / И.В. Телегин, И.М. Володин // В сборнике: Инновационные технологии научного развития. Сборник статей международной научно-практической конференции: в 3-х частях. – 2016. – Ч. 2. –С. 77 – 81.

198. Телегин, И.В. Энергетические показатели эффективности технологического процесса горячей объёмной штамповки на кривошипных прессах / И.В. Телегин, И.М. Володин // В сборнике: Современные проблемы развития фундаментальных и прикладных наук. – 2016. – С. 127-131.

199. Телегин, И.В. Автоматизация проектирования ресурсосберегающих технологических процессов горячей объёмной штамповки круглых в плане поко-

вок / И.В. Телегин, И.М. Володин // Инновации, качество и сервис в технике и технологиях: Сборник научных трудов 6-ой Международной научно-практической конференции (2-3 июня 2016 года). – Курск: Юго-Зап. гос. ун-т., ЗАО «Университетская книга». – 2016. – С. 294 – 297.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

МЕТОДИКА РАСЧЁТА КОЭФФИЦИЕНТА ИСПОЛЬЗОВАНИЯ МЕТАЛЛА И ВЫБОРА НА ЕГО ОСНОВЕ РАЦИОНАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ СОРТОВОГО ПРОКАТА, СПОСОБОВ ОТРЕЗКИ И НАГРЕВА ЗАГОТОВКИ

Данная методика применима для анализа металлоёмкости технологического процесса ГОШ поковок из сортового проката круглого сечения.

Исходными данным являются (см. рисунок 2.6):

1. Масса детали.
2. Диаметр сортового проката и его точность.
3. Величина угара при нагреве заготовки.
4. Минимальная высота заготовки. Данное значение может быть получено только путём численного моделирования или экспериментально.
5. Значения верхнего и нижнего отклонений длины заготовки.

Расчёт:

6. Минимального объёма заготовки.
7. Минимальной с учетом угара и максимальной высот заготовки (2.5) – (2.10).
8. Потерь металла вследствие угара, неточностей диаметра и длины заготовки по формулам (2.8).
9. Коэффициента использования металла (2.11).

Анализ результатов:

10. Расчёт нескольких вариантов заготовки. Различные диаметры, точность сортового проката, способы нагрева и отрезки.
11. Сравнительный анализ вариантов изготовления заготовки (см. рисунок 2.12).

Реализация данной методики полностью автоматизирована. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2014661697. Поковки круглые в плане (осесимметричные). Анализ металлоемкости. Заявитель и правообладатель: ФГБОУ ВПО «Липецкий государственный технический университет» (ЛГТУ) (RU). Авторы: Телегин Игорь Викторович (RU), Володин Игорь Михайлович (RU), см. Приложение З.

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

МЕТОДИКА РАСЧЕТА КОЭФФИЦИЕНТА ТОЧНОСТИ ПОКОВКИ НА ОСНОВЕ ГЕОМЕТРИИ ДЕТАЛИ

Данная методика применима для поковок круглых в плане.

Исходными данным являются (см. рисунок 2.5):

1. Описание структуры данных формы детали, в соответствии с (2.3).
2. Шероховатость поверхностей детали, изготовляемой из поковки.
3. Предполагаемая масса поковки.
4. Конструктивные характеристики поковки (ГОСТ 7505-89):
   - класс точности;
   - группа стали;
   - степень сложности;

Расчет:

5. Припусков, напусков, радиусов наружных закруглений поковки и соответствующим им допускам по каждому элементу структуры данных формы детали в соответствии с ГОСТ 7505-89 или определенными иначе (см. рисунок 2.14).
6. Объема каждого элемента структуры данных формы детали и массы всей поковки в соответствии с выражениями (2.13) – (2.15).
7. Коэффициента точности поковки (2.12).

Анализ результатов:

8. Оценка необходимости корректировки значений по графикам зависимостей влияния каждого из назначенных параметров по каждому элементу структуры данных формы детали на коэффициент точности поковки (см. рисунок 2.15).

