

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«КАЗАНСКИЙ (ПРИВОЛЖСКИЙ) ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

На правах рукописи



Низамов Равиль Салимович

РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ ПРЕЦИЗИОННОЙ ШТАМПОВКИ
ЗУБЧАТЫХ ВЕНЦОВ КОНИЧЕСКИХ ПЕРЕДАЧ

2.5.7 – Технологии и машины обработки давлением

Диссертация на соискание учёной степени кандидата
технических наук

Научный руководитель профессор, доктор технических наук
Панкратов Дмитрий Леонидович

Набережные Челны, 2023

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
1 Анализ технологических возможностей формообразования объёмной штамповкой зубчатых шестерён с зубчатым венцом.....	9
1.1 Способы получения зубчатого венца шестерён с предварительной штамповкой.....	10
1.2 Способы получения зубчатого венца шестерён пластическим деформированием.....	21
1.3 Элементы системного анализа при выборе рациональных технологических схем.....	26
1.4 Обеспечение качества поверхности зубчатого венца.....	37
Выводы по разделу.....	45
2 Методы исследований.....	48
2.1 Моделирование процессов пластического формообразования для оценки напряжённо-деформированного состояния.....	48
2.2. Влияние формы припуска на напряжённо-деформированное состояние и силу при холодной калибровке.....	51
2.3 Методика проведения испытаний межколесного дифференциала на долговечность.....	55
2.3. Выводы по разделу.....	57
3 Результаты исследований.....	59
3.1 Формирование точности зубчатых венцов при прецизионной штамповке (горячей объёмной штамповке с последующей холодной калибровкой повышенной точности).....	59
3.2 Определение рациональной высоты припуска под холодную калибровку зубьев шестерён.....	66
3.3 Влияние схемы осадки на обеспечение качества поверхности зубчатого венца.....	69
Выводы по разделу.....	88

4 Практическая реализация	90
4.1 Апробация припуска выпуклой формы под холодную калибровку зубчатых венцов шестерён повышенной точности в производственных условиях	90
Выводы по разделу.....	95
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	96
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ.....	98
ПРИЛОЖЕНИЕ	112

ВВЕДЕНИЕ

Повышение мощности и грузоподъёмности грузовых автомобилей вызвало острую необходимость создания и производства ведущих мостов, способных выдерживать повышенный крутящий момент. Основной проблемой является ограничение возможного увеличения массы и габаритов ведущих мостов. Таким образом, задача по увеличению крутящего момента передаваемого ведущим мостом сводится к задаче совершенствования шестерён и сателлитов входящих в состав дифференциала, направленного на повышение механических характеристик.

Наиболее перспективным способом повышения механических характеристик шестерён является получение зубьев шестерён пластической деформацией без снятия слоя металла.

Производство зубчатых шестерён автомобилей с отштампованным профилем зубьев без последующей обработки резанием на сегодняшний день актуально и перспективно, т.к. позволяет достичь следующих преимуществ: повышение долговечности зубчатых шестерён при эксплуатации; снижение трудоёмкости и материалоемкости производства.

В настоящее время отечественная промышленность не обладает технологией производства конических зубчатых шестерён без применения механической обработки зубьев. Отсутствуют научно обоснованные методы проектирования технологических процессов и штампового инструмента для производства зубчатых шестерён методом пластической деформации с зубчатым венцом, не требующего последующей механической обработки. В связи этим актуальной является разработка процесса получения профиля зуба без последующей обработки резанием методом прецизионной калибровки. Это позволит обеспечить точность геометрических размеров отштампованных зубьев, а также повышение максимального крутящего момента, передаваемого дифференциалом, без увеличения его размеров и массы. Работа основывается на исследованиях и достижениях в области повышения точности и эффективности

технологических процессов объёмной штамповки: В.Г.Шибакова, Ф.И.Антонюк, А.Т.Крук, Е.Н.Ланского, А.В.Сафонова, В.Л.Колмогорова, В.Ю.Лавриненко.

Цель диссертационной работы – повышение эксплуатационных свойств и размерной точности зубчатых венцов конических колёс без механической обработки, полученных прецизионной штамповкой.

Объект исследования – технологический процесс прецизионной штамповки зубьев конических шестерён.

Предмет исследования – закономерности формирования размерной точности и эксплуатационных свойств зубьев конических шестерён, получаемых в процессе прецизионной штамповки (горячая объёмная штамповка и последующая холодная калибровка повышенной точности).

Для достижения цели поставлены следующие **задачи**:

1. Разработать комбинированный процесс прецизионной штамповки (горячая объёмная штамповка и последующая холодная калибровка повышенной точности) зубчатых венцов без механической обработки.

2. Установить закономерности формирования точности и повышенных эксплуатационных свойств зубчатых венцов конических шестерён, получаемых прецизионной штамповкой (горячая объёмная штамповка и последующая холодная калибровка).

3. Апробировать разработанные и научно обоснованные технические решения в производственных условиях.

Научная новизна работы состоит в следующем:

- научно обоснован новый процесс получения зубчатых венцов конических передач, обеспечивающий требуемую точность (кавалитет IT7) и упрочнение рабочих поверхностей изделия, состоящий из горячей объёмной штамповки и последующей холодной калибровки повышенной точности;

- установлены новые параметры обеспечения рационального напряжённо-деформированного состояния при холодной калибровке выпуклой конфигурации припуска;

- определён рациональный диапазон высоты припуска выпуклой формы под холодную калибровку зубчатого венца в зависимости от условий контактного трения.

Методы исследований.

Все исследования осуществлялись на основе системного подхода. Исследование особенностей формоизменения, напряжённого и деформированного состояния произведено методом конечных элементов в программе QForm с использованием многофакторного эксперимента. Исследование макро- и микроструктуры зубьев шестерён, полученных при опытной штамповке, и стендовые испытания проведены в лаборатории на аттестованном оборудовании.

Практическая значимость.

Разработан комбинированный процесс прецизионной штамповки, состоящий из горячей объёмной штамповки и последующей холодной калибровки повышенной точности, обеспечивающий требуемую точность (кавалитет IT7) зубчатых венцов конических передач с модулем до 8,5.

Результаты диссертационной работы апробированы на Кузнечном заводе ПАО «КАМАЗ» (Протокол исследования № 17-17300-20149-2020 от 21.05.20г. по результатам испытаний межколёсных дифференциалов мод. 6520, укомплектованных сателлитами и шестернями, изготовленных их сталей 18ХГР и 25Х5М, методом прецизионной штамповки). По результатам стендовых испытаний, проведённых в соответствии с ГОСТ Р 53445-2009, показано повышение долговечности межколёсного дифференциала в 2,5 раза по сравнению с зубьями шестерён, полученными обработкой резанием.

Положения, выносимые на защиту:

- научно обоснованный процесс прецизионной штамповки зубчатых венцов конических передач, состоящий из горячей объёмной штамповки и последующей холодной калибровки повышенной точности, обеспечивающий высокую производительность процесса, стойкость штамповой оснастки при получении поковки, а также позволяющий достичь необходимую точность и

повышенные механические характеристики отштампованного зубчатого венца конических передач;

- параметры (радиус и высота выпуклого припуска, температура заготовки перед деформацией), обеспечивающие рациональное напряжённо-деформированное состояние при холодной калибровке выпуклой конфигурации припуска в области пятна контакта зубьев и снижающие вероятность возникновения микроразрушений подповерхностных слоёв металла;

- рациональный диапазон высоты припуска выпуклой формы под холодную калибровку зубчатого венца в зависимости от условий контактного трения.

Соответствие диссертации паспорту научной специальности. Основные результаты диссертационной работы соответствуют направлению исследования паспорта научной специальности 2.5.7 – «Технологии и машины обработки давлением», а именно пункту 3 - методы деформирования, формирующие в материалах структуру с комплексом физико-механических свойств, обеспечивающих повышение возможностей пластического формообразования заготовок и последующей эксплуатации изделий.

Личный вклад автора в диссертационную работу заключается в выполнении теоретических и экспериментальных исследований, включая имитационное моделирование процессов горячей объёмной штамповки и холодной калибровки, разработку технологического процесса прецизионной штамповки и его реализацию в производстве, лабораторные исследования макро- и микроструктуры полученных образцов, в анализе и обобщении полученных данных.

Апробация работы. Основные положения и результаты, полученные в работе, опубликованы в статьях, доложены и обсуждены на заседаниях кафедры «Машиностроение» в 2017-2021г.г., а также всероссийской научно-практической конференции «Камские чтения» (г.Набережные Челны, 2017г), международной научно-технической конференции «Инновационные машиностроительные технологии, оборудование и материалы» (г.Казань, 2017, 2018, 2019г.),

международной научно-практической конференции «Междисциплинарность научных исследований как фактор инновационного развития» (г.Магнитогорск, 2020г), Международной научно-практической конференции «Научные революции как ключевой фактор развития науки и техники» (г.Тюмень, 2021г).

Структура и объем диссертации: диссертационная работа состоит из введения, четырёх разделов, заключения, библиографического списка, включающего 114 наименований. Работа изложена на 132 страницах машинописного текста, содержит 55 рисунков, 15 таблиц.

Публикации: по теме диссертации опубликовано 14 печатных работ, в том числе 3 статьи в изданиях, рекомендованных ВАК, 4 статьи SCOPUS, 1 статья Web of Science, а также 6 статей в материалах международных, всероссийских и республиканских конференций.

1 Анализ технологических возможностей формообразования объёмной штамповкой зубчатых шестерён с зубчатым венцом

Современные тенденции развития машиностроения направлены на увеличение эффективности процессов изготовления деталей машин и механизмов. Одним из способов повышения ресурсоэффективности является полное или частичное исключение окончательной механической обработки за счёт применения прецизионной штамповки. По сравнению с механической обработкой указанный вид изготовления позволяет обеспечить экономию металла, энергии, трудозатрат, а также аналогичную точность размеров и существенное повышение эксплуатационных свойств изделия [1,2].

Ряд механических характеристик сталей и сплавов: ударная вязкость, пластичность, сопротивление разрушению, а соответственно и эксплуатационные свойства деталей существенно зависят от волокнистой структуры, которая формируется в результате пластического деформирования при штамповке деталей [3]. Как правило, указанные свойства выше в направлении вдоль волокон, что особенно важно для деталей, работающих при высоких статических и динамических нагрузках (рычаги, зубчатые шестерни, валы, оси и т.п.). Поэтому при изготовлении таких деталей штамповкой необходимо стремиться к тому, чтобы при чистовой обработке поковки волокна в ней не перерезались. При снятии слоя металла с поверхности зубьев, происходит подрезание волокон металла и происходит снижение механических свойств шестерён, и, следовательно, снижение максимально возможного передаваемого момента зубчатой передачи. Поиски новых технологических приёмов проводятся главным образом в направлении использования методов пластического формообразования. Достижению указанной цели, а также снижению ресурсоёмкости производства деталей ответственного назначения, способствует применение после горячей объёмной штамповки холодной калибровки поковок. Калибровка обеспечивает не только сохранение сформированной объёмной штамповкой волокнистой структуры, но и даёт возможность получения точных размеров и форм поковок.

При применении пластического формообразования требуемая форма и размеры детали формируются не за счёт удаления слоя металла с заготовки, а путём его перераспределения, что существенно повышает эффективность технологии. Кроме того, при пластическом формообразовании металл упрочняется, вследствие образования благоприятной макро- и микроструктуры [4]. На изделии образуется поверхностный упрочнённый слой, имеющий повышенные механические характеристики (предел прочности, предел текучести, твёрдость). В случае если деформация происходит при температуре ниже температуры рекристаллизации, происходит упрочнение металла – наклёп. В результате деформации во внешних слоях детали создаются сжимающие напряжения, весьма благоприятные при работе в условиях изгиба, истирания и повышенных нагрузок. На изделиях также нет полос и других следов инструмента, которые являются концентраторами напряжений и причиной снижения прочности.

1.1 Способы получения зубчатого венца шестерён с предварительной штамповкой

При типовой технологии производства конических шестерён, подразумевающей механическую обработку зубчатого венца, наиболее трудоёмкой является операция нарезки зубьев, сопровождаемая значительными (50 - 70%) потерями материала в стружку и высокой трудоёмкостью зуборезных операций, составляющей 15 - 20% от общего объёма работы. Применение кривошипных горячештамповочных прессов может исключить этот непроизводительный процесс, заменив зуборезной инструмент штампами и освободив механообрабатывающие цеха от зуборезных станков. Штамповка позволяет получить точные поковки с формообразованием зубьев. С готовым профилем зуба штампуют конические шестерни с прямым, косым и спиральными зубьями с модулем 4 - 8 мм. Конические шестерни, работающие в тихоходных

передачах 9- и 10-й степени точности, штампуют с окончательно оформленной поверхностью зуба с горячей калибровкой после штамповки, а шестерни 6-й и 7-й степени точности — с припуском по профилю зуба под чистовую механическую обработку.

При штамповке шестерён с оформленным зубом под последующую чистовую обработку, припуски на все размеры поковки, кроме зуба, назначают по ГОСТ 7505-89. Плоскость разъёма устанавливают по наибольшему диаметру с обязательным расположением контура зуба в одной половине штампа. Припуск по профилю зуба назначают до 0,1 мм, припуск по вершине зуба - в пределах 0,8 - 1,5 мм, увеличение высоты ножки зуба относительно ножки зуба детали до 0,15 мм, расстояние от перемычки между зубьями до зуба – в пределах 1,2 - 1,5 мм, толщина перемычки от 2 до 4 мм. Наиболее часто штамповкой изготавливают конические прямозубые шестерни с модулем 5 мм и выше и углом при вершине делительного конуса 40—90°. На рисунке 1 представлен применяемый на Минском заводе шестерён (МЗШ) трехручьевого штамп для штамповки поковки конической шестерни с выступающей ступицей полуоси автомобиля МАЗ-200 с 22 зубьями с готовым профилем зуба. Шестерни штампуют по следующей технологии: заготовку нарезают из стали марки 12ХНЗА диаметром 80 и длиной 180 мм на пресс-ножницах, нагревают её в индукционных нагревателях КИН-18, штампуют на КГШП усилием 25 МН за три перехода, обрезают облой и пробивают перемычку на обрезном прессе.

Масса заготовки 7,2 кг, масса поковки 6 кг. Слева на штампе располагают заготовительный ручей для осадки, справа - черновой, в центре - чистовой. Нижние вставки чернового и чистового ручьёв - сборные, они состоят из собственно вставки и зубчатого вкладыша, который запрессован во вставку в горячем состоянии. Поковки шестерни полуоси имеют припуск на механическую обработку зуба по эвольвенте 0,8 мм. Переход на штамповку шестерён с зубчатым венцом даёт возможность исключить операцию черновой нарезки зуба и сверления отверстия в ступице.

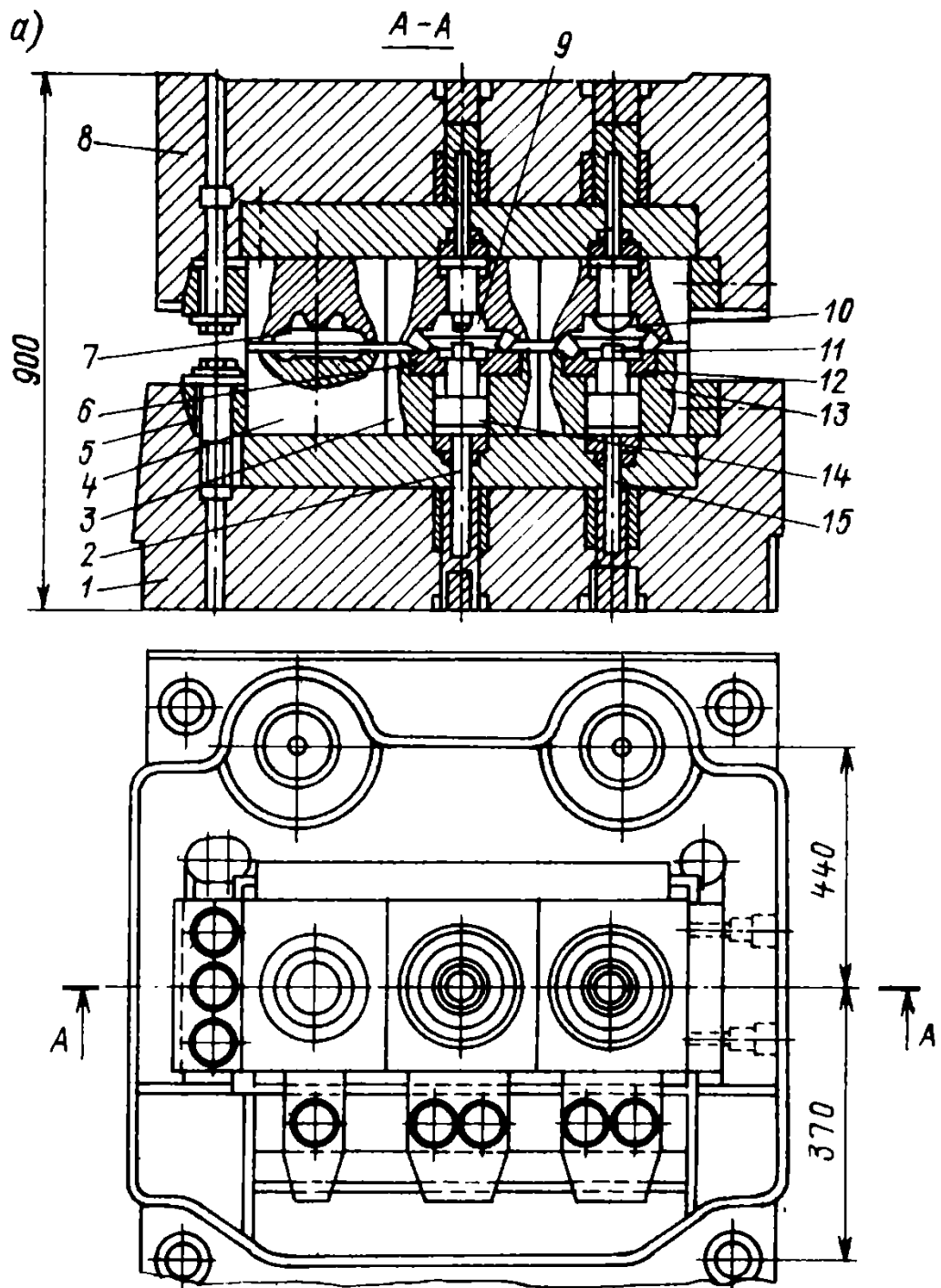


Рисунок 1 - Штамп для штамповки поковки шестерни с зубом

1, 8 - нижняя и верхняя плиты; 2, 15 - толкатели; 3, 4, 13 - нижние вставки; 5 - прижимная планка; 6, 12 - вкладыши чистового и чернового ручьёв; 7, 9, 10 - заготовительный для осадки, черновой и чистовой ручьи; 11, 14 - выталкиватели чернового и чистового ручьёв

В штампе аналогичной конструкции штампуют и сателлит трактора «Беларусь» на КГШП усилием 16 МН за три перехода: осадка, предварительная

штамповка с оформленными зубьями и окончательная штамповка. Первый ручей (плоская осадка) рас положен слева, со стороны нагревательного устройства, окончательный ручей — в центре штампа, а предварительный штамповочный ручей — справа от штампа. Крепёжные обоймы зубчатых вкладышей сделаны сборными с водоохлаждающим каналом для зубчатых вкладышей. Перевод изготовления шестерён и сателлитов с обычной технологии на штамповку с готовым профилем зуба позволил увеличить коэффициент использования материала с 0,33 - 0,46 до 0,53 - 0,69 и уменьшить отходы материала в стружку на 25 - 45% [5,6].

Новые металлосберегающие технологии точной горячей штамповки конических шестерён с формообразованием зубьев с припуском под последующее чистовое нарезание зубьев разработаны и внедрены на ЗИЛе. По новой технологии штампуют четыре наименования шестерён диаметром от 79 до 229 мм с прямыми и криволинейными зубьями. Поковки конических шестерён штампуют на КГШП усилием 16, 25 и 40 МН. Мерные заготовки нарезают из горячекатаного проката на универсальных пресс-ножницах и нагревают в индукционных нагревателях. Два наименования поковок шестерён полуоси массой 1,73 и 3,17 кг штампуют за три перехода, а поковку сателлита и ведомой шестерни массой 0,695 и 8,300 кг - за два перехода.

По новой технологии поковки ведомых конических шестерён ($z = 25$; $m = 9$ мм; $\rho = 35^\circ$, $a = 20^\circ$, $b = 38$ мм, $h = 16,99$ мм) с профилем зуба штампуют из мерных заготовок диаметром 100 мм в двухручьевом штампе на КГШП усилием 40 МН. В первом ручье заготовку осаживают до диаметра, близкого к диаметру поковки, и одновременно очищают от окалины, а во втором — окончательно штампуют с формообразованием зубьев. Масса детали 5 кг, масса поковки 8,3 кг, норма расхода материала 9,468 кг, наружный диаметр 229 мм. Припуск по профилю зуба составляет 1,3 мм на сторону и 1,0 мм по дну впадины. Обрезают облой и пробивают перемычку в комбинированном обрезном штампе на обрезных прессах. Производительность штамповки 85 шт./ч. Чтобы повысить стойкость режущего инструмента при черновой и чистовой механической обработке

штампованных зубьев требуется тщательная очистка поковки от окалины, например, дробью диаметром 1,2 - 1,8 мм.

Зубчатые вкладыши для штамповки ведомых шестерён изготавливают из стали 4ХМФС на электроимпульсных станках с последующей слесарной зачисткой со снятием до 0,1 - 0,2 мм припуска, благодаря чему достигается шероховатость поверхности $R_a = 1,25$ мкм. Перед штамповкой вкладыши подогревают газовыми горелками до температуры более 100 °С. Чтобы повысить стойкость зубчатых вкладышей, их подвергают двухступенчатому азотированию на глубину 0,15 - 0,20 мм (до твёрдости HRC > 57), благодаря чему их стойкость повышается до 2700 поковок.

Освоена точная штамповка конических шестерён (с длинным хвостовиком) со штампованными зубьями также и на горизонтально-ковочных машинах. На рисунке 2 приведён штамп для изготовления поковки валика с конической шестерней для трактора, имеющей число зубьев $z = 16$, модуль: по большому основанию $m = 7$ мм и угол зацепления $\alpha = 14^\circ 30'$.

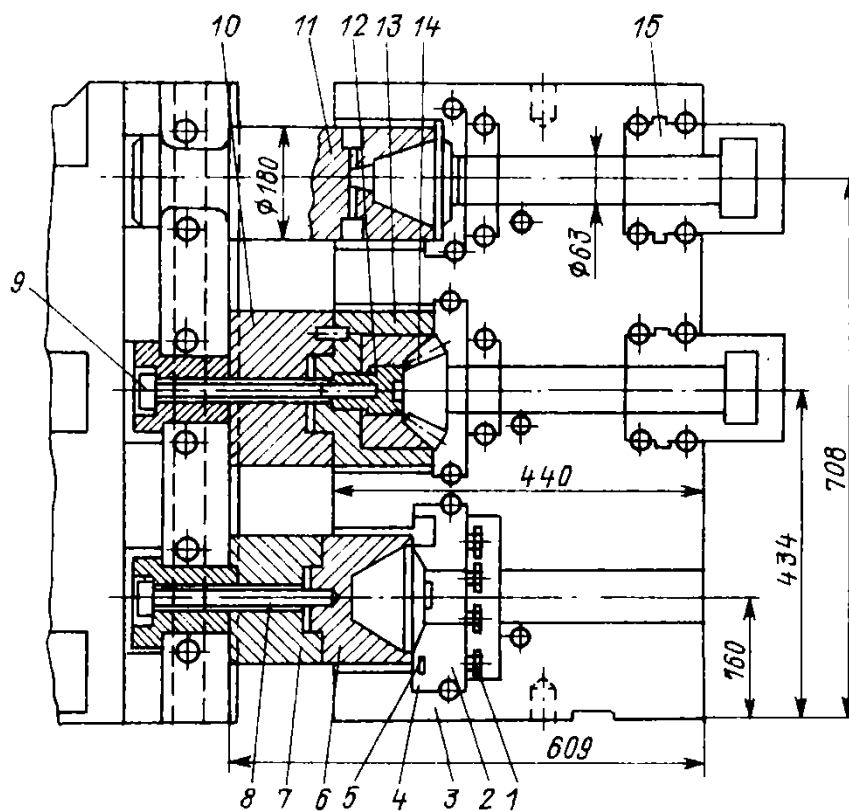


Рисунок 2 - Штамп для точной штамповки конической шестерни со штампованным зубом и длинным хвостовиком

Технология штамповки состоит из следующих операций: резка проката диаметром 65 мм на мерные заготовки длиной 566 мм, нагрев заготовки до ковочной температуры, штамповка - высадка в трехручьевом штампе (наборном, чистовом и обрезном) на горизонтально-ковочной машине усилием 10 МН, очистка поковки травлением и механическая обработка. На ГКМ не применяют черновые ручьи для формообразования зубьев, так как заготовку при перекладке её из чернового ручья в чистовой затруднительно точно зафиксировать, что приводит к несовпадению выступов ручья с впадинами зубчатого венца шестерни. Штамповку осуществляют следующим образом. Заготовку фиксируют по заднему упору 15. Вставка 14 (для штамповки зубьев) запрессована в горячем состоянии в обойму 13; в осевом отверстии вставки 14 также на горячей посадке укреплен хвостовик 12, который крепится в пуансоне 10 винтом 9. Вставка б обрезного ручья соединена с пуансоном 7 винтом 8. Обрезная вставка 4 закреплена в матрице 3 винтами и имеет кольцевую выточку, где размещается съёмник для удаления облоя, состоящий из сбрасывателя 5, пружин 2 и винтов 1. Зубчатую вставку ручья штампа штампуют в мастер-штампе на КГШП. Отштампованные шестерни с зубом имеют небольшие припуски на последующую механическую обработку и отличаются повышенной прочностью. После травления шестерни подвергаются фрезерованию торцов, черновой и чистовой токарной обработке, чистовой строжке зубьев. Технология штамповки на ГКМ шестерён с зубьями даёт значительную экономию материала и удешевляет себестоимость готовых шестерён.

Патент для получения конических зубчатых шестерён [7] предполагает следующую последовательность операций (рисунок 3):

- разогретую до температурыковки заготовку с головкой за стержень 1 зажимают двумя полуматрицами 2 и 3;
- при движении пуансонодержателя и пуансона 4 вправо головка 5 заготовки вступает в контакт с пуансоном, пластически деформируется и приобретает форму зубчатого венца шестерни.

Расположение рабочих органов кузнечно-прессовой машины может быть как горизонтальным, так и вертикальным.