Реализация данной методики полностью автоматизирована. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2014661697. Поковки круглые в плане (осесимметричные). Анализ металлоемкости. Заявитель и правообладатель: ФГБОУ ВПО «Липецкий государственный технический университет» (ЛГТУ) (RU). Авторы: Телегин Игорь Викторович (RU), Володин Игорь Михайлович (RU), см. Приложение 3.

ПРИЛОЖЕНИЕ В

МЕТОДИКА ОЦЕНКИ ВЛИЯНИЯ ВАРИАНТА ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ СХЕМЫ ГОШ НА УРОВЕНЬ ДИНАМИЧЕСКИХ НАГРУЗОК И УСЛОВИЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ КГШП

Данная методика применима для однокривошипных горячештамповочных прессов (КГШП).

Исходными данным являются:

1. Значения данных динамической модели пресса, представленной на рисунке 2.24.
2. Значения точек графика допустимых усилий на ползуне (см. рисунок 2.28).
3. Определение режима работы пресса – автоматический или одиночный ход.
4. Значения девяти точек, определяющих график технологической силы штамповки. Расчёт этих данных выполняется путём моделирования процесса ГОШ на КГШП методом МКЭ в специальных программах, например, QForm (компания ООО «КванторФорм», Россия).

Расчёты:

5. Решение уравнений движения математической модели пресса (2.19) – (2.38).
6. Расчёт значений показателей динамичности пресса (2.40) – (2.49).

Анализ результатов:

7. Визуализация графиков изменения статических и динамических нагрузок, графиков допускаемых усилий в элементах пресса.
8. Визуализация графиков кинематических характеристик движения элементов пресса – перемещение, скорость, ускорение.
9. Визуализация диаграмм пересопряжения зазоров (см. зависимость 2.46).
10. Сохранение полученных результатов для сравнительной оценки уровня динамических процессов в КГШП при реализации других вариантов технологических схем.

Реализация данной методики полностью автоматизирована. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2013618511. Динамика кривошипного пресса. Автор Телегин И.В. Заявитель и правообладатель Телегин Игорь Викторович (RU), см. Приложение 3.

ПРИЛОЖЕНИЕ Г

МЕТОДИКА РАСЧЁТА ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ФРАГМЕНТА ГРАВЮРЫ ШТАМПА ПРЕДВАРИТЕЛЬНОГО ПЕРЕХОДА, ФОРМИРУЮЩЕГО ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ВЫСТУП НА ТОРЦЕВОЙ ПОВЕРХНОСТИ ПОЛУФАБРИКАТА ПОКОВКИ

Данная методика применима при проектировании технологических схем предварительного перехода открытой и закрытой ГОШ на КГШП круглых в плане поковок высотой до 60 мм.

Исходными данным являются (см. рисунок 3.15):

1. Начальные значения геометрических параметров выступа (см. рисунок 3.7).
2. Диаметр, минимальная и максимальная высота заготовки (см. Приложение Б).
3. Расположение выступа.
4. Ограничения на параметры, определяющие бездефектную деформацию выступа на окончательном переходе.

Расчёт:

5. Объёма выступа в соответствии с зависимостями (3.1) – (3.4).
6. Значений параметров выступа в соответствии с зависимостями (3.5), (3.7) – (3.9).
7. Оценка полученных результатов и подбор новых значений геометрических параметров выступа при невыполнении условий бездефектной деформации выступа на окончательном переходе (3.5), (3.7) – (3.9).
8. Расчёт координат точек фрагмента гравюры штампа, формирующего выступ (см. рисунок 3.16).

Реализация данной методики полностью автоматизирована. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2016660707. Технология ГОШ. Расчёт параметров инструмента. Автор Телегин И.В. Заявитель и правообладатель ФГБОУ ВПО «Липецкий государственный технический университет» (RU), см. Приложение З.

ПРИЛОЖЕНИЕ Д

АКТ ПЕРЕДАЧИ РЕЗУЛЬТАТОВ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЫ В ВИДЕ МЕТОДИКИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПЕРЕХОДОВ И ИНСТРУМЕНТА ДЛЯ ГОРЯЧЕЙ ОБЪЁМНОЙ ШТАМПОВКИ КРУГЛЫХ В ПЛАНЕ ПОКОВОК КЗ ПАО «КАМАЗ»

«УТВЕРЖДАЮ»
ГЛАВНЫЙ ИНЖЕНЕР
КЗ ПАО «КАМАЗ»
_____ Г.Ф. Мухаметзянов
«12» 01 2017 г.

А К Т

передачи результатов научно-исследовательской работы в виде методики проектирования технологических переходов и инструмента для горячей объёмной штамповки круглых в плане поковок

Комиссия в составе представителей Кузнечного завода ПАО «КАМАЗ» главного технолога Мартюгина В.С., начальника конструкторского отдела оснастки и инструмента (КОИиО) Карнилова А.Ю., начальника технологического отдела ОМД (ТООМД) Низамова Р.С., руководителя работы, профессора ФГБОУ ВО «Липецкий государственный технический университет» (ЛГТУ), д.т.н. Володина И.М., ассистента Телегина И.В. составила настоящий акт в том, что результаты научно-исследовательской работы: «Методика проектирования технологических переходов и инструмента» передана КЗ ПАО «КАМАЗ».

Методика содержит:

- описание способов проектирования технологических переходов горячей объёмной штамповки круглых в плане поковок;
- описание способов расчёта показателей эффективности технологической схемы штамповки;
- примеры проектирования технологических переходов;
- программу для ЭВМ, позволяющую автоматизировать процесс вычислений при проектировании гравюр штампов предварительного перехода в соответствии с данной методикой.

От ЛГТУ:

Руководитель работы:
д.т.н., профессор
_____ Володин И.М.

Ассистент
_____ Телегин И.В.

От КЗ ПАО «КАМАЗ»

Главный технолог
_____ Мартюгин В.С.

Начальник КОИиО
_____ Карнилов А.Ю.

Начальник ТООМД
_____ Низамов Р.С.

ПРИЛОЖЕНИЕ Е

АКТ ОБ ИСПОЛЬЗОВАНИИ РЕЗУЛЬТАТОВ
НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЫ В ВИДЕ
МЕТОДИКИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПЕРЕХОДОВ
И ИНСТРУМЕНТА ДЛЯ ГОРЯЧЕЙ ОБЪЁМНОЙ ШТАМПОВКИ
КРУГЛЫХ В ПЛАНЕ ПОКОВОК КЗ ПАО «КАМАЗ»

«УТВЕРЖДАЮ»
ГЛАВНЫЙ ИНЖЕНЕР
КЗ ПАО «КАМАЗ»
_____ Г.Ф. Мухаметзянов
«14» 02 2017 г.

А К Т

об использовании методики проектирования высокоэффективного технологического процесса горячей объемной штамповки круглых в плане поковок

Комиссия в составе представителей Кузнечного завода ПАО «КАМАЗ» главного технолога Мартюгина В.С., начальника конструкторского отдела инструмента и оснастки (КОИиО) Карнилова А.Ю., начальника технологического отдела ОМД (ТООМД) Низамова Р.С., руководителя работы, профессора ФГБОУ ВО «Липецкий государственный технический университет» (ЛГТУ), д.т.н. Володина И.М., ассистента Телегина И.В. составила настоящий акт в том, что результаты научно-исследовательской работы: «Методика проектирования технологических переходов и инструмента» принята к использованию КЗ ПАО «КАМАЗ».

Методика содержит:

- описание способов проектирования технологических переходов горячей объёмной штамповки круглых в плане поковок;
- описание способов расчёта показателей эффективности технологической схемы штамповки;
- примеры проектирования технологических переходов;
- программу для ЭВМ, позволяющую автоматизировать процесс вычислений при проектировании гравюр штампов предварительного перехода в соответствии с данной методикой.