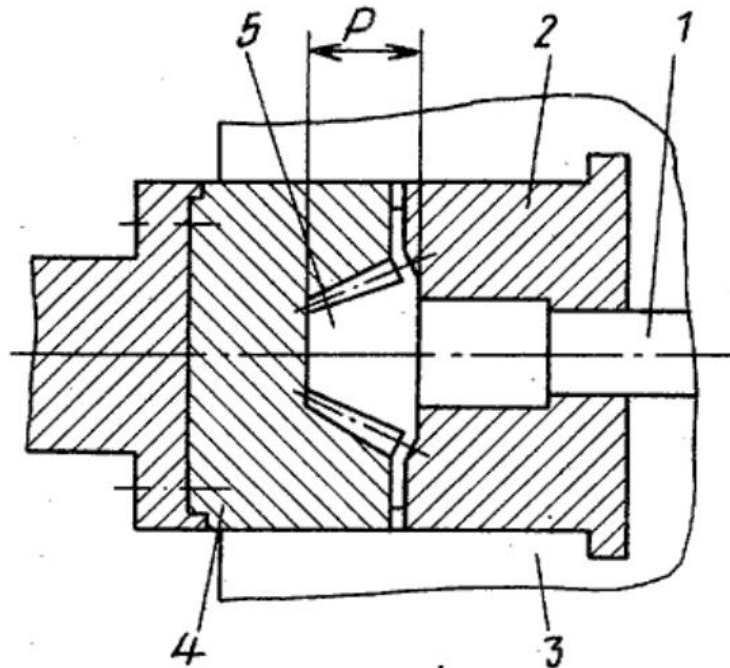


Рисунок 3 - Схема получения поковки

При этом формообразование зубьев 6 производят на 0,88...0,92 полной их длины. Границы зубьев конической шестерни характеризует пунктирная линия 7 (рисунок 4). При последующей механической обработке, удаляемая со стороны внешнего торца часть облоя 8, будет значительно меньше по размерам и массе, чем в известных решениях. Кроме того, оставшаяся во впадинах зубьев, часть перемычки исключает возможность возникновения прерывистого резания и обеспечивается технологичность механической обработки.

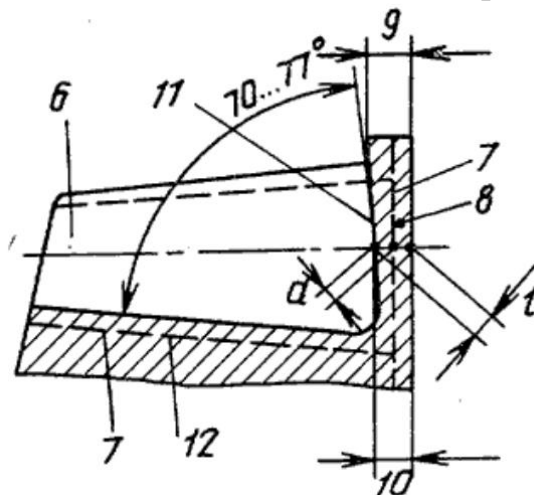


Рисунок 4 – Часть поковки в зоне зуба

Длина зубьев технически обоснована и подтверждена при изготовлении опытной партии. Если длина формообразованных зубьев заготовок будет выбрана более 0,92 длины зуба детали, то возникает опасность образования прерывистого резания при токарной обработке перемычки. Когда длина формообразованных зубьев заготовки будет менее 0,88 их длины, то возникают трудности при удалении на последующей зуборезной операции, оставшейся во впадине зуба части перемычки, толщина которой превышает допустимые для зуборезных резцов границы.

Перемычки выполняют переменной толщины по высоте зубьев, причем толщина перемычки на вершине зуба 9 больше, чем во впадине 10. Внутреннюю поверхность 11 перемычки выполняют под углом наклона $70...77^\circ$ к образующей конуса впадины 12. Такая форма перемычки обеспечивает оптимальные условия резания при удалении её из впадины зубьев. Увеличение угла наклона внутренней поверхности перемычки свыше 77° значительно ухудшает условия резания зуборезных резцов, так как в этом случае в резание первой вступает вершина резца, являющейся наиболее слабым звеном зуборезного инструмента. Если угол наклона внутренней поверхности перемычки будет менее 70° , то значительно снизится стойкость зубчатой фигуры пуансона 4.

Опробование изобретения осуществлялось в условиях массового производства, при изготовлении опытной партии ведущих конических шестерён. Параметры отштампованных зубьев, длина отштампованных зубьев 31,5 мм, толщина перемычки в середине высоты отштампованных зубьев $l = 3,5$ мм, толщина перемычки, расположенной в пределах зуба $a = 1,5$ мм, угол наклона внутренней поверхности перемычки к образующей конуса впадин 73° .

Известен способ изготовления конических зубчатых шестерён, сущность которого заключается в горячей штамповке зубчатого венца поковки, обрезке облоя и пробивке отверстия [8]. Но этим нельзя достичь размерной стойкости зубчатой матрицы, точности зубчатого венца поковки, точности совмещения осей зубчатого венца и отверстия.

Предлагаемый способ изготовления конических зубчатых шестерён реализуют следующим образом. Нагретую заготовку штампуют в штампе для облойного горячего деформирования. В первом ручье оформляют зубья высотой до $2/3$ высоты зубьев готовой шестерни. При этом получают форму профиля основания зуба R I, соответствующую вершине зуба матрицы второго ручья R II в зонах контакта этой матрицы с заготовкой перед деформированием, а головке зуба придают форму S I, соответствующую впадине матрицы второго ручья S II в момент касания этой формы в конце деформирования заготовки во втором ручье (рисунок 5а и 5б). Поковку удаляют из штампа, выдерживают 3 - 8с. добиваясь разогрева зубьев до температуры основного материала заготовки, и помещают во второй ручей. Во втором ручье производят оформление зубьев высотой, на $1/5 - 1/2$ превышающей высоту готовой шестерни. При этом вершинам зубьев придают форму S II, соответствующую форме впадин зубьев матрицы окончательного зубоформирования в момент касания этих вершин впадин матрицы окончательного зубоформирующего ручья перед деформированием, а основанию впадин зубьев придают форму RII, соответствующую форме вершин зубьев матрицы для окончательного деформирования в момент касания этими впадинами вершин зубьев матрицы в конце деформирования при окончательном зубоформировании (рисунок 5в и 5г). Окончательную штамповку, обрезку облоя и пробивку отверстия производят в совмещённом штампе, в котором рабочие инструменты расположены так, что обеспечивают последовательное выполнение действий: обрезку облоя. пробивку отверстия, окончательное деформирование зубчатого венца на оправке путём последовательной осадки зубьев от головки к ножке. При этом обрезающая матрица имеет режущую кромку по форме зубчатого венца с конусной поверхностью, образующей с конусной поверхностью облоя впадин зубьев поковки в исходном положении угол $5-20^\circ$. Оправкой служит прошивной пуансон, установленный на нижней плите штампа.

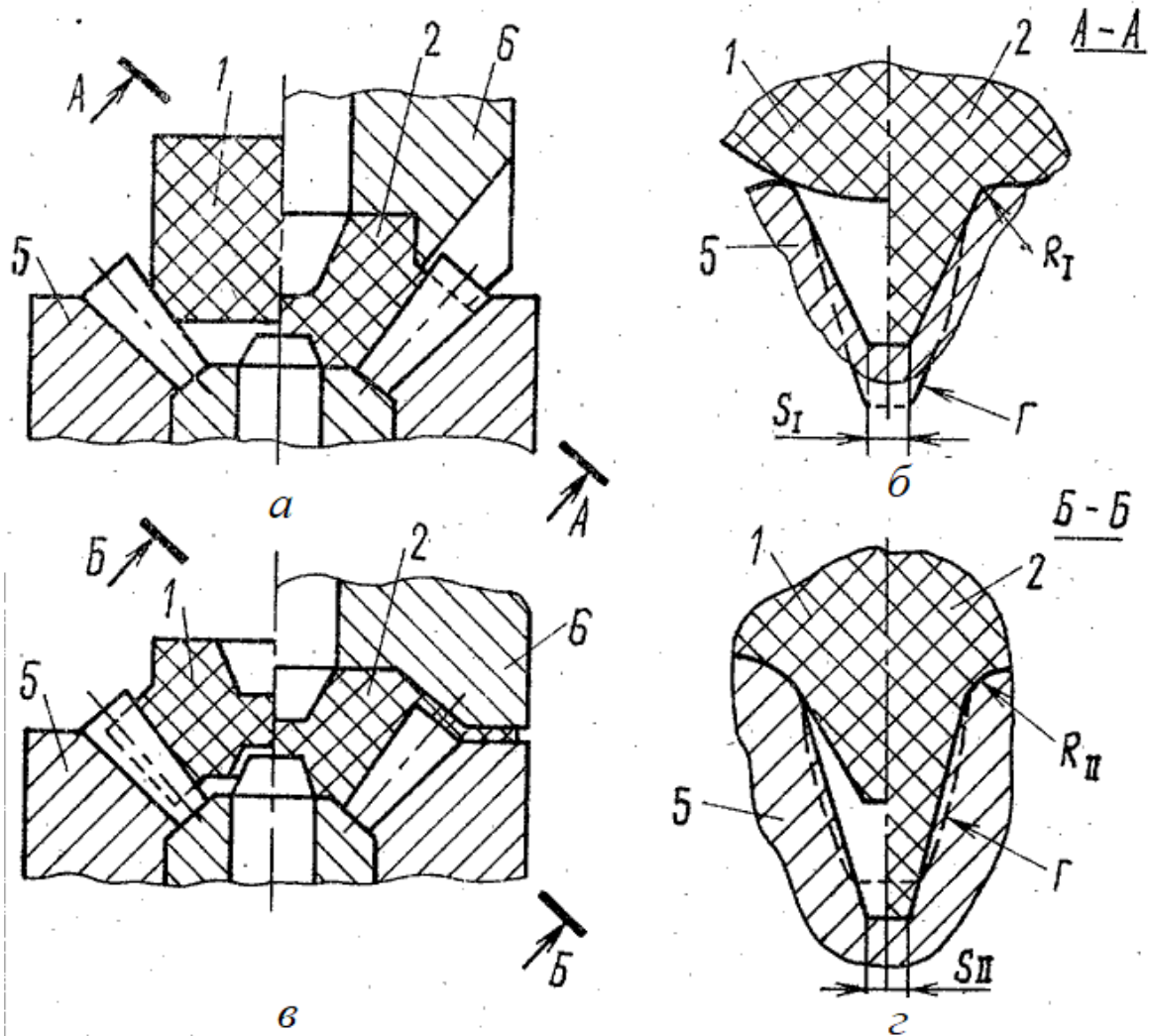


Рисунок 5 – Схемы формирования зубьев

- а) схема оформления зубьев шестерни высотой до $2/3$ высоты зубьев готовой шестерни; б) разрез А-А для схемы а);
 в) схема оформления зубьев высотой, на $1/5 - 1/2$ превышающей высоту зубьев готовой шестерни; г) разрез Б-Б для схемы в).

Конструкция штампа (рисунок 6) включает зубоформирующую матрицу 5 и прошивной пуансон 7, установленные соосно на нижней плите 12, обрезающую матрицу 8 с режущей кромкой по форме зубчатого венца, установленную с возможностью перемещения в осевом направлении под действием пружин 13, деформирующий пуансон 6, установленный на верхней плите 14. Штамп работает следующим образом. Заготовка 10 укладывается в обрезающую матрицу 8. Под действием деформирующего пуансона 6 пружины сжимаются, и обрезающая матрица базируется на матрице 5. Конусные выступы обрезающей матрицы надрезают облой

у основания впадин зубьев поковки и срезают его последовательно от ножки к головке зуба по контуру зубчатого венца. Затем поковка перемещается деформирующим пуансоном 6 до соприкосновения с прошивным пуансоном 7 и производится прошивка отверстия.

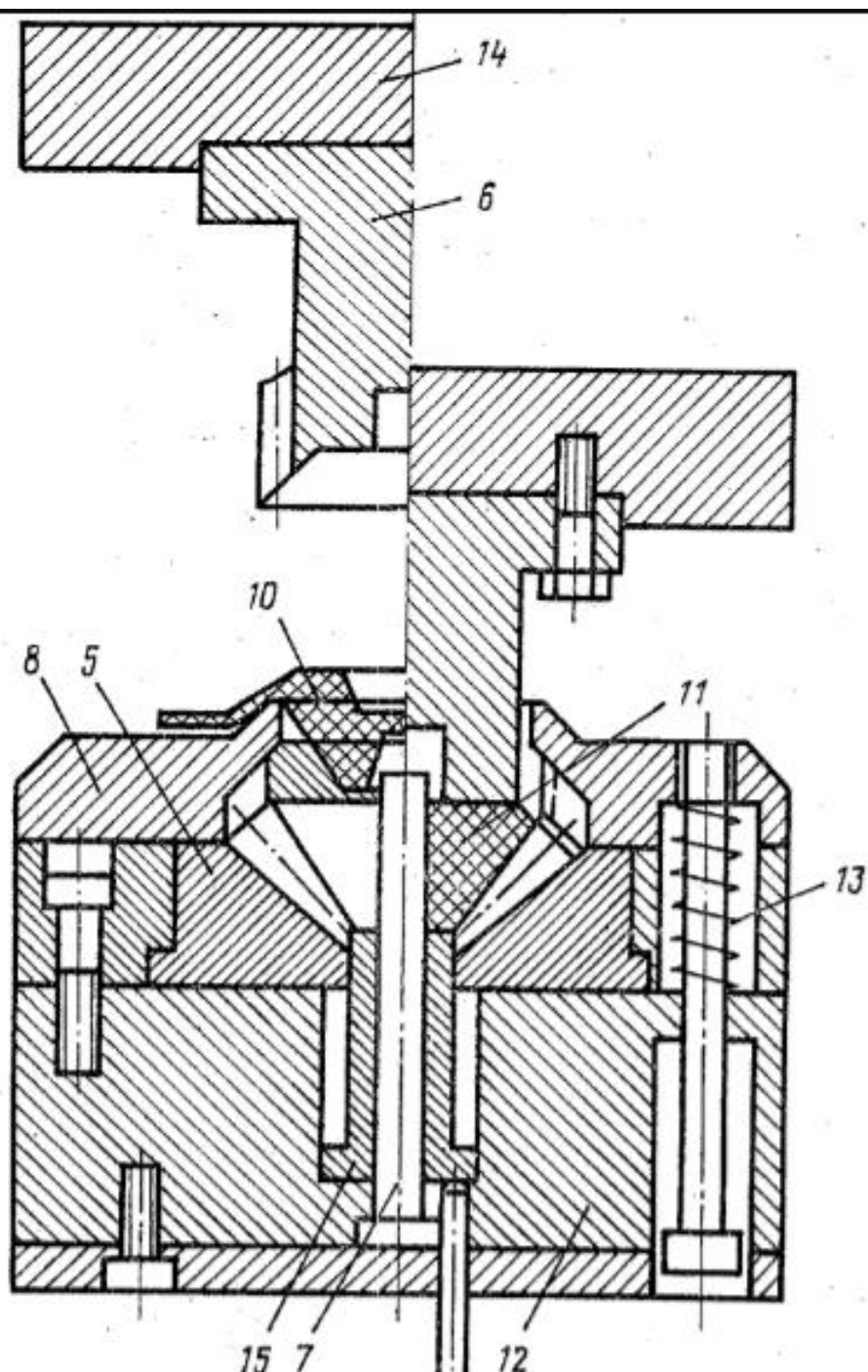


Рисунок 6 – Конструкция штампа совмещённого действия

При дальнейшем движении пуансона 6 поковка перемещается на пуансоне 7 в зубоформирующую матрицу 5 для окончательного деформирования, где она базируется по конусной поверхности вершин зубьев. Далее зубья поковки

осаживаются, причём деформирование происходит последовательно от головки к ножке зуба. При обратном ходе штампа поковка выталкивается выталкивателем 15 и удаляется из штампа в пространство, образовавшееся между деформирующей и обрезной матрицами.

Во всех описанных выше методах получения зубчатых шестерён формообразование зубьев производится за счёт пластической деформации и волокна преимущественно располагаются по контуру зуба, однако все указанные методы не позволяют исключить окончательную чистовую механическую обработку зубчатого венца.

1.2 Способы получения зубчатого венца шестерён пластическим деформированием

На сегодняшний день существует несколько способов получения зубьев шестерён без применения механической обработки. Самыми известными среди базирующихся на пластическом деформировании являются накатка зубьев, калибровка зубьев шестерней раздачей коническим пуансоном и высокоточная объёмная штамповка методом ортогональной экструзии в закрытых штампах.

1.2.1 Накатка зубьев

Накатка зубьев - метод формирования зубьев зубчатых шестерён пластическим деформированием специальным инструментом при взаимном обкатывании его с заготовкой.

Методом накатки получают: шестерни цилиндрические с прямым, косым и шевронным зубом; валы-шестерни; зубчатые шестерни конические с прямым и спиральным зубом; червячные шестерни; звёздочки цепных передач. Размеры: модуль от 0,3 до 12 мм, диаметр до 600 мм. Накатывание производится в холодную при t от 0,3 до 2,0 мм; с нагревом до $T = 12^{\circ}\text{C}$; с комбинацией горячей

и холодной деформации для калибровки и отделки. Механические свойства накатанных зубчатых шестерён выше, чем у полученных методом механической обработки примерно на 20 - 40% из-за расположения волокон, огибающего профиль зуба.

Известен метод накатывания зубьев конических шестерён, основанный на последовательном местном деформировании зубонакатным инструментом материала, нагретого с помощью токов высокой частоты. Данный процесс горячего накатывания исключает предварительное нарезание зубьев конических шестерён. При способе получения зубьев крупномодульных зубчатых шестерён непосредственно из штампованной заготовки прокатка осуществляется в две операции: первая - обкатка штампованной заготовки в гладких валках с целью получения необходимых размеров по диаметру и ширине кольца, вторая - прокатка обкатанной заготовки в зубчатых валках для получения зубьев. Процесс на прокатки стане заменяет две операции механической обработки: обточку поковки по наружному диаметру и торцам и предварительное фрезерование зубьев. Колебание длины прокатанных шестерён составляет 0,3 - 0,5 мм; в дальнейшем они подвергаются чистовому фрезерованию зубьев. Припуск под чистовое фрезерование зубьев даётся 0,8 - 1,2 мм на сторону зуба [9,10].

Необходимость чистовой механической обработки объясняется невысоким качеством поверхности зубьев. При зубонакатке образуются следующие дефекты рабочей поверхности накатанных зубчатых шестерён: закаты, плены, заварки, окалина (рисунок 7), вмятины на профиле и вершине зуба.

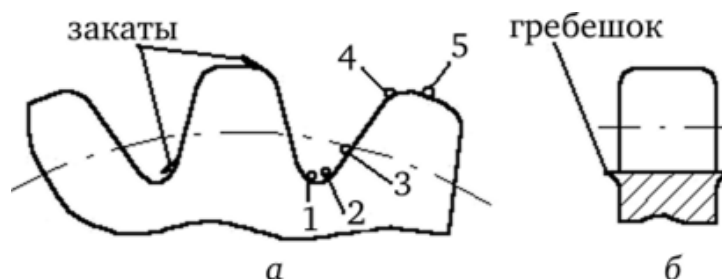


Рисунок 7 - Дефекты при накатке зуба

а - схема расположения закатов 1 - во впадине; 2 - подрезка ножки; 3 - на ножке; 4 - на головке; 5 - на вершине; б - выдавливание гребешков

Неравномерное оформление зуба объясняется тем, что задний профиль зуба изделия формируется передним профилем зуба вала в период перемещения последнего в тело заготовки. Силы трения в зоне контакта удерживают течение материала в головку зуба. И наоборот, передний профиль зуба формируется задним профилем вала; силы трения увлекают материал в головку зуба.

Недостатком описанного метода является тот факт, что исключается только предварительная механическая обработка зубьев и необходимо подвергать зубья чистовой механической обработке, что снижает механические свойства зубчатого венца и повышает трудоёмкость изготовления шестерней.

1.2.2 Калибровка зубьев шестерни раздачей коническим пуансоном

Известен метод изготовления зубчатых шестерён с разделением операций предварительного и окончательного формообразования. Для окончательного формирования зубьев проводят операцию калибровки коническим пуансоном в холодном состоянии [11,12]. Заготовкой под калибровку может служить поковка с не полностью оформленными зубьями, полученная горячей, холодной или полугорячей штамповкой или же из металлических порошков после прессования и спекания.

В рассматриваемой технологии операция калибровки реализуется по схеме деформации зубьев с радиальным течением материала, осуществляемым под действием конического пуансона, который раздаёт центральное отверстие в шестерне и заставляет течь материал в радиальном направлении. На рисунке 8 приведена схема калибровки зубьев с радиальным течением материала. Достоинством описанного метода является возможность получения чистовой шероховатости зубчатого венца без механической обработки - 8-9 степень точности параметров зубчатой шестерни и шероховатость $R_a=0,32$.

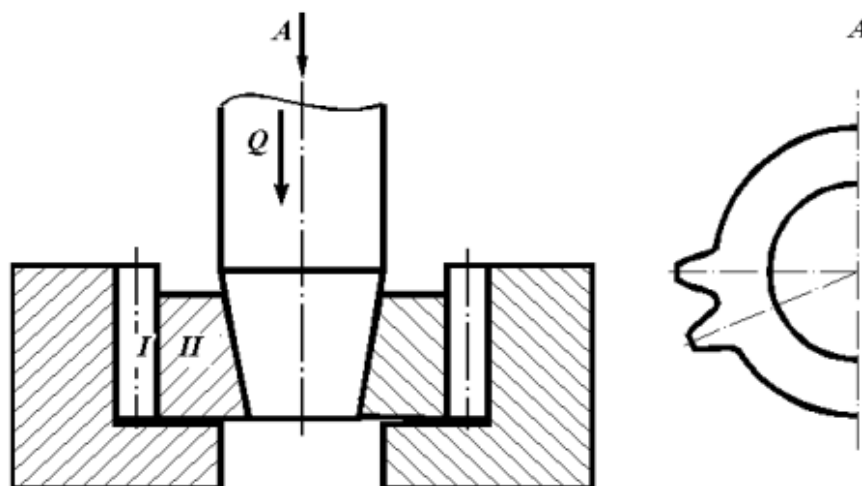


Рисунок 8 - Схема калибровки зубьев шестерни с радиальным течением материала

Недостатком этого способа является то, что его применение возможно только для очень ограниченных типоразмеров шестерён. Это связано с тем, что деформировать зубья можно только при определённом соотношении диаметра раздаваемого отверстия и диаметра вершин зубьев шестерни. Получение конических зубчатых шестерён этим методом нетехнологично.

1.2.3 Высокоточная объёмная штамповка методом ортогональной экструзии в закрытых штампах

Технология предусматривает использование объёмной штамповочной матрицы, которая придаёт детали необходимую конфигурацию за один технологический цикл [13,14]. Штамповка в закрытых штампах предусматривает использование верхнего и нижнего пуансонов для выдавливания материала в предварительно закрытую матрицу для заполнения её рабочего пространства. Схема процесса приведена на рисунке 9.

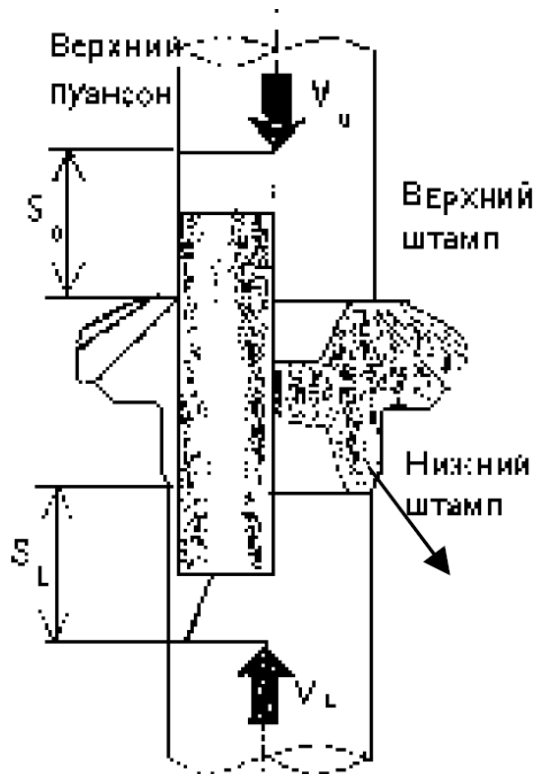


Рисунок 9 - Схема высокоточной объёмной штамповки методом ортогональной экструзии в закрытых штампах

Штамповка производится на гидропрессе с верхним и нижним ползуном. Достоинства: возможность получения изделий сложной формы, в том числе конических шестерён; относительно высокая точность получаемых изделий. Недостатки: окончательное формирование зубчатого венца производится в горячем виде, вследствие чего снижается качество получаемой поверхности зубьев и исключается эффект наклёпа, что отрицательно влияет на механические свойства шестерён.

Во всех описанных выше методах получения зубчатых шестерён формообразование зубьев производится за счёт пластической деформации, однако каждый из этих методов имеет технологические особенности, не позволяющие применять их для получения конических зубчатых шестерён дифференциала моста.

1.3 Элементы системного анализа при выборе рациональных технологических схем

Первичным звеном создания материальных ценностей производственного процесса является технологический процесс, который включает в себя основные производственные операции, оборудование, оснастку, инструмент, необходимые для производства изделий.

В соответствии с [15,16,17,18] при анализе процесса изготовления шестерён с зубом с точки зрения точности целесообразно применение системного подхода, когда объёмная штамповка рассматривается как человеко-машинная система. Основными элементами этой системы являются: М - обрабатываемый материал; З – мерная заготовка (поковка) полученная из обрабатываемого материала; О – оборудование на котором осуществляется формообразование поковки; Т – последовательность и режимы технологических воздействий на заготовку до, в течении и после её формообразования (технологический процесс - ТП); И – инструмент, необходимый для реализации ТП; С – окружающая среда; П – производственный персонал, проектирующий и реализующий техпроцесс в производственных условиях. Элементы системы {М,З,О,Т,И,П,С} содержат подмножества состоящие из дискретных или последовательных значений из некоторого допустимого диапазона их значений. Например, элемент М может быть представлен как $M \in (\{m1\}, \{m2\}, \dots \{mn\})$, где $\{m1\}$ – подмножество, характеризующее химический состав, $\{m2\}$ – подмножество характеризующее механические, технологические и другие свойства обрабатываемого материала и т.д. Аналогично могут быть представлены остальные элементы системы {М,З,О,Т,И,П,С}.

Применительно к выбору рациональных технологических схем и параметров прецизионной штамповки, обеспечивающих требуемую точность размеров поковки с учётом предлагаемого подхода и метода экспертных оценок разработана матрица значимости параметров системы {М,З,О,Т,И,П,С} (таблица

1), для возможных базовых технологических процессов объёмной штамповки: ХОШ – холодная объёмная штамповка; ТОШ – теплая объёмная штамповка; ПГОШ – полугорячая объёмная штамповка; ГОШ – горячая объёмная штамповка. Для ранжирования использованы показатели целевой важности факторов технологического процесса: 1-не важно; 2-маловажно; 3-недостаточно важно; 4-важно; 5-очень важно. Эксперты, исходя из возможности управления параметрами, подразделили их на: ▲ – управляемые превентивно (на этапе проектирования технологии); Δ - управляемые настройкой; ● – управляемые адаптивно; ○ - не управляемые. Для ранжирования использованы показатели целевой важности факторов технологического процесса: 1-не важно; 2-маловажно; 3-недостаточно важно; 4-важно; 5-очень важно. В качестве экспертов выбраны инженеры-технологи Кузнечного завода ПАО КАМАЗ имеющие опыт проектирования технологических процессов объёмной штамповки и соответствующего штампового инструмента не менее 15 лет. Оценка значимости параметров проводилась экспертами с учётом результатов работ [19,20,21]. При этом сопоставлялись различные виды объёмной штамповки: ХОШ – холодная объёмная штамповка; ТОШ – тёплая объёмная штамповка; ПГОШ – полугорячая объёмная штамповка; ГОШ – горячая объёмная штамповка.

Таблица 1- Матрица значимости параметров системы {М,З,О,Т,И,П,С} с точки зрения получаемой точности

Параметр системы МЗОТИПС	ХОШ	ТОШ (0,37-0,5Т плавления)	ПГОШ (0,5-0,7Т плавления)	ГОШ
Материал				
Химический состав материала	+▲5	+▲4	-	-
Механические свойства материала (твёрдость, прочность)	+▲○5	+▲4	+▲2	-
Усадка	-	+○3	+○4	+○5
Заготовка				
Объём исходной заготовки (поковка для ХОШ)	+○5	+▲5	+▲4	+▲4

Продолжение таблицы 1

Оборудование				
Жесткость прессы	+03	+05	+05	+05
Усилие прессы	+▲3	+▲4	+▲4	+▲4
Технологический процесс				
	Нагрев			
Вариабельность температуры нагрева перед штамповкой	-	+▲●4	+▲●4	+▲●4
Изменение температуры заготовки в процессе штамповки	-	+03	+03	+03
Окалинообразование (скорость нагрева, угар, окисление в процессе) (Для ХОШ - заштамповка окалины на калибруемых поверхностях перед ХОШ)	+05	-	+02	+02
	Штамповка			
Технологические переходы (Для ХОШ – форма припуска под калибровку)	+▲5	+▲3	+▲3	+▲3
Закрытая или открытая штамповка	+▲2	+▲2	+▲2	+▲2
Смазка (тип)	+▲3	+▲3	+▲3	+▲3
Штамповочные уклоны и радиусы	+▲2	+▲2	+▲2	+▲2
Толщина облоя	-	+▲ Δ1	+▲ Δ1	+▲ Δ1
Расположение разъема перемычки и	+▲1	+▲1	+▲1	+▲1

Продолжение таблицы 1

Инструмент					
Упругие деформации штампа	+▲4	+▲4	+▲4	+▲3	
Расширение штампов в результате нагрева в процессе работы	+○3	+○3	+○4	+○4	
Шероховатость поверхности					
Точность изготовления штампа (в зависимости от способа изготовления)	+▲5	+▲4	+▲3	+▲3	
Температурный режим работы (охлаждение от смазки, нагрев перед штамповкой)	-	+Δ3	+Δ4	+Δ4	
Персонал					
Укладка поковки перед штамповкой	+▲Δ2	+▲Δ2	+▲Δ2	+▲Δ2	
Смазывание штампов (нанесение смазки)	+Δ3	+Δ3	+Δ3	+Δ3	
Среда					
Температура окружающей среды	+○1	+○1	+○1	+○1	
Итого	▲	37	43	35	32
	Δ	3	9	14	14
	○	12	15	19	20
	●	-	4	4	4

Из проведенного анализа способов штамповки следует, что с переходом от ХОШ к ГОШ увеличивается вес неуправляемых факторов и факторов, управляемых настройкой. При этом вес факторов, управляемых превентивно, при переходе от ХОШ к ГОШ уменьшается. При ХОШ выше точность изготавливаемой поковки и меньше доля неуправляемых факторов. Большинство

параметров управляется превентивно на этапе проектирования технологического процесса и соответственно минимален вес факторов, управляемых настройкой.

Выбор рациональной технологической схемы штамповки производился по методике, основанной на анализе общепризнанных фактов из соответствующей предметной области, которые представлены в обобщённом виде таблиц 2, 3, 4, 5 [15-22].

Таблица 2 - Сравнительные данные различных видов объёмной штамповки

Показатели		Способ штамповки		
		ГОШ	ПГОШ	ХОШ
Качества поковок	Точность изделий (ISO – квалитет IT)	IT 14... IT 16		
	Нормальная Повышенная Особо высокая	IT 12... IT 13	IT 12... IT 14 IT 9... IT 10	IT 10... IT 11 IT 8... IT 9
	Шероховатость, R_z , мм	100	50	1,5...10
Технологической спецификации	Предпочтительная масса штампуемого изделия, кг	0,5... 150	0,1...50	0,001...1,5
	Предпочтительные для штамповки стали	любые	Углеродистые с содержанием легирующих элементов менее 10%	С содержанием углерода 0 до 0,45% и легирующих элементов в сумме до 3%
	Допускается при формоизменении деформация заготовки	любая	Допускается более 1,6	Менее 1,6
	Необходимость предварительной подготовки материала	нагрев	нагрев	Отжиг+фосфотирование
	Необходимость промежуточной подготовки материала	нет	нет	При $\epsilon > 1,6$ отжиг +фосфотирование
	Критическая серийность (шт.) при массе деталей около 1 кг	500	10000	3000

Таблица 3 - Ориентировочные показатели ресурсоёмкости различных видов объёмной штамповки

Показатели ресурсоёмкости	Способ штамповки		
	ГОШ	ПГОШ	ХОШ
Материалоёмкость (коэффициент использования материала КИМ)	0,5...0,75	0,8...0,9	0,9...0,98
Энергоёмкость (дж/кг) при указанном КИМ	60	48	44
Сравнительная трудоёмкость	1	0,5...0,3	0,9...0,5
Стойкость инструмента	2...5	10...20	20...50

Таблица 4 - Расход материала и относительная стоимость деталей, полученных из различных заготовок по сравнению со стоимостью исходных материалов

Способы получения заготовок		Коэффициент использования материала			Коэффициент удорожания готовой детали
		На заготовку	Заготовки на деталь	общий	
Заготовки из горячего проката	Мелкосортный	-	-	0,5	12,7
	Среднесортный	-	-	0,45	10,9
	Крупносортный	-	-	0,4	13,3
	Калиброванный	0,99	0,656	0,65	7,7
	Спец. профиль	-	-	0,75	3,6
	Трубы				
Свободная ковка		0,89	0,29	0,25	14,3
Горячая объёмная штамповка		0,8	0,47	0,4	6,0
Холодная объёмная штамповка		0,9	0,93	0,35	1,4
Стальное литье в землю		-	-	0,7	2,5
Точное литье в оболочковую форму		-	-	0,98	1,1

Таблица 5 - Ориентировочные доли статей расходов в себестоимости (числитель) деталей и их соотношение (знаменатель) при различных видах штамповки

Статьи расхода	Способ штамповки		
	ГОШ	ПГОШ	ХОШ
Материал	$\frac{0,61}{1}$	$\frac{0,545}{0,62}$	$\frac{0,485}{0,91}$
Оборудование	$\frac{0,104}{1}$	$\frac{0,122}{0,81}$	$\frac{0,087}{0,95}$
Штамповый инструмент	$\frac{0,25}{1}$	$\frac{0,195}{0,58}$	$\frac{0,064}{0,396}$
Электроэнергия	$\frac{0,035}{1}$	$\frac{0,0315}{0,64}$	$\frac{0,094}{0,21}$
Термообработка	-	-	0,168
Смазка	$\frac{0,0015}{1}$	$\frac{0,09}{53}$	$\frac{0,168}{165}$
Оснастка	$\frac{0,00175}{1}$	$\frac{0,0125}{0,5}$	$\frac{0,02}{1,38}$
Итого	1 + расходы на механообработку	$\frac{1}{0,69}$	$\frac{1}{1,14}$

Дерево решений для выбора рациональной технологической схемы представлено на рисунке 10.

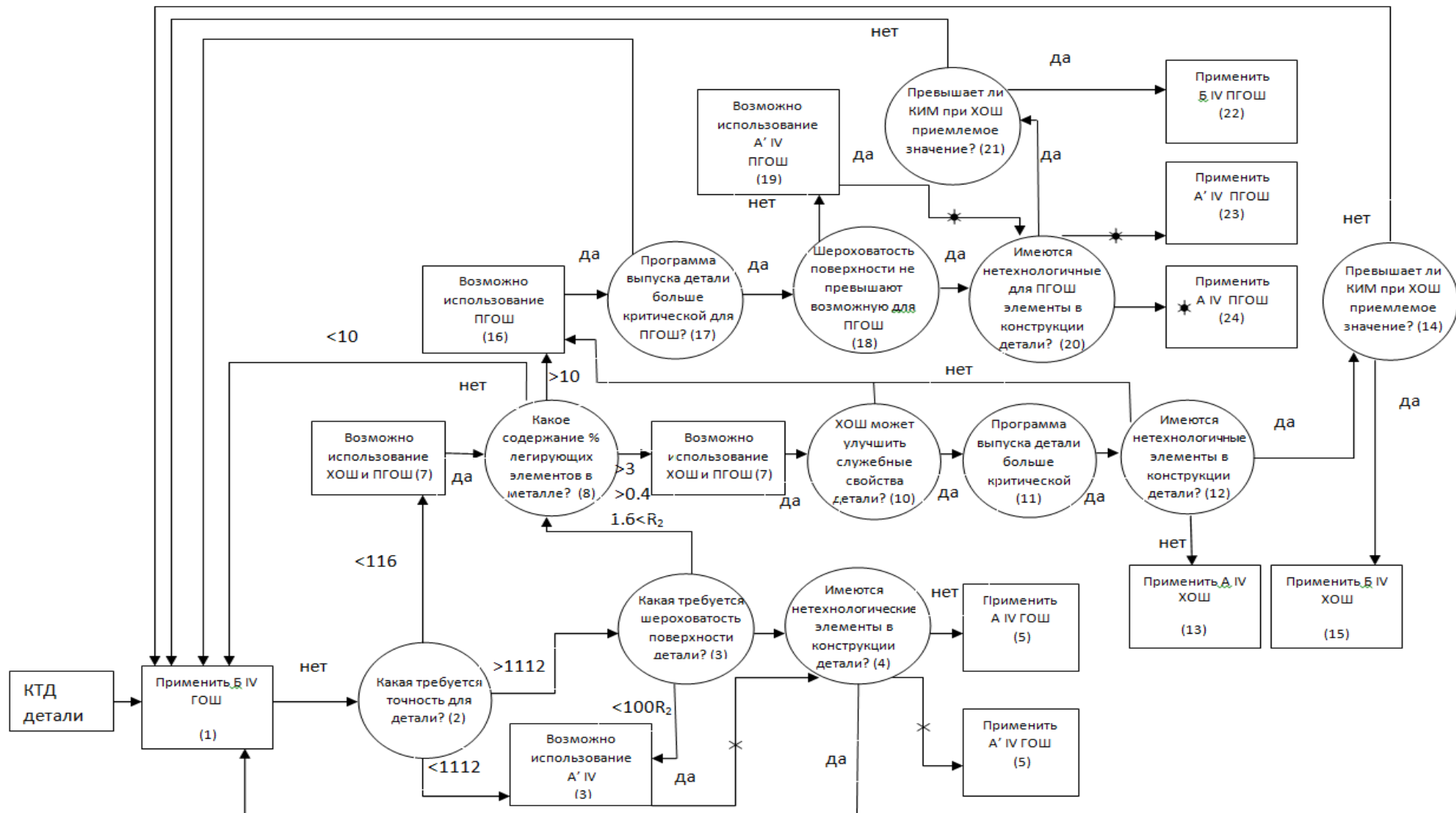


Рисунок 10 – Дерево решений для выбора рациональной технологической схемы обработки детали

По построенному дереву решений применительно к штамповке зубчатой шестерни вследствие технологических ограничений (масса и габариты деталей) применение эффективных технологий ПГОШ и ХОШ не возможно. Возможно лишь применение ГОШ. Однако её использование не позволяет достичь поставленной цели – формообразования зубчатого венца пластической деформацией без последующей механообработки, т.к. точность и шероховатость поверхности, заложенные в конструкторской документации, не будут обеспечены. Решить эту проблему возможно путём применения комплексной технологии состоящей в сочетании ГОШ, при которой формируется поковка с зубчатым венцом, имеющим зубья определённой формы для последующей калибровки в условиях холодной деформации. Последняя операция согласно проведённому анализу в состоянии обеспечить требования конструкторской документации по точности и шероховатости поверхности зубчатого венца, что позволит исключить его механическую обработку. Элементы системы МЗОТИПС для ГОШ приведены на рисунке 11.

На рисунке 12 изображена функционально-структурная модель предлагаемого комплексного технологического процесса получения шестерён с зубом.

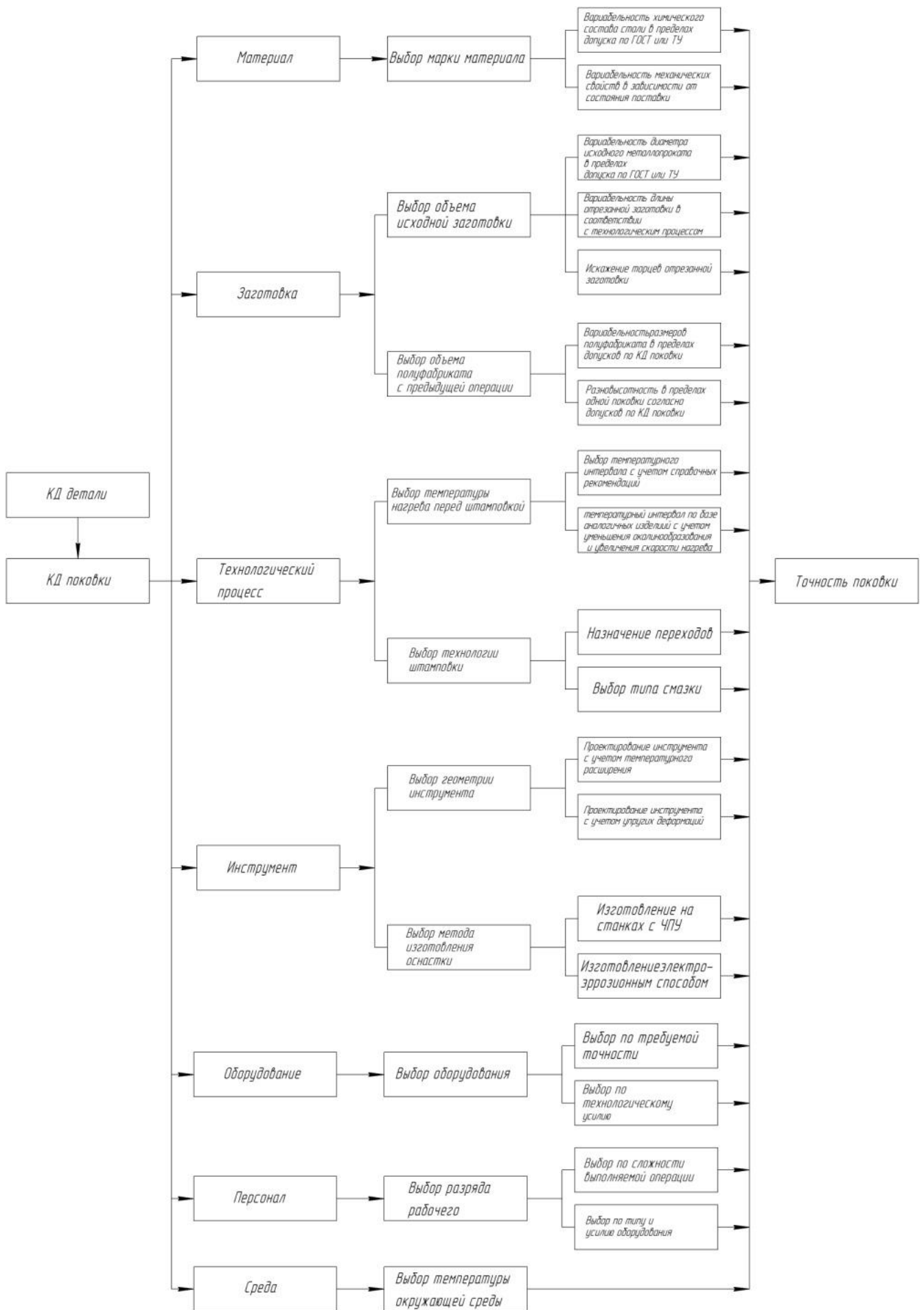


Рисунок 11 – Элементы системы МЗОТИПС для ГОШ

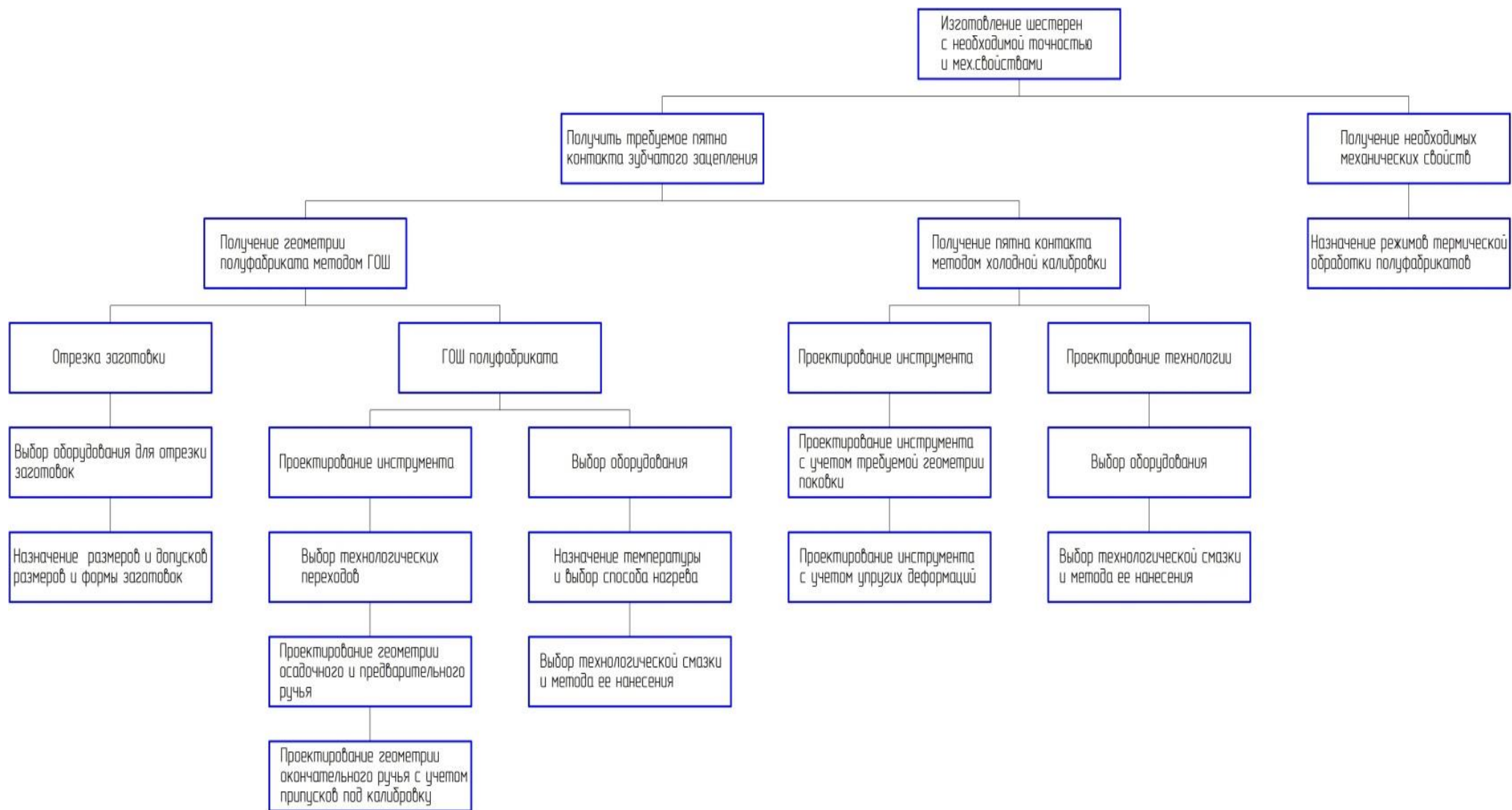


Рисунок 12 – Функционально-структурная модель комплексного технологического процесса получения зубчатых конических шестерён

Таким образом, в качестве метода, обеспечивающего получение рабочих поверхностей детали без применения механической обработки, выбрана схема технологии, состоящая из горячей объёмной штамповки и последующей холодной калибровки поковки повышенной точности (рисунок 12). Такая схема технологического процесса позволит получить высокую производительность и стойкость штампового инструмента при получении поковки, а также обеспечить необходимую точность и повышенные, по сравнению с классической технологией изготовления зубчатых шестерён, механические характеристики зубчатого венца. Однако для эффективного использования предложенной схемы следует устранить проблемы, связанные с окалинообразованием и обезуглероживанием поверхности заготовки при нагреве при горячей объёмной штамповке.

1.4 Обеспечение качества поверхности зубчатого венца

Усталостное разрушение поверхности – характерный вид потери работоспособности для ряда деталей машин, в том числе и зубчатых передач [23,24,24]. Механизм этого вида износа связан с возникновением напряжений на контакте при обкатке зубчатых шестерён. При этом касательные напряжения возникают в стали на небольшой глубине, немного ниже поверхности контакта. Это напряжение изменяется от нуля до максимального значения и снова до нуля, то есть имеет место поле циклических напряжений. В таких условиях происходит усталостное разрушение путём зарождения трещин вблизи поверхности, которые при циклическом нагружении растут и, в конечном счёте, выходят на поверхность. В результате от поверхности откалываются макрочастицы с образованием кратеров износа.

Таким образом, прочность, долговечность и предельные нагрузки зубьев шестерён обуславливаются не только свойствами стали на рабочих поверхностях, но и состоянием подповерхностных слоёв материала (сплошность, макро- и микроструктура). Поэтому для повышения долговечности зубчатых передач

наряду с применением соответствующих конструктивных решений, смазок необходимо создать условия производства, исключая возникновение дефектов в указанных областях и обеспечивающие высокие механические свойства (прочность, твёрдость).

Согласно требованиям чертежа детали и выводов по разделу 1.3 настоящей работы наиболее рациональным технологическим процессом изготовления поковки, позволяющим получать зубчатый венец сателлитов и шестерён без применения механической обработки резанием, состоит из следующих операций: отрезки мерной заготовки от стального прутка; нагрева заготовки в индукторе до температуры начала штамповки, осадки нагретой заготовки; последующей одно- или двухпереходной штамповки с формированием на поковке зубчатого венца; изотермического отжига поковки; дробеочистки её поверхности от окалины; холодной калибровки зубьев; химико-термической обработки (цементация).

Одним из самых непредсказуемых и опасных дефектов с точки зрения последствий при эксплуатации зубчатых передач является вкатанная окалина – дефект поверхности, представляющий собой вкрапления высокотемпературных окислов стали, вдавленных при горячей сортовой прокатке [25,26,27]. Эти дефекты, образовавшиеся при прокатном переделе, могут наследственно передаваться на получаемую при штамповке поковку. Аналогичный дефект может возникать при горячей объёмной штамповке вследствие заштамповки окалины, образующейся при высоких температурах деформирования заготовки. В шестернях, изготовленных одним из ведущих производителей – германской фирмой «Sona BLW» линейный размер заштампованной окалины в поверхностных слоях изделия составляет до 0,013мм. В поковках, произведённых по серийной технологии горячей объёмной штамповки на машиностроительном предприятии на территории Российской Федерации, встречаются размеры заштампованной окалины до 0,063мм. Согласно ГОСТ 8479-70 на поверхностях поковок, подвергающихся чеканке, дефекты не допускаются. По ГОСТ 7062-79 на необрабатываемых поверхностях поковок допускаются местные дефекты типа

вмятин от окалины, забоин, а также полая вырубка или зачистка при условии, что размеры поковки остаются в пределах допуска. Таким образом, при получении рабочей поверхности зубчатого венца шестерён холодной калибровкой справедливо ограничение величины поверхностных дефектов в пределах допусков на размеры, указанных в чертеже детали. Поковки, в которых обнаружены вышеуказанные дефекты, бракуются, а все остальные поковки данной партии могут быть признаны годными только после индивидуального контроля. Наличие такого дефекта, являющегося концентратором напряжений, крайне негативно сказывается на долговечности зубчатых передач при эксплуатации. Поэтому возникла необходимость разработки технологических приёмов существенно уменьшающих, а лучше вообще исключаящих появление такого дефекта при горячей объёмной штамповке шестерён [28]. Эти мероприятия схематично представлены на рисунке 13.

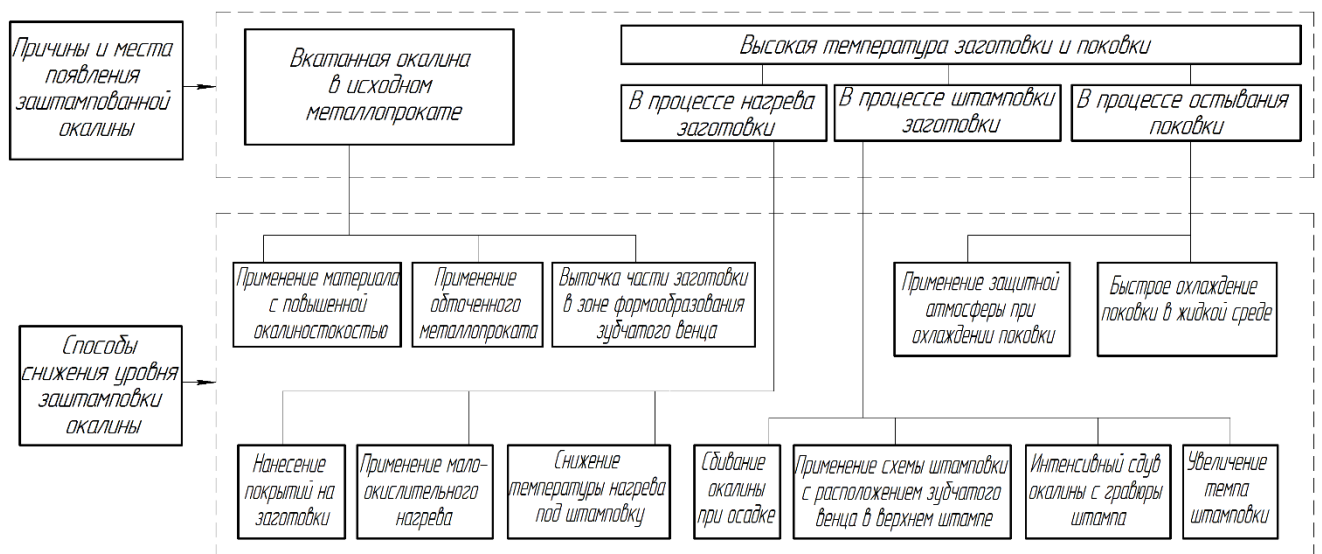


Рисунок 13 – Причины и способы предотвращения заштамповки окалины в зубчатый венец шестерён.