От ЛГТУ:

Руководитель работы:
д.т.н., профессор
_____ И.М. Володин

Ассистент
_____ И.В. Телегин

От КЗ ПАО «КАМАЗ»

_____ Главный технолог
В.С. Мартюгин

_____ Начальник КОИиО
А.Ю. Карнилов

_____ Начальник ТООМД
Р.С. Низамов

ПРИЛОЖЕНИЕ Ж

АКТ ВНЕДРЕНИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ НАУЧНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ
В УЧЕБНЫЙ ПРОЦЕСС НА КАФЕДРЕ ОБОРУДОВАНИЯ И ПРОЦЕССОВ
МАШИНОСТРОИТЕЛЬНЫХ ПРОИЗВОДСТВ ФГБУ ВО «ЛГТУ»

«УТВЕРЖДАЮ»

Первый проректор
ФГБОУ ВО «ЛГТУ»

Ю.П. КАЧАНОВСКИЙ

АКТ

о внедрении результатов научных исследований

в учебный процесс

Настоящим актом подтверждается внедрение в учебный процесс (курсовое проектирование, дипломное проектирование и СНИР) ФГБОУ ВО специальности «Машины и технологии процессов ОМД» следующих результатов диссертационной работы «Повышение эффективности штамповки круглых в плане поковок на кривошипных прессах» ассистента кафедры инженерной графики Телегина И.В.:

1. Система показателей эффективности для оценки различных вариантов технологических схем штамповки.

2. Модель для исследования на ЭВМ ресурсов снижения металлоёмкости технологического процесса ГОШ на КГШП круглой в плане поковки на основе геометрии изготавливаемой из неё механической обработкой детали.

3. Модель для исследования на ЭВМ точности изготовления заготовки и исследования её влияния на эффективность процесса ГОШ;

4. Модель для исследования на ЭВМ влияния технологической схемы ГОШ на динамические процессы и статические нагрузки в деталях КГШП;

5. Модель для расчёта на ЭВМ геометрических параметров технологических схем горячей объёмной штамповки, позволяющих при снижении сил пластического деформирования на окончательном переходе, изготовить поковки с минимальными значениями радиусов закругления наружных углов и уменьшенными припусками на механическую обработку.

Заведующий кафедрой оборудования
и процессов машиностроительных производств

28.03.2017 доц., к.т.н. П.И. Золотухин

ПРИЛОЖЕНИЕ З

СВИДЕТЕЛЬСТВА О ГОСУДАРСТВЕННОЙ РЕГИСТРАЦИИ ПРОГРАММ ДЛЯ ЭВМ, РАЗРАБОТАННЫХ АВТОРОМ

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2013618511

Динамика кривошипного пресса

Правообладатель: ***Телегин Игорь Викторович (RU)***

Автор: ***Телегин Игорь Викторович (RU)***

Заявка № **2013616163**
Дата поступления **16 июля 2013 г.**
Дата государственной регистрации
в Реестре программ для ЭВМ ***10 сентября 2013 г.***

Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Б.П. Симонов

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2014661697

Поковки круглые в плане (осесимметричные). Анализ металлоемкости.

Правообладатель: ***Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Липецкий государственный технический университет» (ЛГТУ) (RU)***

Авторы: ***Телегин Игорь Викторович (RU),***
Володин Игорь Михайлович (RU)

Заявка № **2014619339**
Дата поступления **16 сентября 2014 г.**
Дата государственной регистрации
в Реестре программ для ЭВМ ***11 ноября 2014 г.***

Врио руководителя Федеральной службы по интеллектуальной собственности

Л.Л. Кирий

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2016660707

Технология ГОШ. Расчёт параметров инструмента

Правообладатель: ***Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Липецкий государственный технический университет» (ЛГТУ) (RU)***

Автор: ***Телегин Игорь Викторович (RU)***

Заявка № **2016618275**
Дата поступления **27 июля 2016 г.**
Дата государственной регистрации
в Реестре программ для ЭВМ ***21 сентября 2016 г.***

Руководитель Федеральной службы по интеллектуальной собственности

Г.П. Ивлиев