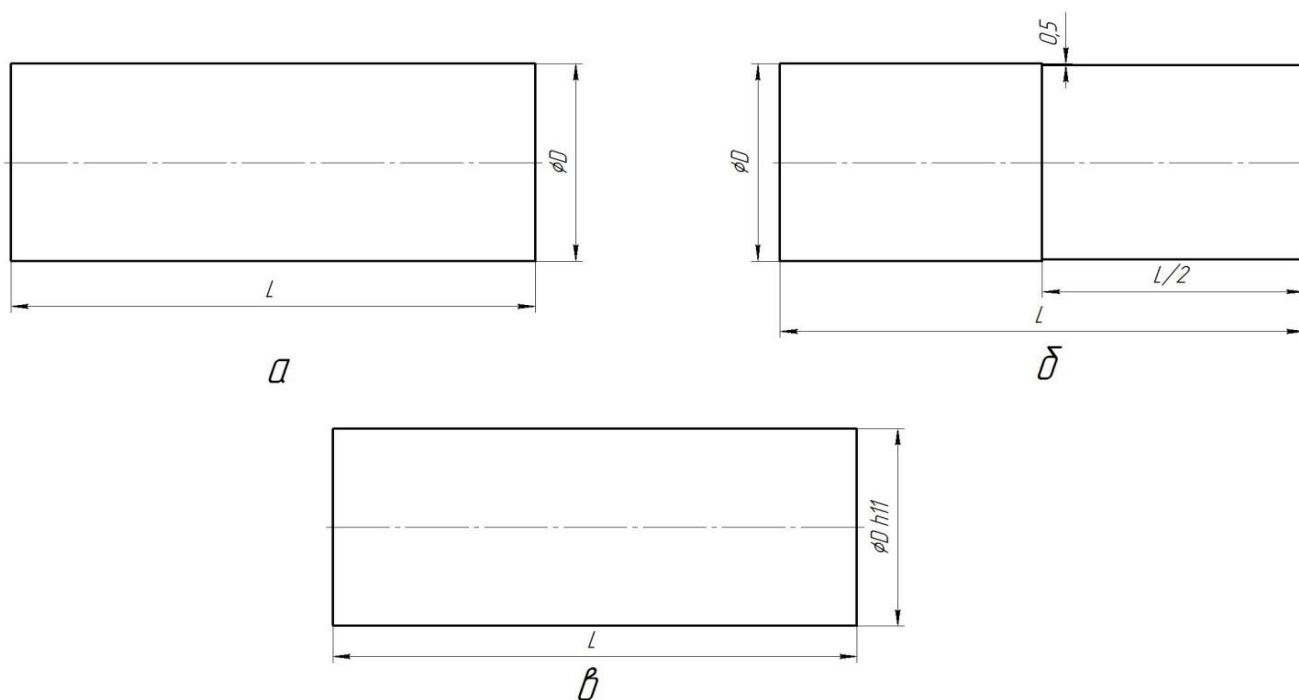


Рисунок 14 - Типы используемых заготовок: а – по ГОСТ 2590-2006, б – частично обточенный из заготовки ГОСТ 2590-2006; в – по ГОСТ 14955-77 по h11 качеству.

Согласно ГОСТ 4543-2016 [29] на поверхности горячекатаного металлопроката допускаются включения вкатанной окалины глубиной до 0,2мм и ряд других дефектов. Вкатанная окалина трудно удаляется травлением и зачисткой. Следовательно, для исключения заштамповки поверхностных дефектов в области зубчатого венца необрабатываемого резанием после штамповки необходимо применение металлопроката с первой группой качества поверхности. При мелкосерийном производстве может оказаться выгоднее применять прокат обычного качества поверхности, но с обточкой заготовки только в зоне формирования зубчатого венца (рисунок 14).

На рисунке 15 приведены кривые окисления железа и некоторых сталей на воздухе при температурах 950 - 1150° С. Продолжительность окисления составляет 1 час. Увеличение содержания углерода в стали в большинстве случаев уменьшает потери материала в окалину. Химический состав стали, содержание в ней углерода и температура окисления определяют состав и свойства окалины и

вливают на изменение характера кривых, определяющих скорость окисления стали при различных температурах [30].

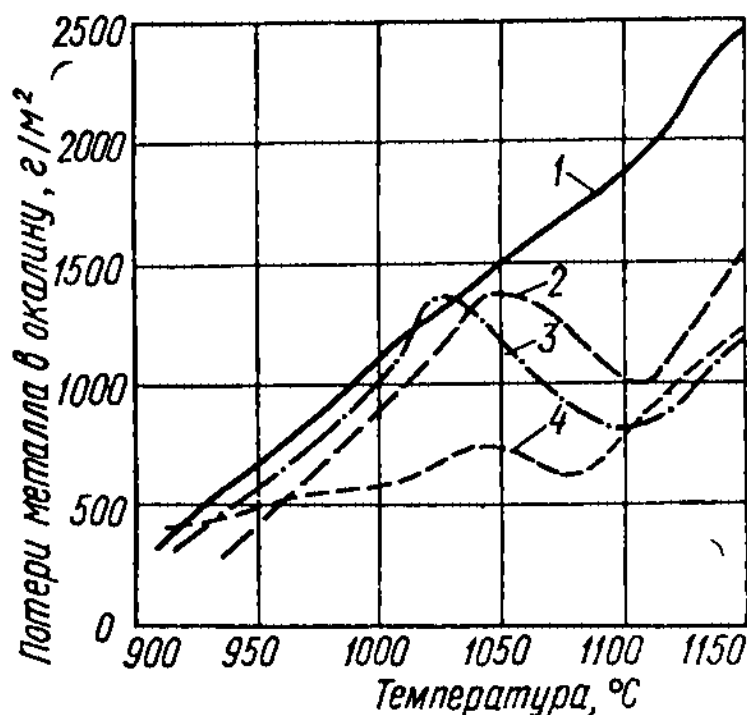


Рисунок 15 – Влияние содержания углерода в стали на процесс окисления
 1 – железо Армко, 2 – содержание углерода 0,15%, 3- содержание углерода 0,47%,
 4- содержание углерода 0,9%.

Снижение температуры нагрева заготовки приводит к уменьшению образования окалина [31,32], одновременно происходит снижение пластичности материала и увеличение силы штамповки, т.к. при штамповке осаживанием в открытых штампах для круглых и квадратных в плане поковок сила штамповки прямо пропорциональна пределу текучести материала при заданной температуре штамповки. Увеличение силы штамповки требует повышения мощности прессового оборудования, кроме того происходит снижение стойкости штампового инструмента и пластичности материала заготовки [33]. Приемлемым компромиссом в этом случае является снижение температуры нагрева заготовки на 100, 150°C до 1050-950°C вместо 1200°C [34,35].

Для уменьшения образования окалина на поверхности заготовки нагрев следует проводить в атмосфере, содержащей минимум кислорода. При нагреве в

среде нейтрального газа окалинообразование снижается в 15-20 раз [36]. Подобные же результаты получаются при нагреве в так называемой застойной атмосфере, т.е. без доступа воздуха в рабочее пространство нагревателя. Чтобы исключить свободную циркуляцию воздуха внутри индуктора, к его торцам герметично прикреплены вертикальные камеры, через которые осуществляется загрузка и выгрузка заготовок (рисунок 16). Имеющийся в индукторе кислород быстро выгорает и нагрев происходит в малоокислительной атмосфере. С этой же целью применяется сжигание газа в горелке на входе в индуктор. Для того, чтобы снизить окисление нагретой заготовки при транспортировке следует уменьшить расстояние от индуктора к прессу [37].

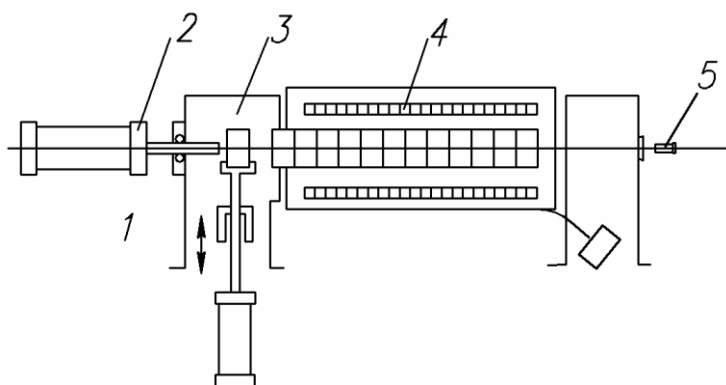


Рисунок 16 - Нагреватель для малоокислительного нагрева

1 – подъемник заготовок; 2 – толкатель; 3 – камера; 4 – индуктор; 5 – пирометр

Схема индукционной установки для безокислительного нагрева в защитной атмосфере (аргоне) показана на рисунке 17. Отличительной особенностью данной схемы от предыдущей является иное расположение камер загрузки и выгрузки заготовок. Камеры крепятся к торцам индуктора с помощью прокладок. Пневматическим толкателем, заготовки последовательно подаются таким образом, что диафрагменное отверстие во входной камере всегда закрыто проталкиваемой заготовкой. Выходная камера выполнена с двумя задвижками, которые открываются только при выходе нагретой заготовки из индуктора.

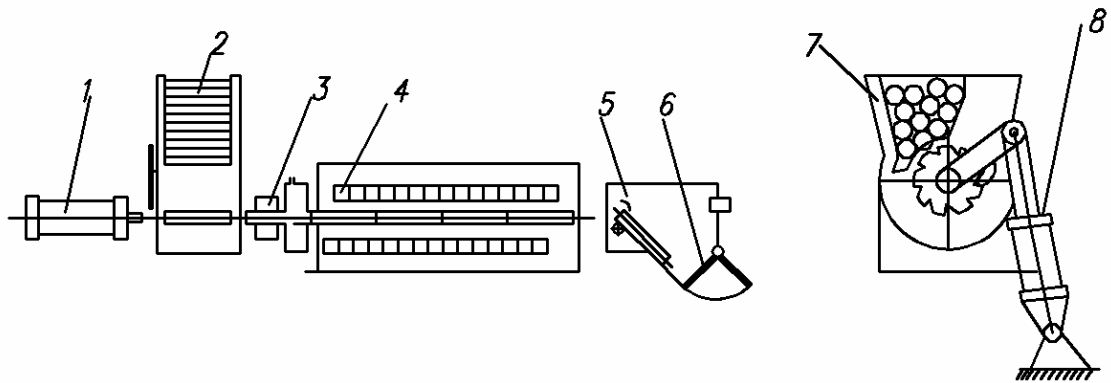


Рисунок 17 - Нагреватель для безокислительного нагрева заготовок в защитной атмосфере

1 – толкатель; 2 – магазин; 3 – уплотнительная камера; 4 – индуктор; 5 – камера выдачи заготовок; 6 – заслонка; 7 – барабан; 8 – цилиндр поворота барабана

Количество образующейся окалины зависит от многих факторов: химического состава стали; температура нагрева; условия окружающей среды нагрева заготовки. При окислении поверхности заготовок из легированных сталей, если легирующий элемент мало или совсем нерастворим в твёрдых фазах системы железо - кислород, он скапливается во внутреннем слое окалины.

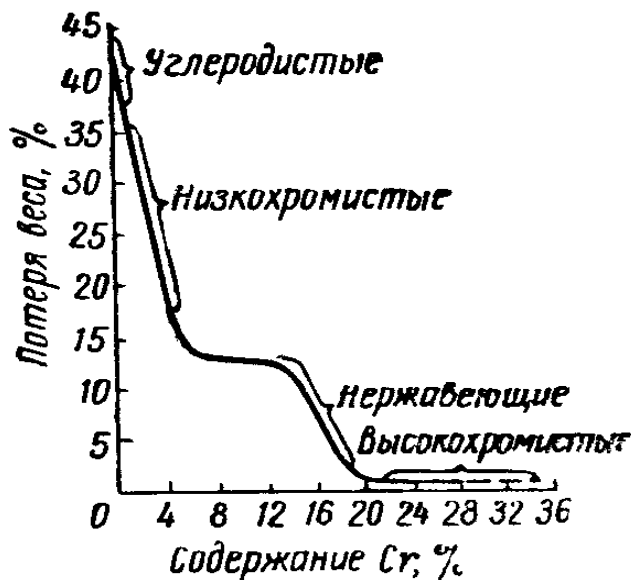


Рисунок 19 – Окалиностойкость сталей при 1000° С, 48 час

В тех случаях, когда легирующие элементы растворяются в твёрдых фазах системы железо - кислород, но скорость диффузии их в этих фазах значительно

меньше скорости диффузии железа, они также скапливаются во внутреннем слое окалины [38,39].

Окалиностойкость конструкционных сталей обуславливается содержанием в них хрома. При содержании в сплаве более 20% Cr окалиностойкость возрастает наиболее резко (рисунок 19). Поэтому из линейки конструкционных сталей, применяемых в серийном машиностроении, следует рекомендовать стали стойкие к высокотемпературному окислению – такие, как 20X2H4MA, 25X5M, 20X3MBФ, 20X2M, 25X3NM, 38XA, 18XГР и др. [40,41,42].

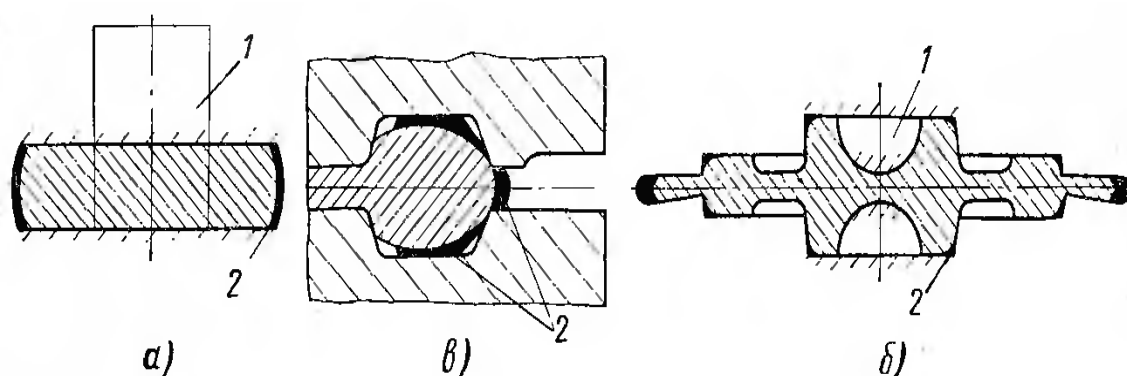


Рисунок 20 – Схема распределения защитного покрытия в поковках
a - на заготовке после осадки; *б* - в ручье штампа; *в* - на поковке в процессе штамповки; 1 – плёнка покрытия; 2 – скопление защитного покрытия.

Защита поверхности стальных заготовок при высокотемпературном нагреве может быть осуществлена оксидными покрытиями кратковременного действия. Применение таких защитных покрытий в каждом конкретном случае требует учёта температурно-временных режимов нагрева стальных заготовок, вида покрытия в зависимости от марочного состава сталей и требований к качеству поверхности, технико-экономического анализа [43,44]. Защитные свойства кратковременных покрытий существенно зависят от температуры, продолжительности нагрева и состава окружающей среды. Однако решающее влияние на свойства покрытий оказывает химический состав покрытия и защищаемого материала. Хорошую защиту при нагреве до 1000 - 1100°C обеспечивали: тальк (связующее – вода), карбонат магния (связующее вода),

водно-графитовая смесь. При нагреве до 1280°C ни одно из покрытий не устраняло образование окалины, но прочность сцепления окалины уменьшалась. Применение покрытия заготовок перед индукционным нагревом несколько снижает угар материала, но их использование в производстве связано с технологическими трудностями (рисунок 20). Поэтому многие покрытия, снижающие окисление и обезуглероживание стали в массовом машиностроении практически мало применяются.

Заштамповку окалины непосредственно в процессе горячей объёмной штамповки можно минимизировать путём выбора наиболее эффективной с точки зрения сбивания окалины схемы осадки на первом переходе [45,46,47,48]. Для предотвращения заштамповки окалины следует также предусмотреть формообразование зубчатых поверхностей, не подлежащих последующей механической обработке, в верхней ковочной вставке и принудительный интенсивный сдув окалины сжатым воздухом после каждой поковки.

Выводы по разделу

В первом разделе диссертационной работы проведён анализ способов получения зубчатого венца шестерён в машиностроении. Рассмотрены накатка зубьев, калибровка зубьев шестерней раздачей коническим пуансоном и высокоточная объёмная штамповка методом ортогональной экструзии в закрытых штампах. Рассмотрены способы повышения качества поверхности зубчатого венца: применение обточенного металлопроката, снижение температуры штамповки, использование малоокислительного нагрева, выбор материала с повышенной окалиноустойчивостью, выбор рациональной схемы осадки для сбивания окалины с поверхности заготовки, удаление окалины с поверхности гравюры штампа. Также в главе предложена матрица значимости параметров системы {М,З,О,Т,И,П,С} для возможных базовых технологических процессов объёмной штамповки: ХОШ – холодная объёмная штамповка; ТОШ – теплая

объёмная штамповка; ПГОШ – полугорячая объёмная штамповка; ГОШ – горячая объёмная штамповка с целью разработки рациональных технологических схем и параметров прецизионной штамповки, обеспечивающих требуемую точность размеров поковки с учётом предлагаемого системного подхода и метода экспертных оценок.

В качестве метода, обеспечивающего получение рабочих поверхностей детали без применения механической обработки, обоснован комбинированный технологический процесс, состоящий из горячей объёмной штамповки и последующей холодной калибровки поковки. Такой технологический процесс позволит получить высокую производительность и стойкость штампового инструмента при получении поковки, а также обеспечить необходимую точность и повышенные, по сравнению с типовой технологией изготовления зубчатых шестерён, механические характеристики зубчатого венца. Он будет включать в себя следующие операции:

1. отрезка мерных заготовок от прутка металлопроката;
2. нагрев мерных заготовок до температуры горячей объёмной штамповки;
3. штамповка нагретой заготовки;
4. обрезка облоя горячештампованной поковки;
5. термическая обработка горячештампованных поковок;
6. дробеочистка термообработанных поковок;
7. холодная калибровка дробеочищенных поковок;
8. контроль окончательных размеров поковки.

Исходя из проведённого анализа, сформулированы цель и научные задачи.

Цель диссертационной работы – повышение эксплуатационных свойств и размерной точности зубчатых венцов конических колёс без механической обработки, полученных прецизионной штамповкой.

Для достижения цели поставлены следующие задачи:

1. Разработать комбинированный метод прецизионной штамповки (горячая объёмная штамповка и последующая холодная калибровка повышенной точности) зубчатых венцов без механической обработки.
2. Установить закономерности формирования точности и повышенных эксплуатационных свойств зубчатых венцов конических шестерён, получаемых прецизионной штамповкой (горячая объёмная штамповка и последующая холодная калибровка).
3. Апробировать разработанные и научно обоснованные технические решения в производственных условиях.

2 Методы исследований

2.1 Моделирование процессов пластического формообразования для оценки напряжённо-деформированного состояния

Совершенствованию процессов объёмной штамповки посредством управления течением материала в процессе её деформирования посвящено большое количество трудов отечественных учёных: В.Г. Шibaков, И.Ф. Антонюк, А.Т. Крук, Г.Я Гун, М.Я. Бровман, В.Л. Колмогоров, И.П. Костарев, Н.М. Макушок, А.Г. Овчинников, Е.И. Семенов, Ю.А. Гладков, и др.

Современная методология конструирования и совершенствования технологических процессов пластического формоизменения базируется в конечном итоге на математических моделях. Значительным прорывом в области моделирования процессов формоизменения явилось создание разработка и создание систем моделирования формоизменения, в основе которых положены различные варианты метода конечных элементов (МКЭ). Анализ методом конечных элементов имеет ряд преимуществ, однако, и он не лишен недостатков. Основным его преимуществом является универсальность. С помощью МКЭ можно решать практически любые краевые задачи. На его основе можно описать любую область, так как любой объект, даже очень сложный, можно легко разбить на треугольники и тетраэдры. С целью повышения точности вычислений возможно без каких-либо затруднений увеличение плотности вычислительной сетки в нужных подобластях. Однако у МКЭ есть и недостатки. В первую очередь, это большое время решения задач, увеличиваемое при уменьшении плотности сетки, усложнении постановки и т.п. [49,50,51].

Среди современных систем моделирования пластического формоизменения можно выделить следующие программные продукты: DEFORM 2D/3D, LARSTRAN, Forge 2/3, ANTARES, FAST FORM 3D, РАПИД, ALPID, DYNAFORM, PATRAN, LS-DYNA 3D, Qform 2D/3D, FINEL, DesignSpace, I-DEAS, FORM 2D, NASTRAN, STARDYNE, ДИНАМИКА-2, ОМД УГАТУ,

ABAQUS, WECAN, MARC/Autoforge, ALGOR и многие другие. Данные системы позволяют ещё на этапах проектирования технологического процесса избежать значительных затрат при запуске производства.

Эффективным программным комплексом, учитывающим геометрию детали, напряжения в заготовке и инструменте, распределение пластической и упругой деформаций и прогнозирующей возможность образования дефектов является программа Qform.

QForm – это универсальный комплекс для математического моделирования процессов обработки материалов давлением. Программа специализирована для проектирования и оптимизации процессов обработки материалов давлением. Основана на гибридном подходе, который объединяет метод конечных элементов и метод конечных объёмов, что обеспечивает быстрый и точный расчёт. Использование имитационного моделирования процессов обработки материалов давлением с помощью программы Qform является альтернативой экспериментальному исследованию и теоретическому анализу данных процессов. При этом значительно сокращается время и трудоёмкость исследований. При математическом описании пластических деформаций заготовку обычно представляют сплошным телом. Это позволяет использовать основные положения механики сплошных тел - фундаментальной науки, устанавливающей уравнения, характеризующие кинематические характеристики (т.е. деформированное состояние) и силовые характеристики (напряжённое состояние) деформируемого тела, а также уравнения взаимосвязи между напряжённым и деформированным состоянием [52,53,54].

Алгоритм программы QForm 9 предполагает последовательное решение задач механики деформирования и тепловых процессов. Таким образом, на каждом шаге расчёта распределение температуры по объёму заготовки считается неизменным. Для решения задачи определения напряжённо-деформированного состояния используется система уравнений механики деформируемого тела [55,56].

Система уравнений, позволяющая определить напряжённое и деформированное состояние заготовки при изотермической пластической деформации, включает:

- уравнения равновесия (2.1)

$$\frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_i} = 0, \quad i, j = 1, 2, 3 \quad (2.1)$$

- уравнения связи между полем скоростей материальных точек и скоростей деформаций (2.2)

$$\dot{\varepsilon}_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial v_i}{\partial x_j} + \frac{\partial v_j}{\partial x_i} \right), \quad i, j = 1, 2, 3 \quad (2.2)$$

- физические уравнения Леви-Мизеса (уравнения связи между напряжённым и деформированным состоянием) (2.3)

$$\dot{\varepsilon}_{ij} = \frac{3}{2} \frac{\dot{\varepsilon}}{\bar{\sigma}} \sigma'_{ij} \quad (2.3)$$

- условия несжимаемости (закон постоянства объёма) (2.4)

$$3\dot{\varepsilon}_m = \dot{\varepsilon}_{ii} = \dot{\varepsilon}_{11} + \dot{\varepsilon}_{22} + \dot{\varepsilon}_{33} = 0 \quad (2.4)$$

- кинематические граничные условия на поверхности F_v (2.5)

$$v_i = v_{0i} \quad (2.5)$$

- силовые граничные условия на поверхности F_p (2.6)

$$P_i = P_{0i} \quad (2.6)$$

- критерий пластичности (2.7)

$$\bar{\sigma} = \sigma_S \quad (2.7)$$

- реологическая модель материала (изменение сопротивления материала пластической деформации) (2.8)

$$\sigma_s = f(\varepsilon_{ef}^P, \dot{\varepsilon}, T) \quad (2.8)$$

Удовлетворению системе дифференциальных уравнений равновесия, граничных условий с учётом физических уравнений Леви-Мизеса эквивалентна вариационная формулировка (2.9), вытекающая из условия стационарности функционала Маркова (знак δ обозначает вариацию)

$$\delta\Phi = \iiint_V \bar{\sigma} \delta\dot{\varepsilon} dV - \iint_{F_p} p_i \delta v_i dF = 0 \quad (2.9)$$

Первое слагаемое в правой части функционала представляет собой мощность внутренних сил (мощность пластической деформации в объёме тела V), второе - с мощностью известных внешних сил (F_p - поверхность, на которой заданы внешние силы). При минимизации функционала Маркова автоматически удовлетворяется система уравнений равновесия и силовые граничные условия. Эта формулировка используется при выводе разрешающей системы уравнений метода конечных элементов для моделирования пластической деформации в программе QForm 9.

2.2. Влияние формы припуска на напряжённно-деформированное состояние и силу при холодной калибровке

Повышение точности изделий, получаемых холодной калибровкой возможно одним из следующих способов:

- применение более жёстких специализированных прессов для холодного выдавливания и чеканки позволяет уменьшить погрешности точности размеров при холодной калибровке в 1,2...1,5 раза [57,58,59,60];

- использование упругих упоров в системе «пресс-штамп» целесообразно для универсальных прессов и позволяет повысить точность калибровки до 3-х раз [61,62,63,64];
- увеличение количества переходов калибровки до 2-х позволяет повысить точность в 1,3...1,7 раза [65,66,67].

Значительное влияние на точность готового изделия имеет геометрия горячештампованной поковки, а именно форма припуска под калибровку. Припуск под калибровку должен обеспечивать правильное распределение материала по поверхности пятна контакта зубьев. Конфигурация плоскостей подвергаемых после горячей объёмной штамповки холодной плоскостной калибровке существенно влияет на распределения параметров напряжённо-деформированного состояния в приконтактных областях деформируемой заготовки. Повышение точности может быть достигнуто уменьшением жёсткости поковки [68,69,70], за счёт придания припуску на калибровку переменной формы – выпуклой или вогнутой. Задачей технологической подготовки является выбор наиболее рациональной конфигурации припуска на горячештампованной поковке, обеспечивающей получение требуемой точности поверхности зубьев на калибровке [71,72].

Использование цилиндрической заготовки для оценки влияния формы припуска на результат калибровки позволяет на поковке простой конфигурации выявить основную закономерность изменения напряжённо-деформированного состояния (НДС), которую впоследствии, с корректировкой, можно распространить на более сложные поковки, в частности имеющие зубчатый венец. В случае последующей химико-термической обработки благоприятная макроструктура, полученная в результате ГОШ и уплотненная пластическим деформированием при ХОШ, детали сохраняется [73,74,75,76].

Для выявления особенностей формоизменения и оценки показателей НДС при холодной калибровке необходимо провести моделирование для плоской, вогнутой и выпуклой форм припусков, предложенных с целью обеспечения

плавного роста зоны затруднённой деформации 1, расположенной с торцевой части заготовки деформируемой заготовки в процессе осадки цилиндрического образца с плоским торцом (рисунок 21) [77,78].

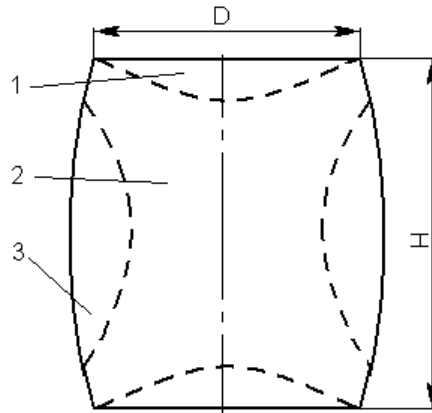


Рисунок 21 - Характерные зоны в заготовке при осадке цилиндра

1-зона затрудненной деформации; 2-зона интенсивной деформации;
3-зона промежуточных деформаций.

Для оценки влияния формы припуска на результат калибровки и выявления основной закономерности изменения напряжённо-деформированного состояния в центральной области калибруемой поверхности предложено проведение имитационного моделирования на цилиндрических образцах с припуском различной конфигурации и одинаковой высоты (рисунок 22) [79, 80].

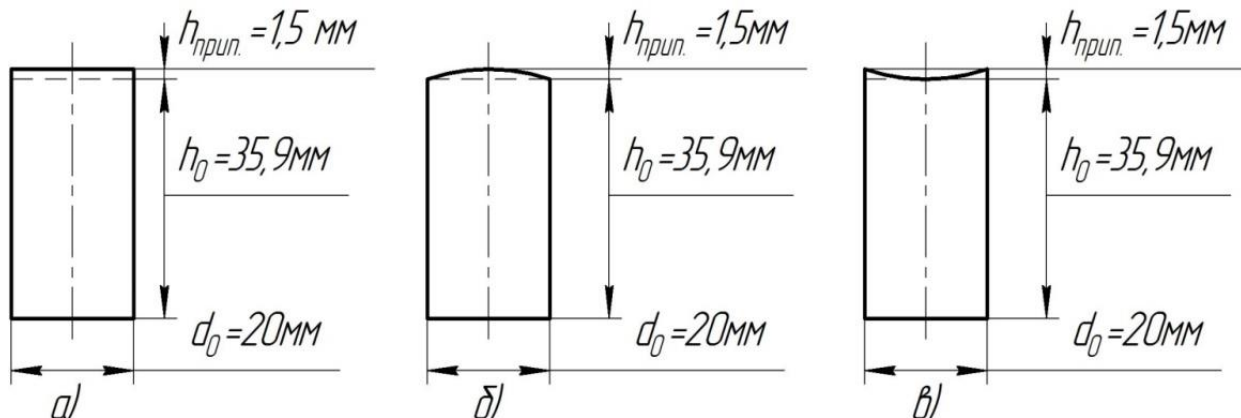


Рисунок 22 - Припуски плоской(а), выпуклой(б) и вогнутой(в) формы.

Необходимо подобрать степень деформации (относительное уменьшение высоты, ϵ , %), значение радиуса припуска (R , мм) и температуру (T , °C) таким образом, чтобы получить значения интенсивности напряжений в центральной области торца образца, не превышающих предела прочности материала заготовки

[81,82,83]. Для решения этого вопроса необходимо получить математические модели для каждого из трех типов припуска – плоский, выпуклый и вогнутый высотой 1,5 мм. Величину степени деформации (относительное уменьшение высоты, $\varepsilon, \%$) на образцах принимаем 4%, которая соответствует моменту полной выборки припуска 1,5мм, и 6%, соответствующей уменьшению высоты на 2,4 мм, при превышении которой наблюдается значительное изменение формы самого образца. Упругой деформацией деформацией и анизотропией механических свойств пренебрегаем, критерий пластичности (2.7) принят в виде:

$$\sigma_s = K\varepsilon_i^n \quad (2.10)$$

интенсивность деформаций осесимметричного образца

$$\varepsilon_i = \frac{\sqrt{2}}{3} \sqrt{(\varepsilon_\rho - \varepsilon_\alpha)^2 + (\varepsilon_\alpha - \varepsilon_z)^2 + (\varepsilon_z - \varepsilon_\rho)^2} + \frac{3}{2} \gamma_{\rho\alpha}^2 \quad (2.11)$$

константы K и n определяются по результатам испытаний на растяжение материала шестерни. Температура нагрева образца перед деформацией ($T, ^\circ\text{C}$) выбрана для условий работы в нормальных условиях (20°C) и для условий, позволяющих снизить силу штамповки, не допуская при этом начала процесса разупрочнения (150°C). Решим поставленную задачу, используя методологию многофакторного эксперимента, варьируя факторы на двух уровнях, при этом радиус для припуска плоской формы принимаем равным 0 мм [84].

Таблица 6 - Исследование сжимающих напряжений для образца с припуском выпуклой формы

Факторы		Уровни		$(x_i^{\max} - x_i^{\min})/2$
название	обозначение	x_i^{\min}	x_i^{\max}	
степень деформации(ε), %	x_1	4	6	2
значение радиуса припуска(R), мм	x_2	0	34	34
температура (T), $^\circ\text{C}$	x_3	0	150	150

Зависимость интенсивности напряжений в центральной области торца образца от значения радиуса припуска, степени деформации и температуры

нагрева заготовки перед деформацией можно представить уравнением регрессии (2.10) в виде

$$\sigma_i = b_0 + \sum_{i=1}^3 b_i X_i + \sum_{i>j} b_{ij} X_i X_j + b_{123} X_1 X_2 X_3 \quad (2.10)$$

где факторы записаны в кодированной безразмерной форме.

2.3 Методика проведения испытаний межколёсного дифференциала на долговечность

Испытания для определения долговечности межколёсного дифференциала (МКД), укомплектованных сателлитами и шестернями, изготовленных методом прецизионной штамповки, для модели 6520 проведены в лабораторных условиях конструкторско-исследовательским бюро зубчатых передач и специальных агрегатов конструкторско-исследовательского отдела агрегатов и систем научно-технического центра ПАО «КАМАЗ» по утвержденной научно-техническим центром ПАО КАМАЗ программе-методике №37-104-17-1375 соответствующей ГОСТ Р 53445-2009 «Автомобильные транспортные средства. Передачи ведущих мостов. Методы стендовых испытаний»: при температуре окружающей среды – от 18 до 25°С, атмосферном давлении – от 90 до 102кПа и относительной влажности воздуха – от 56 до 76%, т.е. с соблюдением требований по обеспечению нормальных климатических условий испытаний изделий по ГОСТ 15150-69, а именно:

- температура окружающей среды – (25±10) °С;
- относительная влажность воздуха – от 45 до 80 %;
- атмосферное давление – от 84 до 106,7 кПа.

Испытания по определению долговечности МКД в составе ведущего моста проводили на стенде фирмы «В.І.А» (Франция) для испытаний мотор-колес, инв. № 170260 (протокол первичной аттестации № 50/2015/А-08 от 24.12.2019 г., срок действия – 12 месяцев). Также использованы:

- барометр-анероид БАММ-1, инв. № 501, диапазон измерений от 80 до 106 кПа, погрешность $\pm 0,2$ кПа, свидетельство о поверке № 5924651 – до 16.05.2020 г.;
- прибор-комбинированный мод. ТКА-ПКМ (60), зав. № 60 1627, диапазон измерения температуры от -30 до 60 °С, диапазон измерения относительной влажности от 5 до 98%, погрешность $\pm 0,2$ °С и $\pm 3,0\%$, паспорт годен до 17.10.2019г.

Подготовка мостов к испытаниям на стенде включала в себя:

- обрезку кронштейнов с картеров мостов;
- приварку штуцеров к картеру и крышке картера для подключения к системе охлаждения стенда;
- установку температурного датчика.

В качестве методики испытаний были приняты режимы, представленные в таблице 7.

Таблица 7 - Режимы испытаний МКД заднего ведущего моста

Наименование этапа	Задаваемый параметр испытания на входе в ведущий мост					
	Нагрузка, Н·м (кгс·м)		Частота вращения ведущей конической шестерни, мин ⁻¹		Разность частот вращения колес, мин ⁻¹	Продолжительность, час
	номин. значения	пред. отклон.	номин. значения	пред. отклон.		
Обкатка	980(100)	19,6(2)	89	+1	5	0,5
	3430(350)	68,6(7)	133	+1	10	1,0
	4410(450)	88,2(9)	173	+1	15	1,5
Осн. режим	6671(680)	133 (13,6)	178	+1	20	До отказа
Частота вращения правой полуосевой шестерни составила 75,4 мин ⁻¹ , а левой полуосевой шестерни – 136,7 мин ⁻¹ .						

С пульта стенда задавались следующие параметры - крутящий момент на

входе в мост и разность скоростей колёсных передач. Фактические значения частоты вращения и крутящий момент на колёсных передачах испытуемого моста, измеряемые датчиками стенда, отображались на мониторе компьютера.

Оценку проводили визуальным контролем состояния внешнего вида деталей дифференциалов по наличию износа покрытия, схватывания контактирующих поверхностей и образования задиров.

2.3. Выводы по разделу

1. Исследования процессов ГОШ и последующей холодной калибровки выполнены методом конечных элементов в программном комплексе QForm V9.0.8. Использование осадки плитами осесимметричной заготовки для имитации калибровки зубчатого венца позволило подбирать форму и размеры припуска, заменив трехмерное КЭ-моделирование двумерным с уменьшенным на порядок объёмом вычислений, и выявить основную закономерность изменения НДС, которая впоследствии, с корректировкой, распространена на более сложные поковки, имеющие зубчатый венец.

2. Задача подбора степени деформации ($\epsilon, \%$), значения радиуса припуска ($R, \text{мм}$) и температуры нагрева заготовки перед деформацией ($T, ^\circ\text{C}$) для упрочнения центральной области её торца при минимальной силе осадки решена с использованием методологии многофакторного эксперимента варьированием факторов на двух уровнях. Зависимости напряжённо-деформированного состояния в центральной области торца заготовки от формы припуска, величины и температуры деформации будут представлены уравнением регрессии.

3. Проверка работоспособности зубчатых венцов, изготовленных прецизионной штамповкой, проводилась в составе испытания межколёсного дифференциала конструкторско-исследовательским бюро зубчатых передач и специальных агрегатов научно-технического центра ПАО «КАМАЗ» по утверждённой научно-техническим центром ПАО КАМАЗ программе-методике №37-104-17-1375, соответствующей ГОСТ Р 53445-2009 «Автомобильные

транспортные средства. Передачи ведущих мостов. Методы стендовых испытаний».

3 Результаты исследований

3.1 Формирование точности зубчатых венцов при прецизионной штамповке (горячей объёмной штамповке с последующей холодной калибровкой повышенной точности)

Качество конических зубчатых шестерён и передач определяется ГОСТ 1758-81 [85]. Допуски, предусмотрены по следующим основным показателем качества: норма кинематической точности; норма плавности хода; боковой зазор и норма контакта зубьев. Для силовых конических передач автомобилей, тракторов и других транспортных средств норма точности по пятну контакта назначается по более высоким нормам точности относительно других показателей качества [86]. Следует отметить, что погрешность профиля и направление зуба для конических шестерён в этом случае не нормируется. Точность формы боковых поверхностей и точность направления зуба могут оцениваться по полноте пятна контакта, размеры которого устанавливаются обычно по результатам испытания под нагрузкой. Контакт зубьев в паре определяется величиной суммарного пятна контакта по длине и высоте, отклонением межосевого расстояния и отклонением суммарной зоны касания.

При прецизионной штамповке зубчатый профиль конических колёс формируется как негативный отпечаток в начале в штампе при ГОШ, а затем в штампе холодной калибровки зубчатого венца. При ГОШ штамповый инструмент устанавливается на КГШП, а при холодной калибровке на универсальный или специализированный пресс кривошипно-коленным исполнительным механизмом. В первом и во втором случае точность форма образования может быть обеспечена только за счёт уменьшение разброса высоты штампуемых и калибруемых поковок, так как механические пресса допускают регулировку только закрытый высоты штампового пространства [87]. В обоих случаях геометрическая точность

зубчатого профиля во многом будет определяться точностью изготовления гравюры штампа.

Таким образом, кинематическая точность и плавность хода зубчатых передач формируется в основном технологиями изготовления гравюры штампового инструмента, а точность формирования пятна контакта может быть обеспечена режимами холодной калибровки и соответствующими параметрами прессового оборудования, прежде всего жёсткостью и его настройкой. Элементы системы {М,З,О,Т,И,П,С} содержат подмножества состоящие из дискретных или последовательных значений из некоторого допустимого диапазона их значений. Например, элемент М содержит подмножества, характеризующие химический состав, механические, технологические и другие свойства обрабатываемого материала и т.д. Часть соответствующих параметров имеет переменный характер, приводящий к возникновению случайных возмущений и систематических погрешностей δ_i . Преобразование погрешности исходных параметров в погрешность выходного параметра определяется коэффициентами K_i . На точность размеров поковки после калибровки влияют следующие параметры (рисунок 23): точность поковок перед калибровкой, т.е. величина припуска под калибровку и фактический допуск на размеры поковки; форма и размеры поковки; сопротивление деформированию материала поковки; контактное трение между калибруемой поверхностью и штампом; жесткость конструкции штампа, степень деформации при калибровке, сила прессы и его конструкция [88,89,90]. Чем ниже необходимая сила деформирования, тем выше точность детали после калибровки.

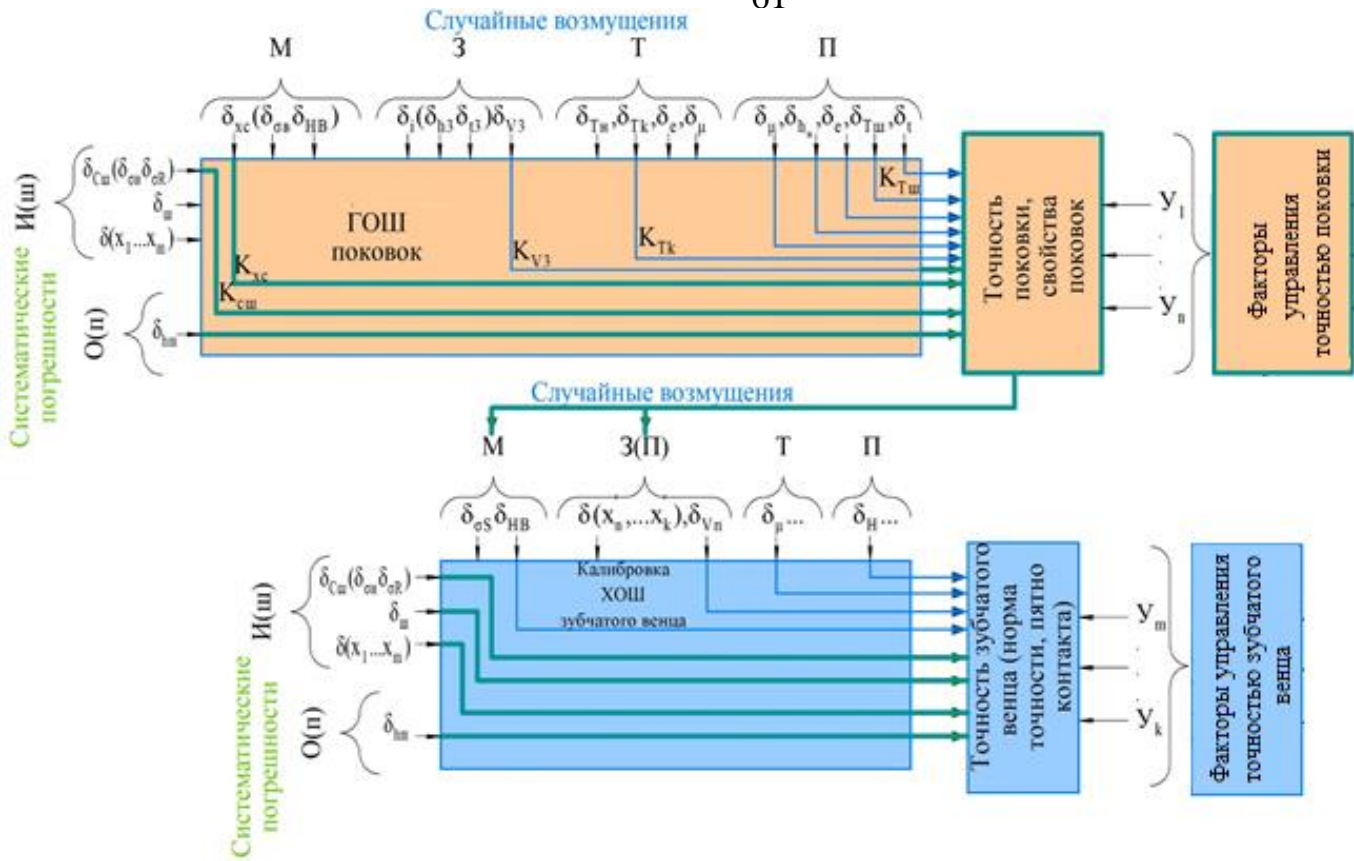
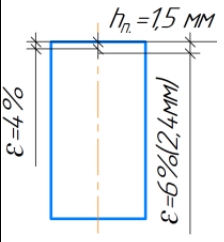
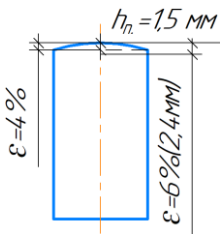
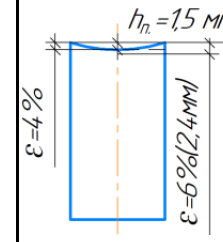


Рисунок 23 - Параметрическая модель формирования точности зубчатого венца в комплексном технологическом процессе прецизионной штамповки (горячей объёмной штамповке с последующей холодной калибровкой повышенной точности).

Результаты имитационного моделирования образцов из стали 18ХГР с различной конфигурацией припусков представлены в таблице 8. Наиболее интенсивные деформации поверхности претерпевает заготовка с выпуклым припуском в среднем 0,19-0,22 против 0,02-0,04 для плоского и вогнутого. Кроме того формируется более плотная волокнистая структура и мелкозернистая микроструктура [91], что сказывается на эксплуатационных свойствах калибруемой плоскости.

По сравнению с плоской и вогнутой формами выпуклая форма припуска обеспечивает также наибольшие значения интенсивности сжимающих напряжений в центральной области торца образца.

Таблица 8 - Результаты имитационного моделирования

Форма припуска			
Степень деформации центральной части образца	0,03– 0,04	0,19 – 0,22	0,02
Интенсивность напряжений в центральной части образца, МПа	125 – 170	60 – 200	0 – 25

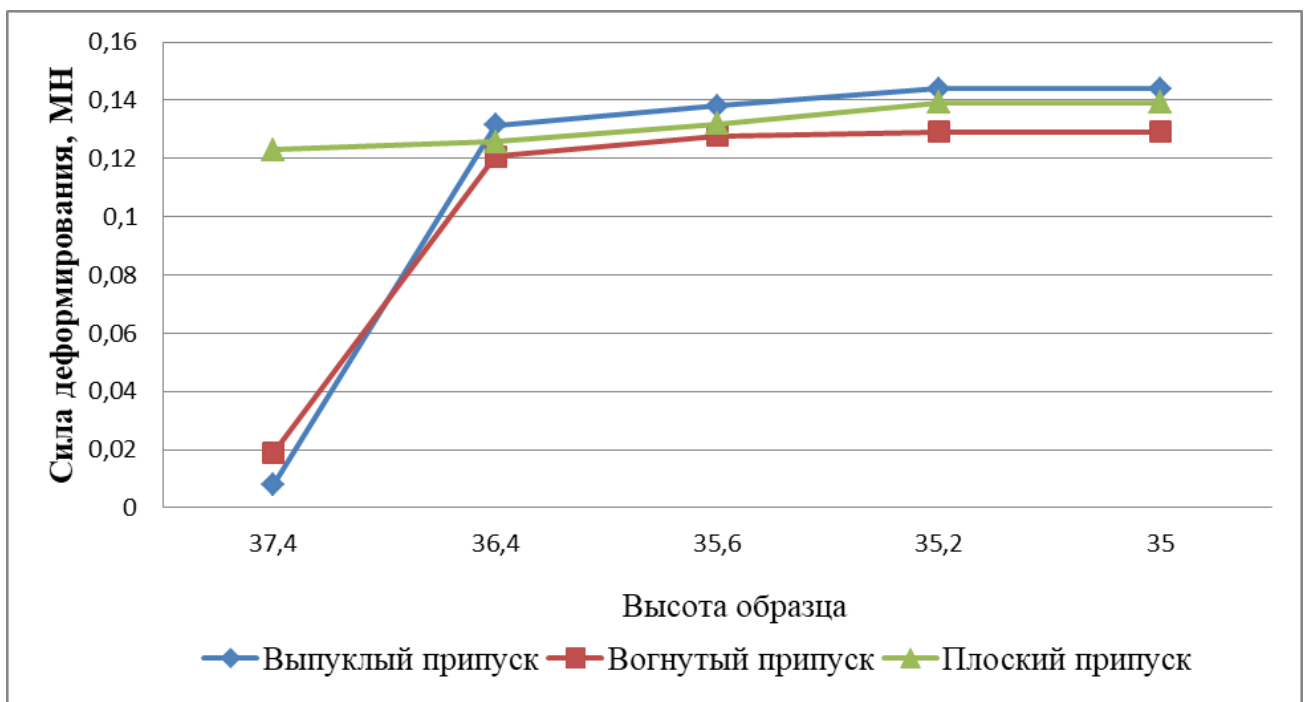


Рисунок 24 - Изменение силы деформирования для припуска плоской, выпуклой и вогнутой формы

При деформировании припуска переменной формы наблюдается постепенный рост значения силы деформирования (рисунок 24), что происходит благодаря постепенному увеличению площади соприкосновения калибруемой поверхности горячештампованной поковки и штампового инструмента. При применении гидравлического пресса постепенный рост силы деформирования выпуклого припуска позволит обеспечить остановку по достижении силы деформирования, соответствующей полной выборке припуска. Это позволит увеличить точность холодной калибровки вне зависимости от вариабельности

иных факторов (разброс механических свойств материала, разброс высоты горячештампованной поковки), т.к. остановка пресса будет обеспечена в момент выборки всей высоты припуска. Постепенный рост силы и достижение максимального значения к концу рабочего хода наиболее благоприятна также в случае применения в технологическом процессе механического пресса, т.к. номинальную силу кривошипный пресс развивает при достижении крайнего нижнего положения.

С повышением температуры нагрева образцов с выпуклым припуском до 150°C сила деформирования снижается на 13%, а значение сжимающих напряжений – на 15-18%. Полученное наблюдение возможно применить в случае необходимости уменьшения потребной силы калибровки вследствие ограничения по развиваемому усилию имеющегося оборудования [96].

Обработка результатов исследования интенсивности напряжений для образца с припуском выпуклой формы представлены в приложении. Зависимость напряжённого состояния в центральной области торца образца (2.11) от значения радиуса припуска, степени деформации и температуры нагрева заготовки перед деформацией можно представить зависимостью:

$$\sigma_i = 422,1712 + 6,0875 * \varepsilon + 3,4993 * R - 0,4698 * T, \text{ МПа} \quad (2.11)$$

Интерпретируя параметры полученной зависимости получаем:

- увеличение ε на 1%. приводит к увеличению σ в среднем на 6,088 МПа;
- увеличение R на 1 мм приводит к увеличению σ в среднем на 3,499 МПа;
- увеличение T на 1°C приводит к уменьшению σ в среднем на 0,47 МПа.

Статистическая значимость полученной зависимости проверена с помощью коэффициента детерминации и критерия Фишера. Установлено, что в исследуемой ситуации 99.11% общей вариабельности σ объясняется изменением факторов ε , R , T .

Таким образом, уравнение для вычисления значения радиуса припуска выпуклой формы будет иметь вид:

$$R = (\sigma - 422,1712 - 6,0875 * \varepsilon - 0,4698 * T) / 3,4993, \text{ мм} \quad (2.12)$$

Для значений температуры равной 20°C, временного сопротивления разрыву стали 18ХГР равного 980Мпа и степени деформации, не попадающей в пределы критической деформации 4-10%, чтобы не допустить последующего значительного роста зерна, значение радиуса следует назначать не более 137 мм.

Выпуклая форма припуска обеспечивает наибольшее значение сжимающих напряжений в центральной области торца образца и наименьшее значение силы деформирования.

Статистическая значимость полученной зависимости проверена с помощью коэффициента детерминации и критерия Фишера. Установлено, что в исследуемой ситуации 99.11% общей вариабельности σ_i объясняется изменением факторов ε , R , T .

Таким образом, уравнение для вычисления значения радиуса припуска выпуклой формы будет иметь вид:

$$R = (\sigma_i - 422,1712 - 6,0875 * \varepsilon - 0,4698 * T) / 3,4993, \text{ мм} \quad (2.13)$$

С целью оценки величины пластических деформаций и напряжений в зависимости от относительной высоты припуска проведено моделирование образца трапецеидальной формы с выпуклым припуском, сечение которого подобно сечению зуба конусной шестерни. При этом высота припуска назначена в процентном соотношении к формируемому пятну контакта шириной L (Рисунок 25), являющейся хордой сектора окружности радиусом R , и для него справедлива геометрическая зависимость:

$$h = R - (R - \sqrt{R^2 - L^2/4}), \text{ мм} \quad (2.14)$$

Это явление возможно объяснить, если рассмотреть образец с выпуклым припуском как множество цилиндрических образцов с плоским торцем V_i . Для образцов с плоским торцом в зоне контакта можно выделить три участка (рисунок 25), определяющиеся степенью развития сил трения.

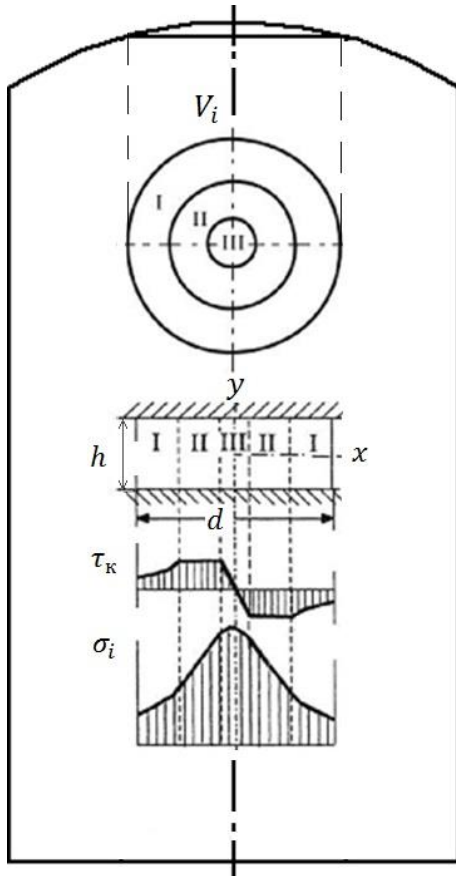


Рисунок 25 – Распределение нормальных и касательных напряжений при осадке образца

На периферийном участке I имеет место скольжение материала относительно бойков. Здесь контактные касательные напряжения изменяются по закону Кулона, т. е. пропорционально нормальному напряжению. Нормальное напряжение возрастает от периферии к центру по экспоненциальному закону. Центральная часть образца называется зоной прилипания. Она состоит из двух участков. Вблизи центральной точки имеется участок III на котором перемещение материала относительно инструмента практически полностью отсутствует, этот участок зоны прилипания выделяют в самостоятельную зону застоя. В зоне застоя касательные напряжения снижаются по линейному закону и в центре образца равны 0. Нормальные напряжения в центре образца максимальны [92,93,94,95].

Таким образом, результирующее значение сжимающих напряжений в области деформирования припуска выпуклой формы нарастает.

Кроме того формируется более плотная мелкозернистая микроструктура, что сказывается на эксплуатационных свойствах калибруемой плоскости. Это

особенно важно для ответственных деталей с поверхностями, подверженными интенсивному износу.

3.2 Определение рациональной высоты припуска под холодную калибровку зубьев шестерён

С целью оценки пластических деформаций и сжимающих напряжений от относительной высоты припуска проведено дополнительное моделирование образца с выпуклым припуском на образце трапецеидальной формы, сечение которого подобно сечению зуба конусной шестерни. При этом высота припуска назначена в процентном отношении к формируемому пятну контакта (рисунок 25).

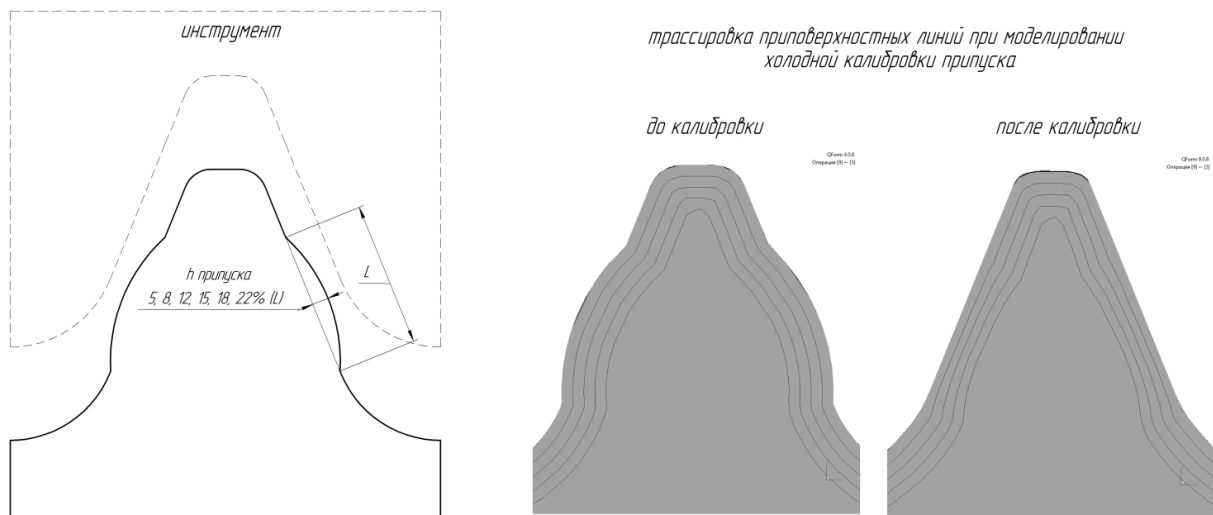
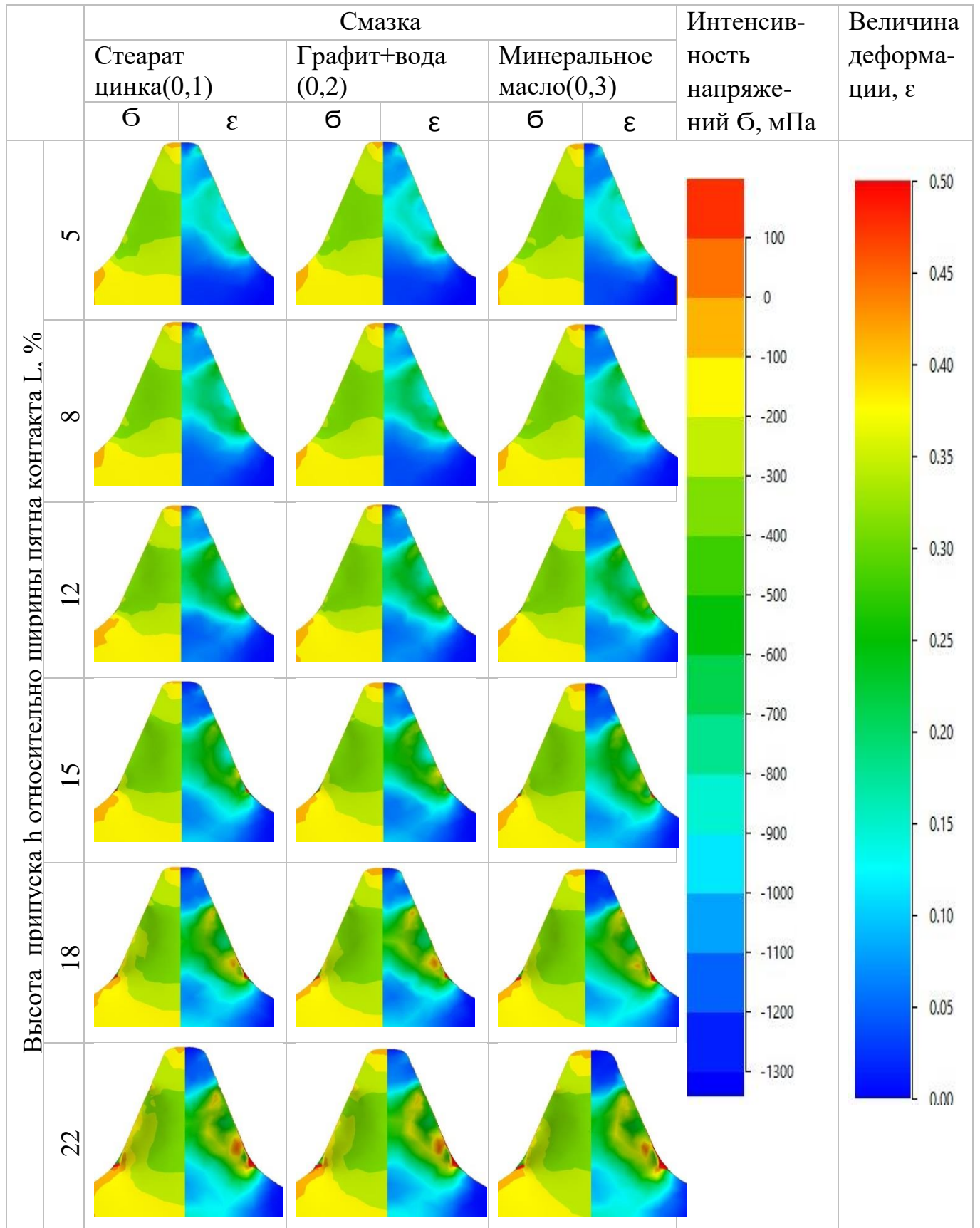


Рисунок 25 - Трапецеидальный образец

Важное значение для процессов обработки материалов давлением имеют условия трения в областях контакта между заготовкой и деформирующим инструментом [97,98]. Поэтому имитационное моделирование проведено для трех вариантов смазки: стеарат цинка с коэффициентом трения 0,1; водно-графитовая смесь с коэффициентом трения 0,2; минеральное масло с коэффициентом трения 0,3.

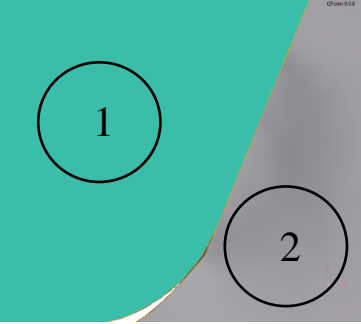
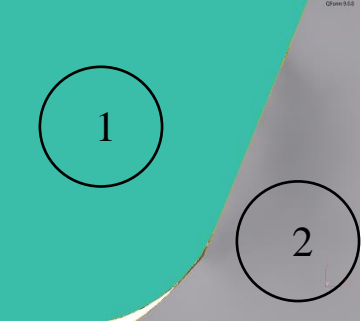
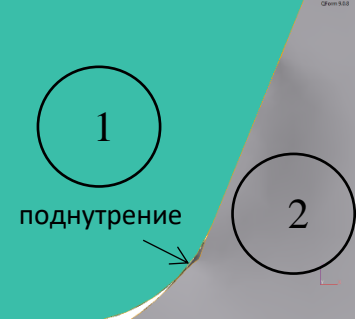




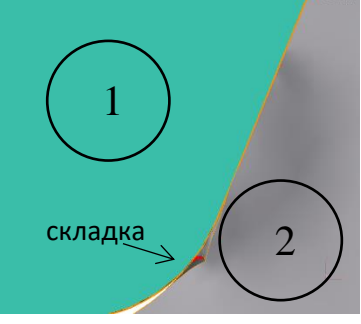
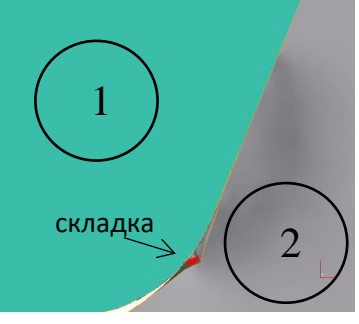
Из результатов моделирования (таблица 9) видно, что наиболее равномерное деформированное и напряжённое состояние по сечению образца соответствует высоте припуска 12%.

Таблица 9 - Влияние фактора трения на НДС при холодной калибровке



Для значений 12% в случае применения минерального масла и 15% для стеарата цинка и водно-графитовой смазки видно зарождение поднутрения у основания трапеции (таблица 10).

Таблица 10 - Образование дефекта складка

		Смазка		
		Стеарат цинка(0,1)	Графит+вода (0,2)	Минер. масло(0,3)
Высота припуска h относительно ширины пятна контакта L, %	12			
	15			
	18			

Отклонение в виде складкообразования при относительной высоте припуска 18% возникает вследствие перемещения излишка материала в направлении движения калибрующего инструмента С увеличением фактора трения с 0,1 до 0,3 высота припуска, исключающего складкообразование, уменьшается с 13 до 12%. Таким образом, с точки зрения обеспечения равномерного НДС без образования поднутрения и складкообразования рациональной высотой выпуклого припуска будет значение не более 12% от ширины основания припуска L (рисунок 26).

Степень деформации ε

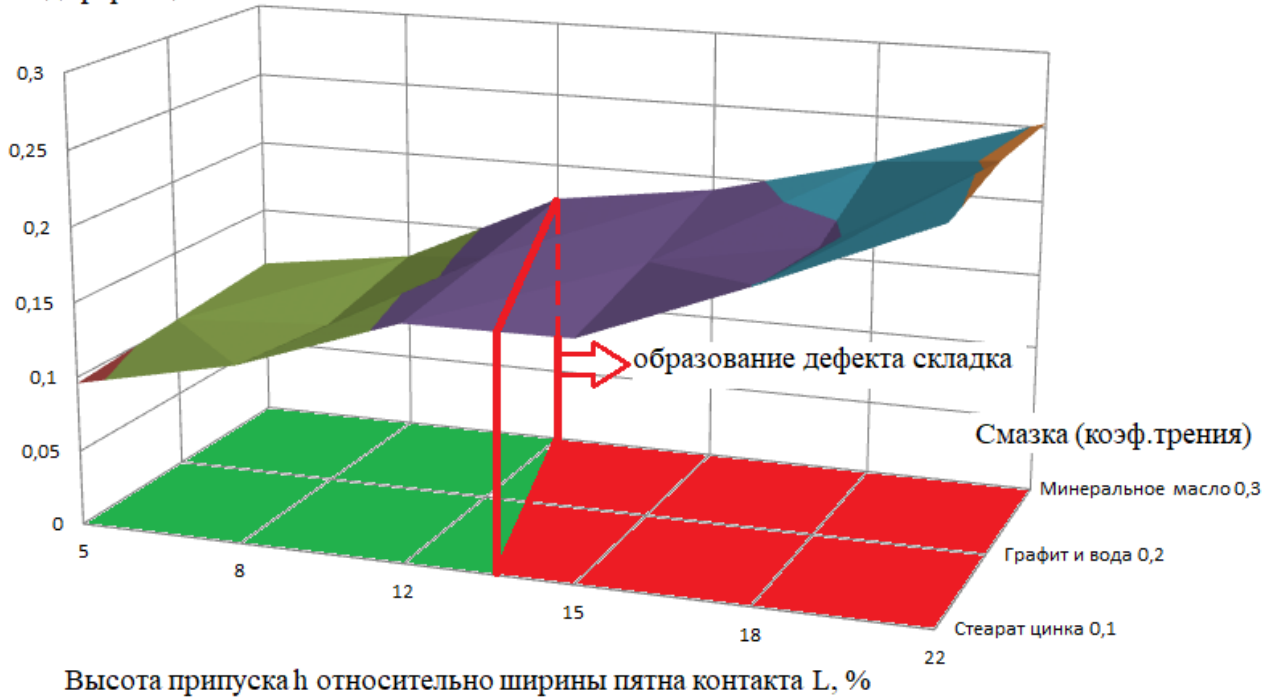


Рисунок 26 – Зависимость значения пластической деформации от высоты припуска и значения фактора трения (смазки)

3.3 Влияние схемы осадки на обеспечение качества поверхности зубчатого венца

Особое внимание при разработке технологии горячей штамповки уделялось операции осадки, т.к. ей отводится функция удаления (сбивания) окалины с нагретой заготовки. Это позволит впоследствии избежать ее заштамповку в поверхность зубчатого венца поковок, которая не подлежит механической обработке. В результате моделирования определялись рациональная схема осадки, обеспечивающие максимально возможное значение пластической деформации на поверхности заготовки, приходящейся на зубчатый венец и бездефектное (без зажимов, складок и т.п.) получение поковок.

Осадка по типовой схеме предложенной Кузнечным заводом ПАО «КАМАЗ» «плоскость-конус», в которой верхний штамп плоский, а нижний имеет форму конуса, приводит к заштамповке окалины на конусной поверхности штампа (рисунок 27). Заштамповка окалины происходит уже на этапе

формирования заготовки осадкой. При деформировании, окалина отделяется с поверхности заготовки и осыпается на нижний инструмент, где конус гравюры штампа заполняется в последний момент, вследствие чего окалина заштамповывается в подповерхностные слои поковки.

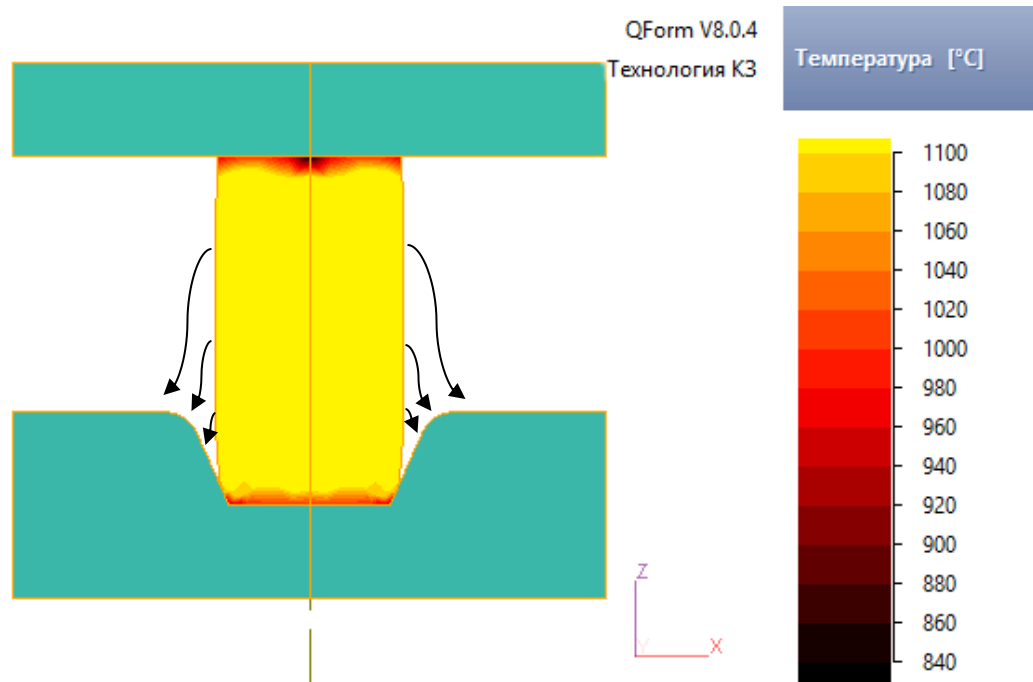


Рисунок 27 – Процесс заштамповки окалины при осадке заготовки в базовом варианте

Определение необходимого объёма заготовки для штамповки детали-представителя проведено по стандартной процедуре [22]. Наиболее приемлемые размеры заготовки определены из максимально допустимого соотношения длины к диаметру заготовки. Условием устойчивости при осадке принято соотношение $H_{заг.} \leq 3D_{заг.}$, где $D_{заг.}$ – диаметр исходной заготовки. Причём, оно верно для заготовки, полученной пилением с минимальной косиной реза (до 0,1 мм). В случае применения рубленой заготовки косина реза достигает значений до 5°, что в свою очередь, снизит отношение до $H_{заг.} \leq 2,5D_{заг.}$. Применение соотношений высоты к диаметру заготовки более указанных приводит эффекту «двойной бочки» при осадке в плоских бойках и к изгибу заготовки с образованием одностороннего заусенца [99,100]. Назначение максимально допустимых по приведённому соотношению размеров заготовки позволит обеспечить

наибольшие степени деформации и, соответственно, интенсивный сбив окалины с поверхности нагретой заготовки на переходе осадки. Форма осаженной поковки должна обеспечивать однозначную укладку в последующий штамповочный ручей и формообразование зубьев путём выдавливания материала от основания к вершине зуба. Получение зубьев выдавливанием вдоль продольной оси зуба приводит к образованию складки и зажима

Штамповку возможно осуществить по трём вариантам (рисунок 28):

1. Окончательная штамповка за один переход с оформлением зубьев в верхней половине штампа
2. Осадка - окончательная штамповка с оформлением зубьев (без намётки отверстия) в верхней половине штампа (два перехода).
3. Осадка - предварительная штамповка с оформлением зубьев в верхней половине штампа, окончательная штамповка с оформлением зубьев в нижнем штампе с получением намётки отверстия (три перехода).

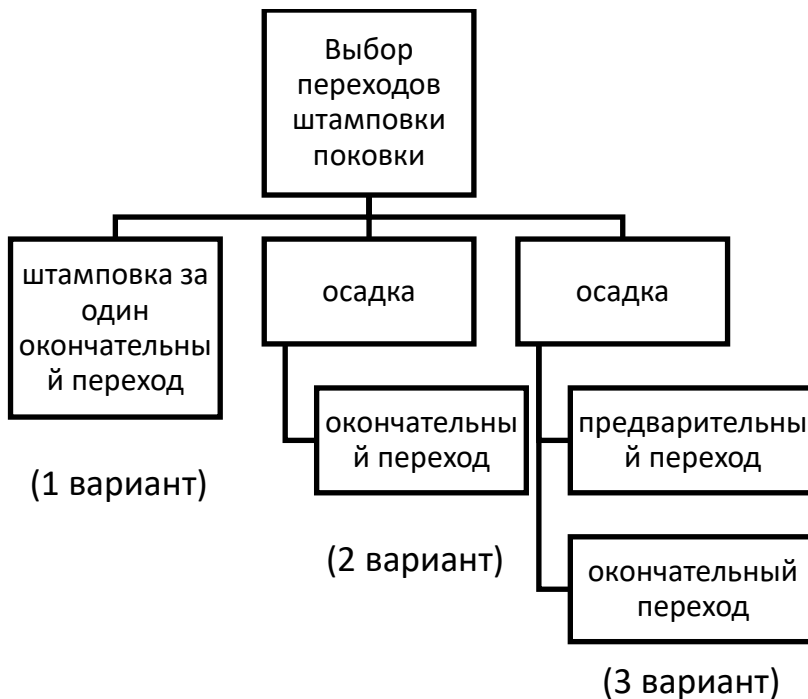


Рисунок 28 – Варианты переходов штамповки

При осадке по схеме «сфера-сфера» в штампе проектируется площадка в полости нижнего штампа под торец заготовки, которая при базировании заготовки обеспечивает её устойчивость (рисунок 30).

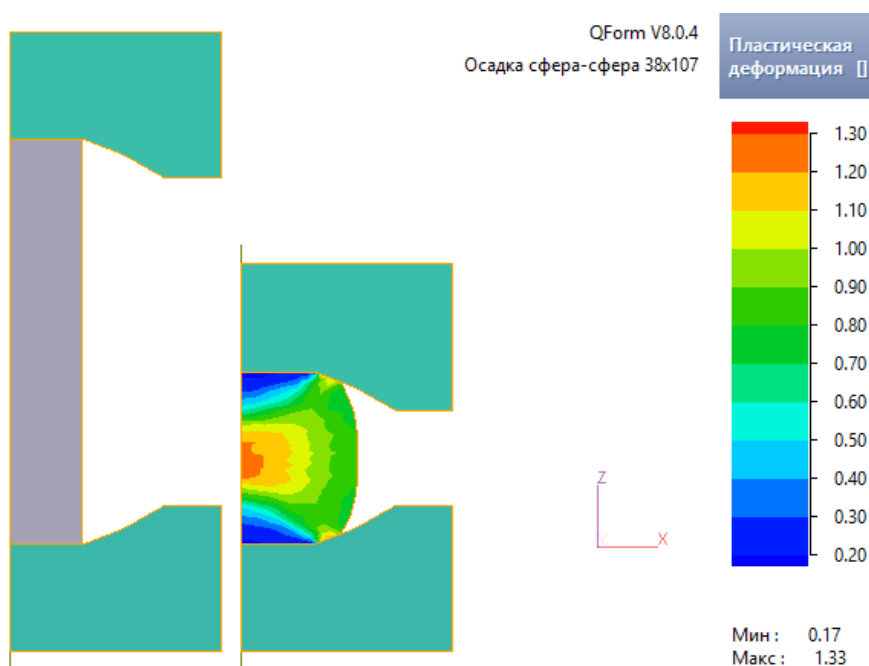


Рисунок 30 – Моделирование осадки по схеме «сфера-сфера»

Осаженная по рассмотренной схеме заготовка базируется в окончательном переходе на нижнем штампе по сферической поверхности, что дает поковке устойчивую однозначную соосную установку. Формообразования зубьев происходит при внедрении зубьев верхнего штампа.

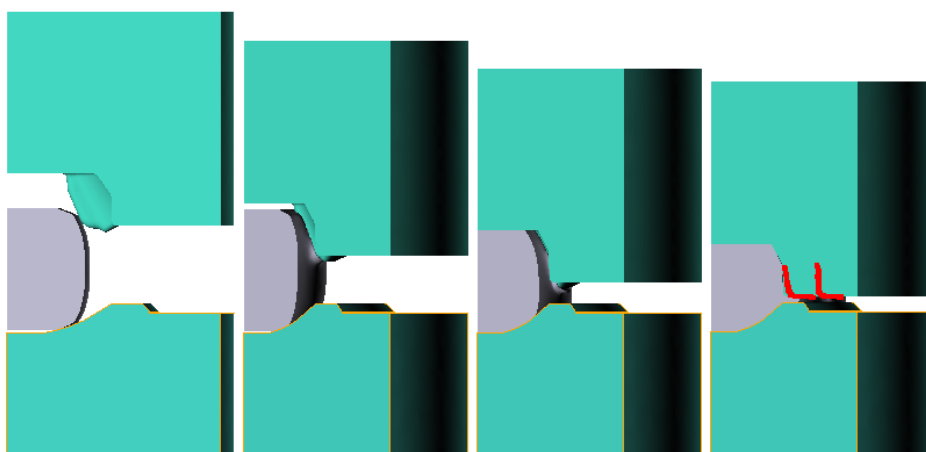


Рисунок 31 – Моделирование процесса штамповки сателлита из заготовки, осаженной по схеме «сфера-сфера»

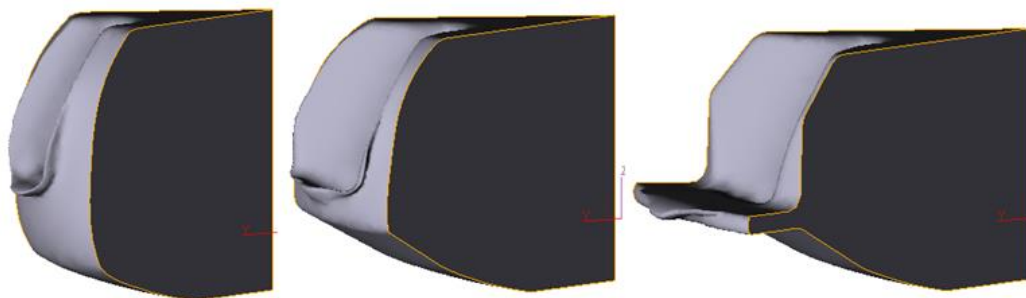


Рисунок 32 – Образование зажимов на поверхности зубьев при штамповке из заготовки, осаженной по схеме «сфера-сфера»

В результате моделирования процесса горячей штамповки по этому варианту установлено образование зажимов на поверхности зуба (рисунок 31). Данный дефект образуется при внедрении зубьев верхнего штампа в заготовку (рисунок 32). В целях избежание образования зажима на поверхности зуба, необходимо чтобы зубья получались путем выдавливания материала в полость, формирующую зубчатый венец, а не внедрением инструмента в осаженную заготовку.

Осадка по схеме «конус-сфера» является комбинацией штампов, где для нижнего штампа используется сферическая форма штампа, а для верхнего используется конусная поверхность под размер диаметра исходной заготовки. Из-за того, что конусная часть расположена наверху, уменьшается вероятность заштамповки окалины при осадке (рисунок 33).

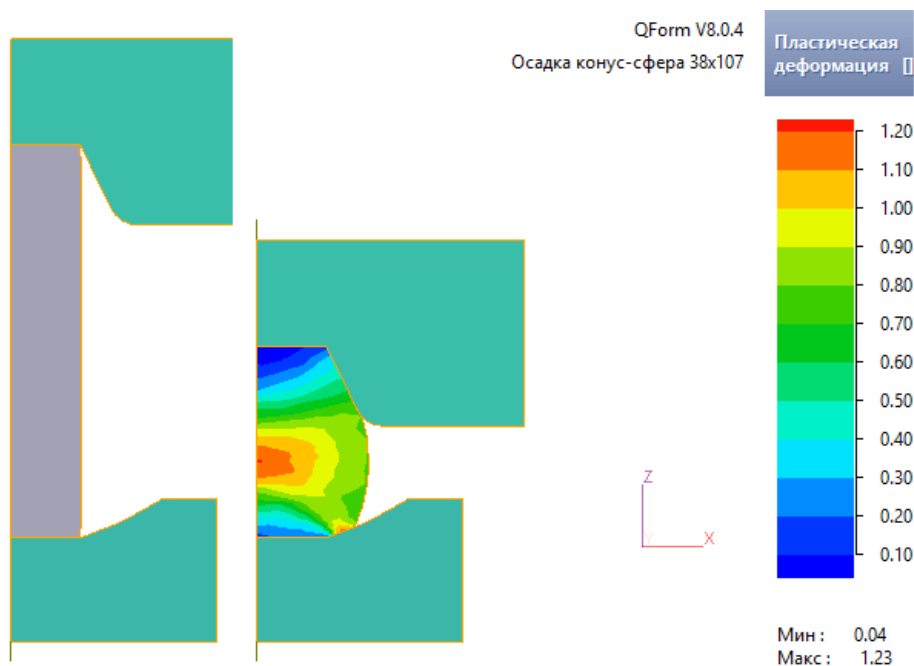


Рисунок 33 - Моделирование осадки по схеме «конус-сфера»

Осадка по схеме «конус-плоскость» представлена на рисунке 34. Здесь нижний штамп выполнен с выемкой для базирования заготовки.

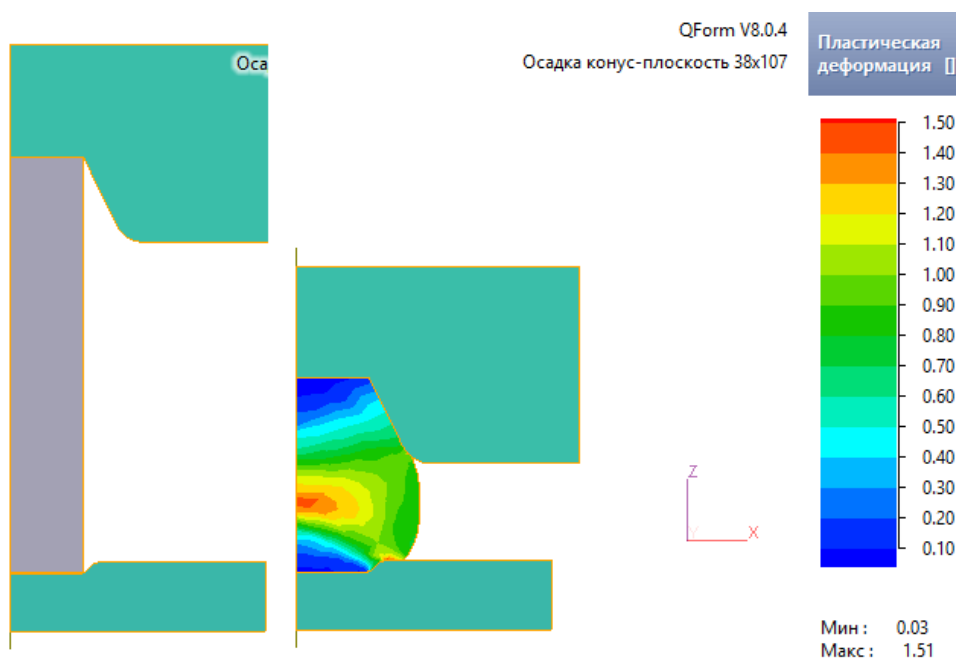


Рисунок 34 – Моделирование осадки по схеме «конус-сфера»

Результаты моделирования осадки позволяют предполагать, что конфигурация штампов и достигаемая степень деформации окажутся достаточными для сбивания окалины с поверхности заготовки.

Для эффективного удаления окалины с поверхности заготовки схема осадки должна удовлетворять следующим требованиям:

1. Обеспечение максимальной степени деформации для эффективного удаления окалины с поверхности заготовки, а именно предпочтительное применение для заготовки с максимально допустимым соотношением длину к диаметру заготовки.
2. Форма осаженого заготовки должна обеспечивать однозначную укладку в последующий штамповочный ручей и формообразование зубьев путем выдавливания материала от основания к вершине зуба. Получение зубьев выдавливанием вдоль продольной оси зуба приводит к образованию складки и зажима.

Основываясь на перечисленных принципах, разработан алгоритм назначения рационального перехода осадки при горячей объёмной штамповке круглых в плане поковок с зубчатым венцом (рисунок 35).

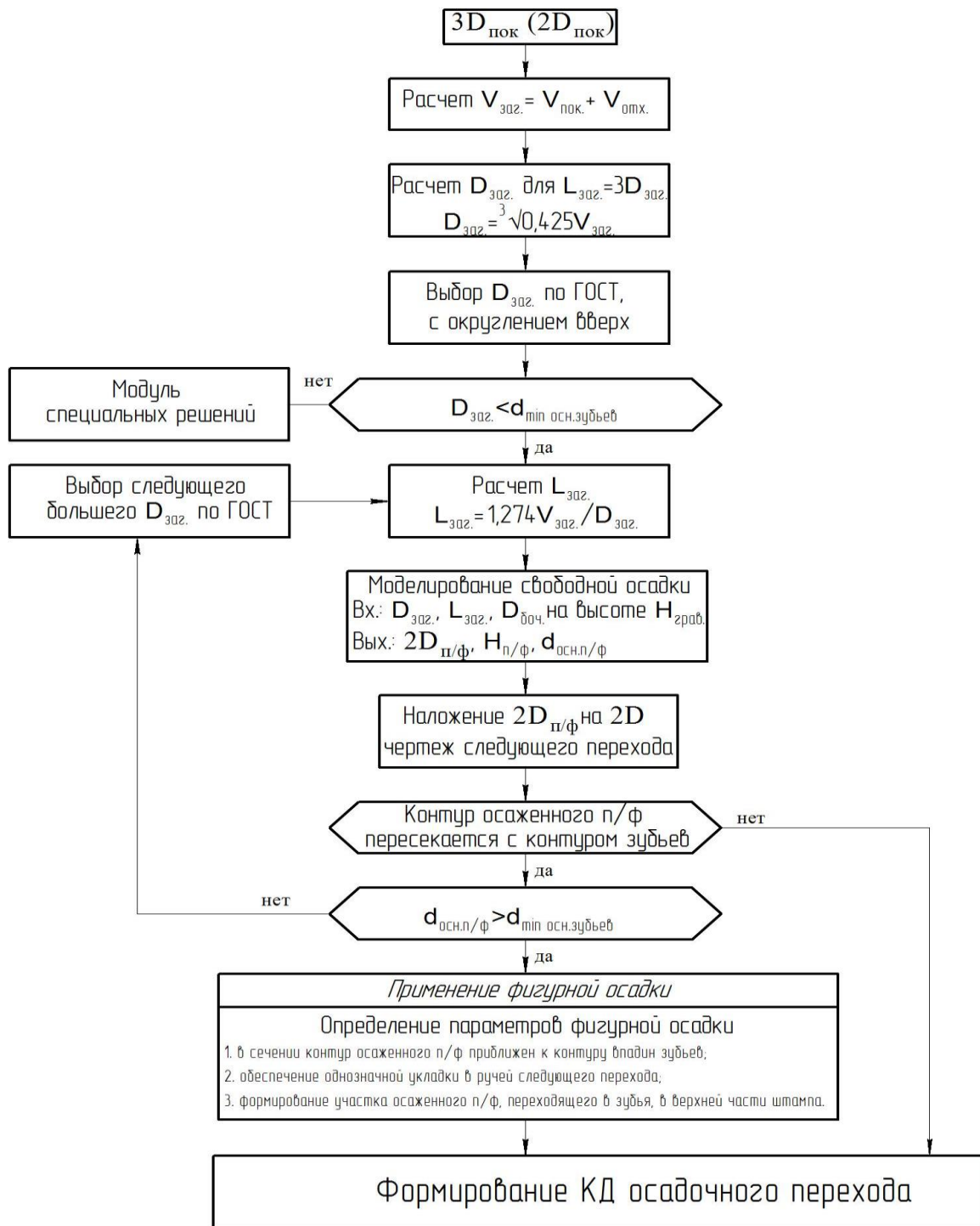


Рисунок 35 - Алгоритм назначения рационального перехода осадки при горячей объёмной штамповке круглых в плане поковок с зубчатым венцом

Согласно предложенному алгоритму на первом и втором шагах осуществляется расчет потребного объёма заготовки, на третьем и четвертом шагах, основываясь на отношении длины к диаметру заготовки равном трем и стандартном (ГОСТ) ряде профилей [102,103], определяется диаметр исходной

заготовки. На пятом шаге алгоритма расчётный диаметр заготовки сравнивается с диаметром у основания зубчатого венца для проверки обеспечения требования о формообразовании выдавливанием от основания к вершине зубьев. В случае если на пятом шаге условие не выполняется, то требуются специальные технологические решения, такие как применение предварительной операций формообразования (протяжка, вальцовка и др.), периодического профиля и т.д. Далее рассчитывается длина исходной заготовки и размеры осаженной в плоских бойках поковки. Для случая если при наложении контура осаженной поковки и перехода с формообразованием зубьев указанные контуры не пересекаются, то формируется конструкторская документация (КД) осадочного перехода. Для случая пересечения контура осаженной поковки и контура зубьев возможен вариант увеличения диаметра исходной заготовки либо применения фигурной осадки.

Большое значение имеет точность массовых и геометрических параметров используемых заготовок [101]. В связи с этим проведено исследование влияния на результат штамповки разброса объёма заготовок с различным качеством поверхности и торцов. Отклонение объёма штампуемой заготовки и качество поверхности торцов заготовки, влияющее на её центрирование в штампе, в основном зависит от типа используемого проката и способа его резки на мерные заготовки. По точности прокат стальной горячекатаный круглый различают согласно ГОСТ 2590-2006 [102]. Для повышения качества и точности поверхности прутков по ГОСТ 14955-77 [103] проводят обточку, шлифование, калибровку волочением, достигаемая при этом точность h8-11.

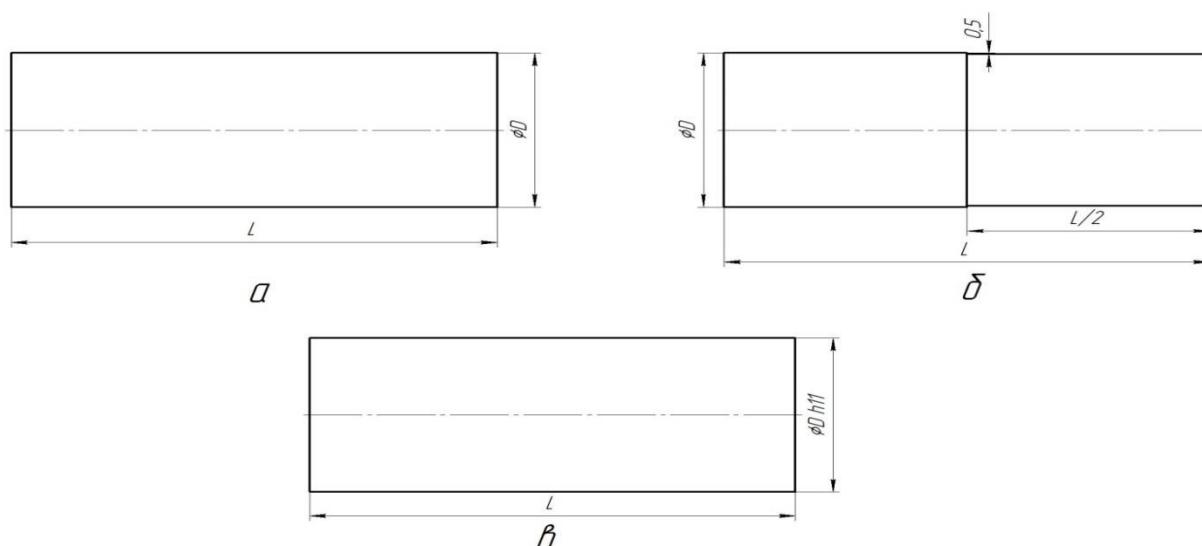


Рисунок 36 – Типы используемых заготовок: а – по ГОСТ 2590, б – частично обточенный из заготовки ГОСТ 2590; в – по ГОСТ 14955-77 по h11 качеству

В ряде случаев для прецизионной штамповки используется заготовка (рисунок 36,в) из проката обычной точности, у которой обтачивается часть длины $l_1 \approx 1/2l$, идущая на формирование необрабатываемой резанием части поковки. На рисунке 36 и в таблице 11 приведены типы заготовок и сведения по отклонению массы $\Delta G_{\text{заг}}$ заготовки в зависимости от точности используемого проката. Масса варьируется от 0,021 до 0,176 кг. Влияние вариации массы (объёма) заготовки $\Delta G_{\text{заг}}$ на вариацию силы деформирования приведена на рисунке 37.

Таблица 11 - Отклонение массы заготовки в зависимости точности заготовки

Заготовка	Отклонение $\Delta G_{\text{заг}}$ массы заготовки от номинального значения			
	Группа точности	рисунок 1, а	рисунок 1, б	рисунок 1, в
Ø60×150мм	Тип заготовки			
	А	0,110	0,109	0,021
	Б	0,154	0,152	
	В	0,176	0,175	

Моделирование проведено в среде QForm для металлопроката обычной точности В1. Например, для заготовки диаметром Ø60 принимаются следующие допуски по диаметру: +0,5 и -1,1мм. Исходя из допускаемых отклонений,

рассчитан объём принятой заготовки для минимально V_{min} и максимально V_{max} возможных допусков.

Способ отрезки заготовки от проката также оказывает влияние на точность массы мерных заготовок. Наиболее эффективными по трудозатратам и распространёнными в массовом производстве является резка на пресс-ножницах. Для случая резки на пресс-ножницах предельные допустимые отклонения формы и размеров заготовки представлены на рисунке 38. Разница по массе между минимально и максимально возможными отклонениями формы заготовки составляет $\sim 0,1$ кг. При этом наблюдается существенное искажение геометрии концевых частей заготовки.

Из графиков сил деформирования (рисунок 37) полученных путем моделирования процесса штамповки из заготовки различного объёма при 1200°C видно, что силы штамповки в окончательном переходе для номинального $V_{ном}$ и максимально V_{max} возможного объёма заготовки сравнительно близки и составляют 9,1 МН. Снижение усилия до 8,2 МН для минимально V_{min} возможного объёма заготовки связано с уменьшением ширины подпора со стороны облойного мостика.

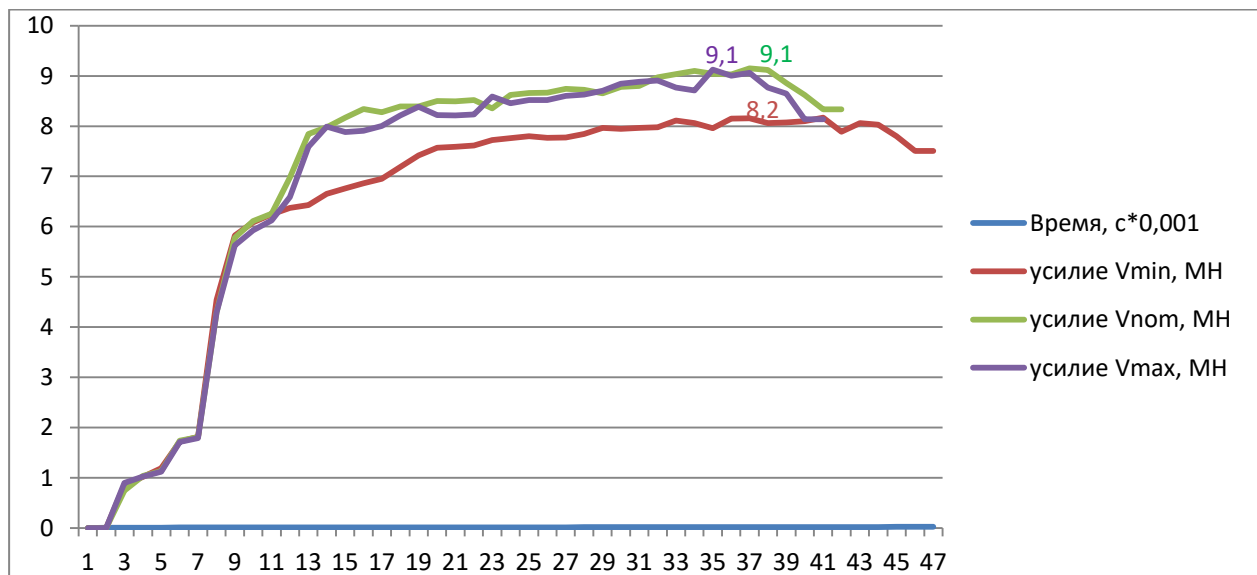
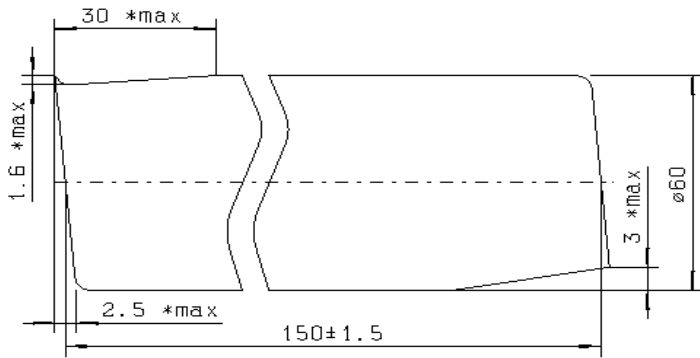


Рисунок 37 - Графики изменения силы штамповки для различных объёмов (V) заготовки



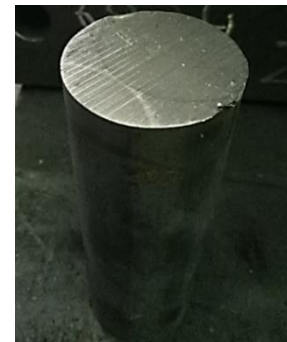
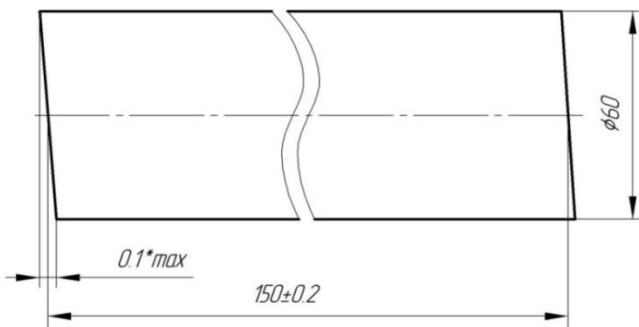
1. Размеры со знаком (*) относятся к обоим концам заготовки
2. Размеры даны в холодном состоянии

а)

б)

Рисунок 38– Заготовка полученная операцией отрезка (рубка) на прессножницах: а) схематическое изображение, б) фактическое состояние торца в зоне резки

В случае отрезки заготовки на дисковом отрезном станке точность подачи металлопроката выше, кроме того минимизированы смятие и косина реза торцов заготовки. Отклонения формы и размеров заготовки для этого случая приведены на рисунке 38. Разница по массе между минимально и максимально возможными отклонениями формы составляет $\sim 0,02$ кг.



а)

б)

Рисунок 39 - Заготовка полученная операцией отрезка (пиление) на дисковом отрезном станке.

Влияние состояния торцевой поверхности заготовки на устойчивость и осесимметричность поковки при осадке (первый переход штамповки) было оценено при моделировании в среде QForm (рисунок 40). Как следует из

результатов моделирования, при осадке рубленной заготовки из-за значительного искажения геометрии торцов при осадке происходит неравномерное течение материала осаживаемой части заготовки, приводящее к искажению (эксцентриситету) ее относительно оси штампа [102].

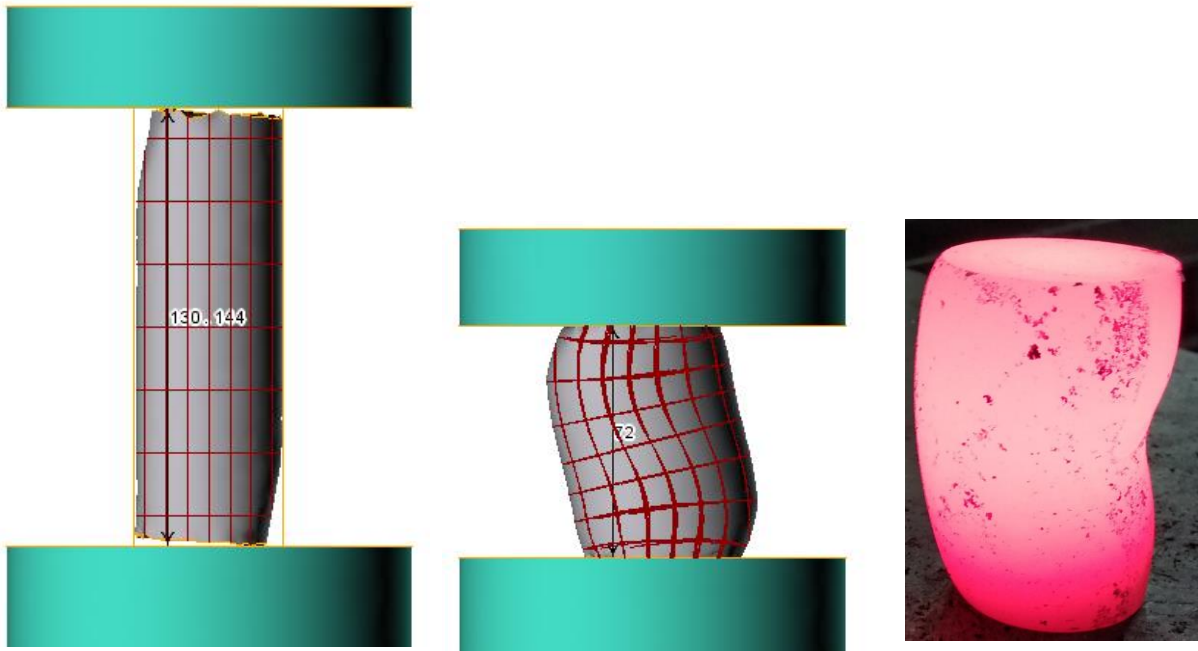


Рисунок 40- Распределение материала при осадке рубленной заготовки. Меньшее по сравнению с рубкой на пресс-ножницах отклонение по косине торца заготовки для случая резки на пилах обеспечивает лучшую устойчивость заготовки при операции осадки, что минимизирует риск неравномерного распределения материала при формообразовании переходов и возникающей вследствие этого разновысотности поковки. В свою очередь это прямо влияет на точность изделия, получаемого штамповкой [104].

3.4 Результаты исследований по обеспечению качества поверхности зубьев конических шестерён

Разработанные мероприятия по обеспечению качества поверхности зубьев шестерён были опробованы при экспериментальной прецизионной штамповке сателлитов дифференциала грузового автомобиля. При этом варьировались температура нагрева под штамповку (1100, 1000, 950°C) и среда в которой

нагревалась заготовка (воздух, обеднённая кислородом среда). При нагреве заготовки перед горячей штамповкой была применена огневая завеса у входного отверстия проходного индуктора для снижения доступа кислорода в область нагрева.



Рисунок 41 – Огневая завеса у входного отверстия в индукционный нагреватель.

Температура нагрева заготовки под горячую объёмную штамповку назначалась с учётом результатов имитационного моделирования (рисунок 42), представленных в таблице 12.

Снижение температуры нагрева заготовки до 900°C также позволит снизить окалинообразование, оставаясь в пределах температуры, обеспечивающей бездефектную горячую обрезку облоя [106, 107, 108]. Однако с учётом остывания заготовки при перемещениях по транспортёрам между индукционным

нагревателем, ковочным прессом и обрезным прессом в производственных условиях для апробации назначена температура 950⁰С.

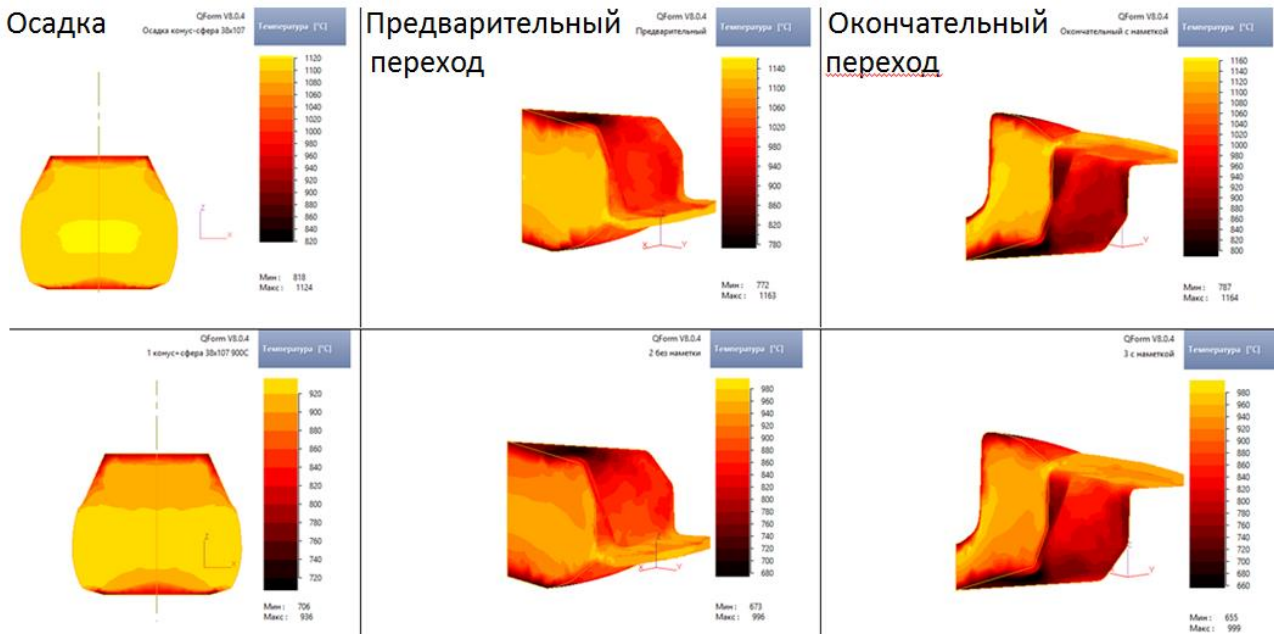


Рисунок 42 - Визуализация результатов моделирования изменения температуры по переходам штамповки

Таблица 12 - Результаты моделирования изменения температуры по переходам штамповки

Переход штамповки	Т°С у основания зуба	Т°С в области пятна контакта	Т°С у вершины зуба
Нагрев заготовки до 1100 °С			
Предварительный	988	1011	1027
Окончательный	917	920	933
Нагрев заготовки до 900 °С			
Предварительный	873	871	888
Окончательный	818	823	852

Также при проектировании технологического процесса были учтены рекомендации, формализованные в виде алгоритма (рисунок 43) [109]:

1. Размеры заготовки назначаются с максимально возможным отношением $L_{заг.} / D_{заг.}$, что обеспечит высокую степень деформации (сбивание окалины);
2. Расположение осаженой поковки в штампе должна обеспечивать распределение свободных поверхностей со сбитой окалиной в зону формирования чистовых поверхностей (зубьев);

3. Размеры осажённой поковки должна обеспечивать однозначную укладку в ручей следующего перехода штамповки.

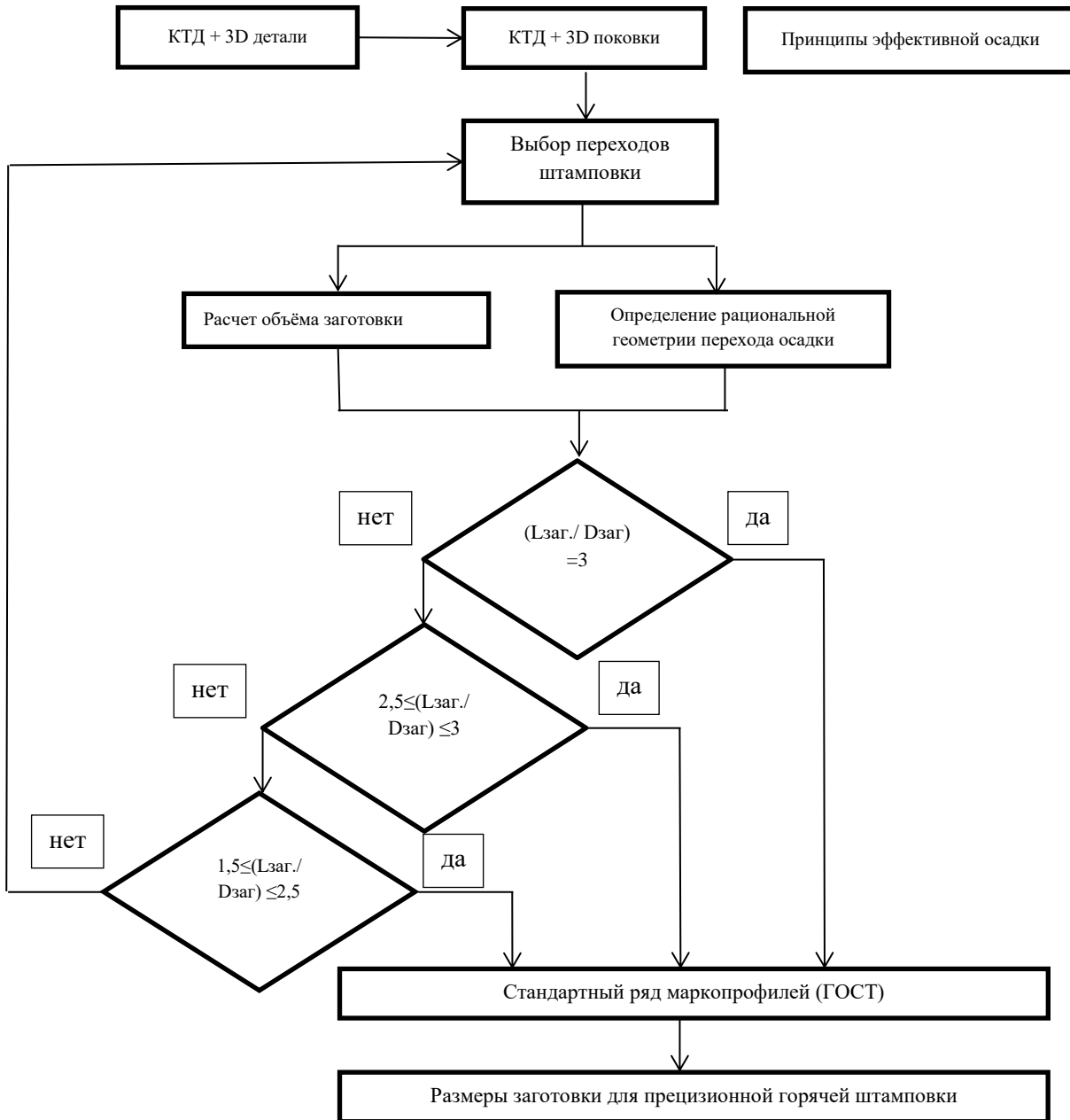


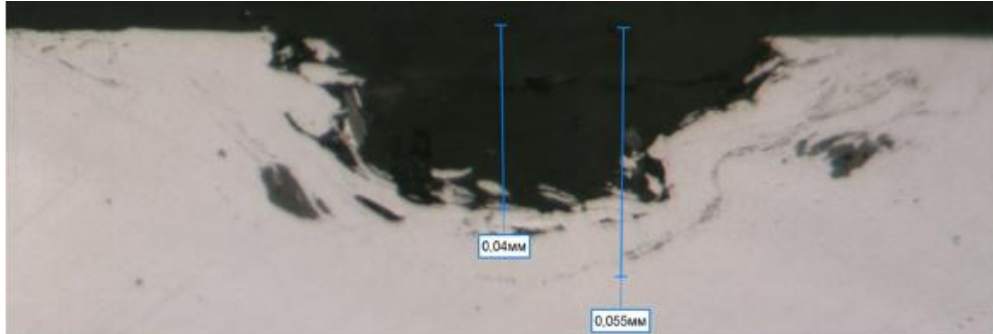
Рисунок 43 – Алгоритм назначения размеров заготовки для горячей объёмной штамповки

На полученных поковках был проведён металлографического анализа на соответствие требованиям по глубине поверхностных дефектов:

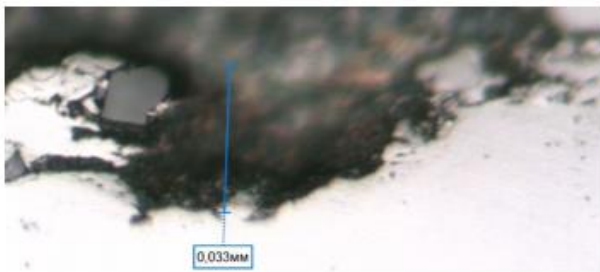
- на обрабатываемых поверхностях до половины фактического одностороннего припуска;

- на поверхности профиля зуба дефекты в пределах допусковых отклонений от размерной точности.

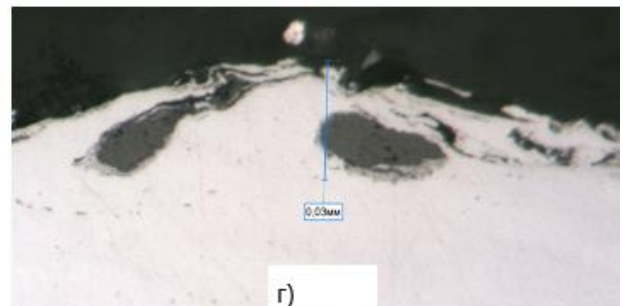
Характерная морфология частиц заштампованной окалины приведены на рисунке 44.



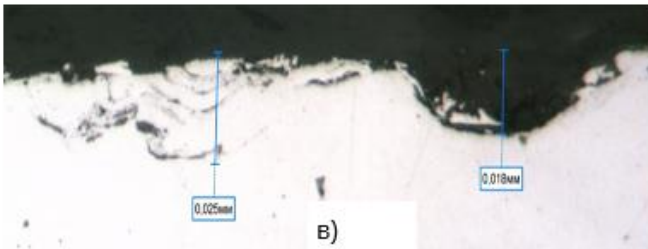
а)



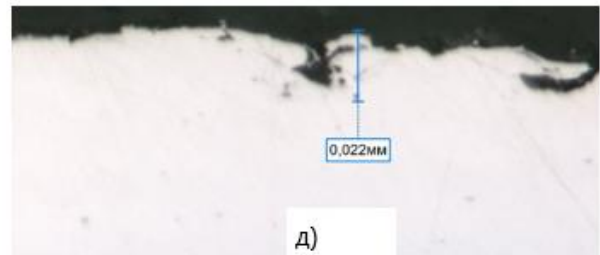
б)



г)



в)



д)

Рисунок 44 - Заштамповка окалины на калиброванной поверхности зуба детали: а) по типовой технологии; б), г) при нагреве до 950°C без малоокислительной атмосферы; в), д) при нагреве до 950°C в малоокислительной атмосфере

Влияние исследуемых факторов на качество получаемых в результате опытной штамповки поковок оценивалось через глубину заштампованной окалины и полостей от выпавшей с калиброванной поверхности зуба окалины. Технологические режимы операций прецизионной штамповки (горячей объёмной штамповке с последующей холодной калибровкой повышенной точности) и соответствующие им результаты исследований, проведенных в лаборатории

обработки материалов технологического центра ПАО КАМАЗ, приведены в таблице 13.

Таблица 13 - Сводная таблица результатов экспериментальной прецизионной штамповки поковок спутников

№ п/п	Сталь	Технологические режимы	Наличие дефектов заштампованная окалина/полости от выпавшей с калиброванной поверхности зуба окалина, мм
1	18ХГР	с горелкой*, 1000°С, ТО КЗ***, 2-ая калибровка	0,054/0,076
2		с горелкой*, 1100°С, ТО КЗ***, 2-ая калибровка	0,056/0,033
3		без горелки**, 1000°С, охл. в воде, ТО КЗ***, 2-ая калибровка	0,062/0,1
4		с горелкой*, 950°С, ТО ТГП, 2-ая калибровка	0,022/0,005
5		без горелки**, 1100°С, ТО КЗ***, 2-ая калибровка	0,062/0,04
6		с горелкой*, 1000°С, ТО ТГП, 2-ая калибровка	0,026/0,042
7		без горелки**, 1000°С, ТО КЗ***, 2-ая калибровка	0,067/0,024

* - сжигание газа перед входным отверстием индуктора нагрева заготовок под штамповку для создания малоокислительной атмосферы;

** - типовая технология нагрева заготовок в индукторе без создания малоокислительной атмосферы;

*** - изотермический отжиг в агрегате HОLCROFT;

ТО ТГП – изотермически отжиг на агрегате IBSEN;

1100, 1000, 950°С – температуры нагрева заготовки под штамповку;

2-ая калибровка – вторая калибровка поковки после термической обработки и очистки от окалина.

Выводы по разделу

1. Конфигурация плоскостей подвергаемых после горячей объёмной штамповки холодной плоскостной калибровке существенно влияет на распределения параметров НДС в приконтактных областях деформируемой заготовки.

2. Сила необходимая для калибровки выпуклого припуска ниже в 1,20-1,30 раза чем при калибровке припуска вогнутой формы.

3. Установлены зависимости интенсивности напряжений в центральной области торца образца от формы припуска, степени деформации и температуры нагрева заготовки перед деформацией. Выпуклая форма припуска обеспечивает наибольшее по сравнению с эквидистантной и вогнутой формами значение сжимающих напряжений в центральной области торца образца.

4. Установлена рациональная высота выпуклого припуска для обеспечения равномерного напряжённо-деформированного состояния без образования поднутрения и складкообразования у ножки зуба. Высоту припуска следует назначать не более 12% от ширины основания припуска.

5. Разработан алгоритм назначения рационального перехода осадки при горячей объёмной штамповке круглых в плане поковок с зубчатым венцом.

6. Форма торцов заготовки должна обеспечивать однозначную укладку осаженной поковки в ручей следующего перехода штамповки, что достигается резкой на пилах;

7. Минимальные отклонения массы заготовки достигаются при использовании обточенного проката и резке мерных заготовок на пилах.

8. Температура нагрева под штамповку, а также наличие или отсутствие малоокислительной атмосферы в индукторе при нагреве существенно сказываются на величине заштампованной окалины и размер полостей от окалины на поверхности профиля зуба. Снижение температуры начала штамповки с 1100°C до 950°C при нагреве без малоокислительной атмосферы

приводит к уменьшению глубины заштамповки окалины с 0,055 до 0,03мм. Применение при этих же температурах малоокислительной атмосферы снижает указанные параметры с 0,055 до 0,022мм, а размеры полостей с 0,04 до 0,018мм. Данные приведены для стали 18ХГР.

9. Сформировавшаяся в процессе ГОШ и последующей калибровки вне зависимости от режимов обработки макроструктура эквидистантна профилю зуба (волокна огибают профиль зуба).

10. Разработаны рекомендации по выбору параметров ГОШ, обеспечивающих повышенную точность и чистоту поверхности зубчатого венца конических шестерён:

- качество поверхности металлопроката - 1 группа в обточенном состоянии или обточка участка заготовки, приходящегося на зубчатый венец;
- отрезка заготовки пилением;
- размеры заготовки назначаются с максимально возможным отношением длины к диаметру;
- безокислительный нагрев обязателен для штамповки за 1 переход;
- малоокислительный нагрев требуется для штамповки за 2 или 3 перехода;
- температура нагрева заготовки перед штамповкой требуется назначать исходя из марки материала и количества переходов не менее 950°C.

Для практической реализации прецизионной штамповки (ГОШ и последующей холодной калибровки повышенной точности) при проектировании чертежа и 3D модели поковки на обрабатываемые поверхности припуски и допуски назначены согласно ГОСТ 7505-89[110], а на поверхности зубьев в области формирования пятна контакта форма и значение припуска под последующую холодную калибровку назначаются исходя из рекомендации - выпуклая форма припуска высотой 12% от ширины пятна контакта.



Рисунок 46 – Комплект штампового инструмента для горячей объёмной штамповки «Сателлит межколесного дифференциала».

В результате совмещения 3D_{поковки} и конфигурации припуска на калибровку в CAD системе получена твердотельная модель с зубчатым венцом поковки после ГОШ под последующую холодную калибровку повышенной точности. Далее в CAD системе формировалась твердотельная модель 3D_{штампа} гравюры вставки калибровочного штампа, как негативный отпечаток 3D_{детали}. На рисунках показаны вставки штампа для горячей объёмной штамповки и вставка для холодной калибровки сателлита. Результат сканирования калибровочной вставки и сравнение с идеальной 3D моделью штампа показало полное совпадение по формообразующей поверхности зубьев(рисунок 48)



Рисунок 47 – Вставка для холодной калибровки «Сателлита межколесного дифференциала»

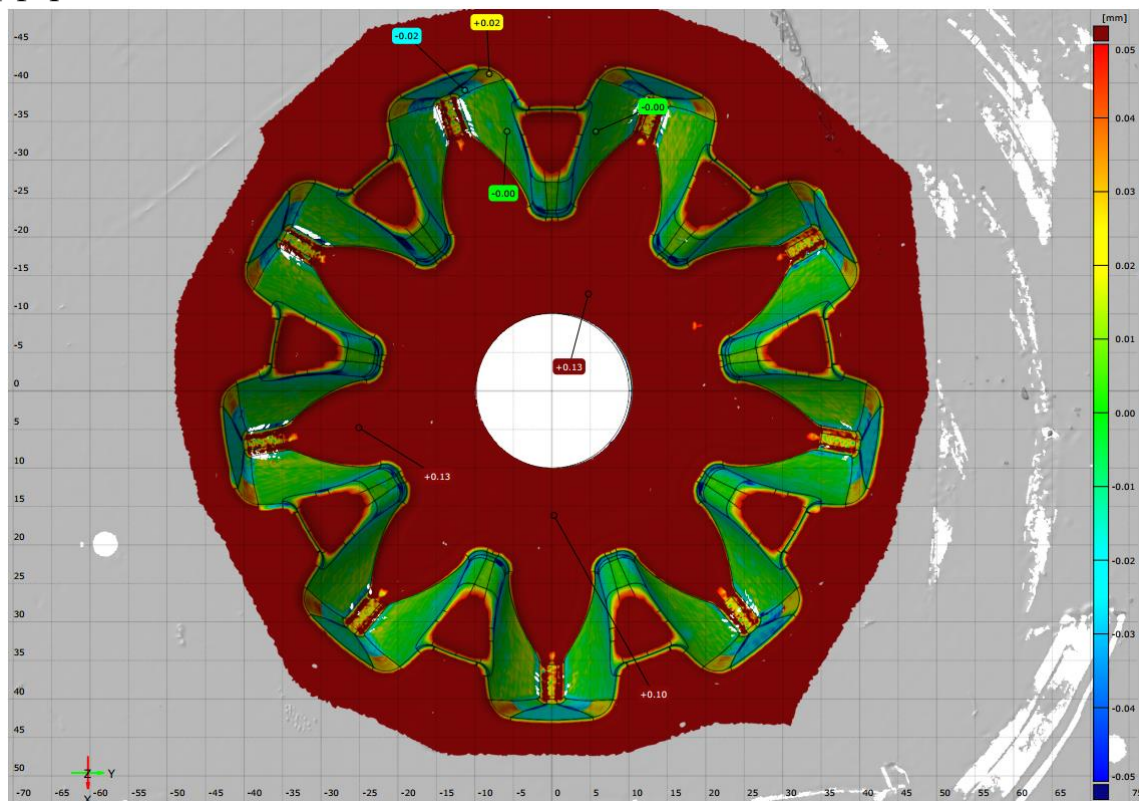
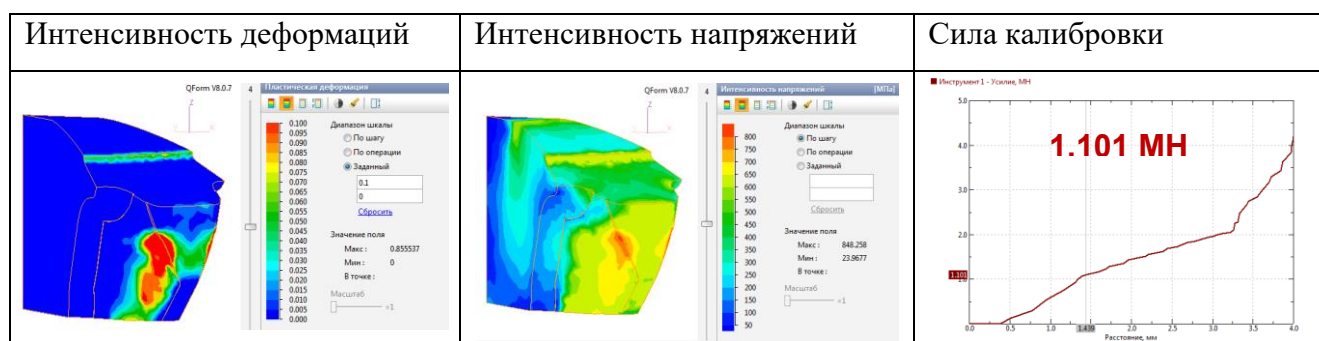


Рисунок 48 – Результаты сканирования калибровочной вставки для поковки «Сателлит межколесного дифференциала» и сравнение с идеальной 3D моделью штампа

В таблице 14 приведены визуализация расчёта интенсивности деформаций, интенсивности напряжений в виде полигонов их распределения. Моделирование показало благоприятное распределение деформаций, так как максимальные деформации сосредоточены в области центре пятна контакта[111]. Скачкообразное увеличение силы калибровки обусловлено окончанием деформирования припуска и увеличением площади поверхности взаимодействия заготовки и штампового инструмента в области зубчатого венца. Указанное наблюдение возможно применить в случае автоматизации процесса холодной калибровки повышенной точности для автоматической остановки хода ползуна пресса при достижении назначенной силы калибровки[112,113,114].

Таблица 14 - Визуализация расчётов интенсивности деформаций, интенсивности напряжений в виде полигонов их распределения



Эффективность принятых решений подтверждается результатом 3D сканирования штампованных сателлитов (рисунок 49). Отклонения размеров по профилю зубьев в области пятна контакта не превышает 0,03 мм, что удовлетворяет допуску в конструкторской документации. Результаты сканирования поковок после калибровки и сравнение с идеальной 3D моделью поковки представлены в приложении. Уменьшение глубины заштамповки окалины по результатам лабораторных исследований составило 60% с 0,063 до 0,025мм.

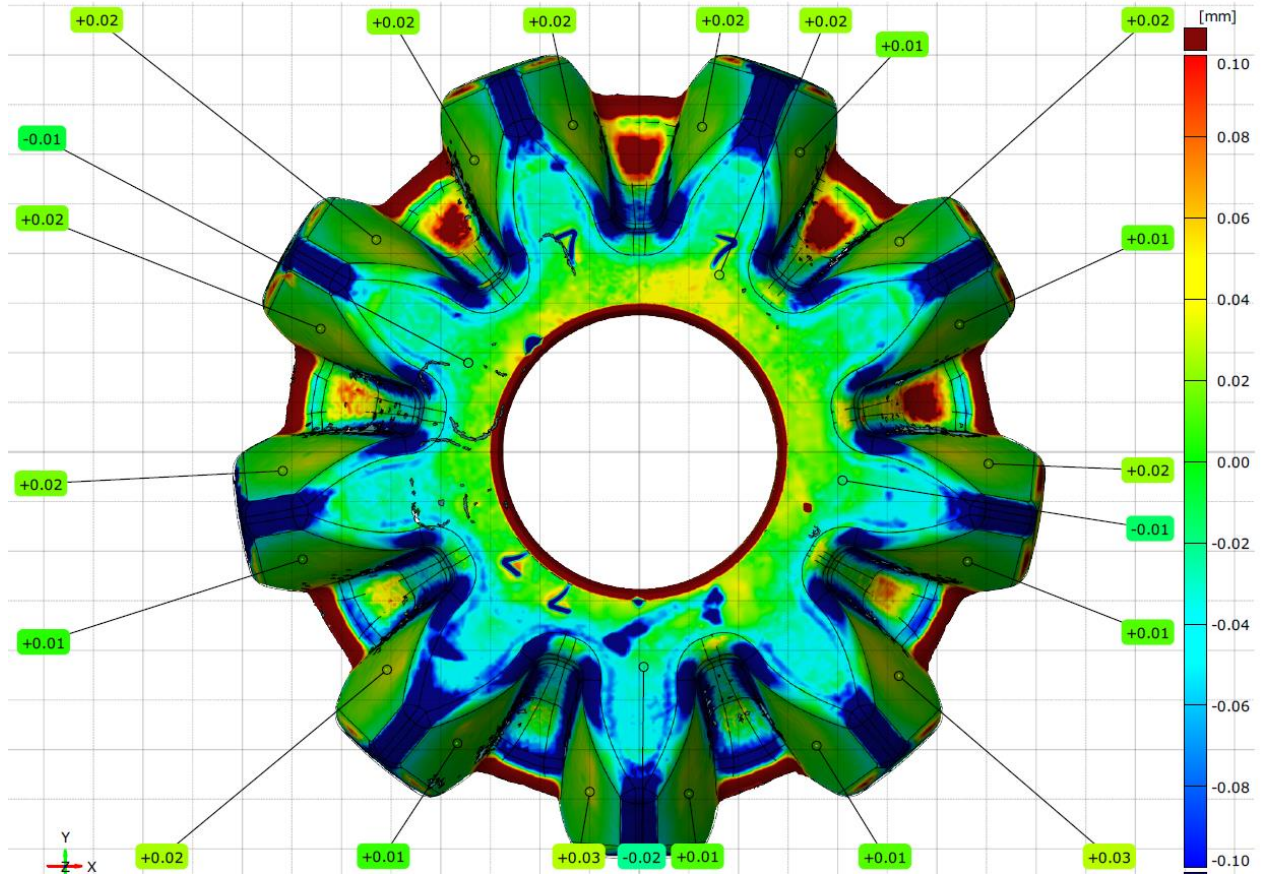


Рисунок 49– Результаты сканирования детали Сателлит и сравнение с идеальной 3D моделью детали

По результатам стендовых испытаний проведенных по утвержденной научно-техническим центром ПАО КАМАЗ программе-методике №37-104-17-1375 соответствующей ГОСТ Р 53445-2009 «Автомобильные транспортные средства. Передачи ведущих мостов. Методы стендовых испытаний» долговечность межколесного дифференциала (рисунок 50), укомплектованного полуосевыми шестернями и сателлитами, изготовленными методом прецизионной штамповки (горячей объёмной штамповки и последующей холодной калибровки) составила 108 часов 30 минут, что в 2,5 раза превысило долговечность межколесного дифференциала, укомплектованного полуосевыми шестернями и сателлитами, изготовленными по традиционной технологической схеме с механической обработкой зубьев.



Рисунок 50 – Межколесный дифференциала, укомплектованный полуосевыми шестернями и сателлитами

Выводы по разделу

Обобщая полученные результаты апробации можно сделать следующие выводы:

1. Отклонения размеров по профилю зубьев в области пятна контакта не превышает 0,03 мм, что удовлетворяет требованиям конструкторской документации.

2. Долговечность межколесного дифференциала, укомплектованного полуосевыми шестернями и сателлитами, изготовленными методом прецизионной штамповки (горячей объёмной штамповки с последующей холодной калибровкой повышенной точности) составила 108 часов 30 минут, что в 2,5 раза превышает долговечность межколесного дифференциала, укомплектованного полуосевыми шестернями и сателлитами, изготовленными по традиционной технологической схеме с механической обработкой зубьев.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для исключения механической обработки зубчатых венцов при изготовлении конических колёс и улучшения их эксплуатационных свойств разработан технологический процесс, включающий горячую объёмную штамповку с последующей холодной калибровкой, и теоретически установлены связанные с ним закономерности, что в совокупности представляет решение научной задачи, имеющей важное значение в автомобилестроении.

Основные результаты и выводы

1. Для исключения механической обработки зубчатых венцов при изготовлении конических колёс и улучшения их эксплуатационных свойств разработан процесс прецизионной штамповки, включающий горячую объёмную штамповку полуфабриката с последующей холодной калибровкой, и установлены связанные с ним закономерности, что в совокупности является решением задачи, имеющей важное значение в автомобилестроении.

2. Применительно к разработке процесса прецизионной штамповки использовался системный подход с применением метода экспертных оценок, представленный в виде матрицы значимости параметров системы {М,З,О,Т,И,П,С} с точки зрения точности и качества поверхности получаемых поковок.

3. Выбраны технологические приёмы, существенно уменьшающие появление дефекта типа вкатанная или заштампованная окалина при горячей штамповке: применение металлопроката первой группы качества поверхности или частичная обточка заготовки, снижение температуры штамповки до 1050°С и использование малоокислительного нагрева, а также разработана схема осадки для интенсивного сбивания окалины с поверхности заготовки, находящейся в области формирования зубчатого венца. Результаты лабораторных исследований образцов, полученных в ходе опытных работ, показали уменьшение глубины заштамповки окалины на 60% с 63 мкм до 25 мкм.

4. Предложена форма выпуклого припуска на поверхностях полуфабриката, обеспечивающая их упрочнение в процессе устранения выпуклости холодной калибровкой. Для имитации процесса использован конечно-элементный анализ выравнивания выпуклого торца цилиндра, данные его локального упрочнения, преобразованные в регрессионную зависимость от размеров припуска, степени деформации и температуры, а также аналогичного моделирования на образцах трапецеидального сечения с применением различных смазок позволили установить предельную высоту стрелки припуска на зубчатых венцах – 12% от ширины основания, при которой калибровка поверхностей с нанесённым стеаратом цинка или графитом не образует складок и поднутрений.

5. По результатам стендовых испытаний, проведённых в соответствии с ГОСТ Р 53445-2009, показано повышение долговечности межколёсного дифференциала до 2,5 раз по сравнению с зубьями шестерён, полученными обработкой резанием. Это стало возможным благодаря сформировавшейся волокнистой макроструктуре, огибающей профиль зуба, мелкозернистой микроструктуре и уменьшению глубины заштамповки окалины на калиброванной поверхности зубьев поковки.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Золотов А.М. Основы проектирования технологии прецизионной многопереходной горячей пластичекой обработки с использованием компьютерного проектирования. Спб.: Изд-во СПбГПУ, 2002 ISBN 5-7422-0264-4
2. Алифанов А.В., Калугин Ю.К., Демянчик А.С. Разработка и исследование технологии и оборудования для штамповки высокоточных конических зубчатых шестерён. Вестник Брестского государственного технического университета. Машиностроение. 2012. № 4 (76). С. 5-9.
3. Алленов М.Г., Белокуров О.А. Влияние направления волокон макроструктуры стальных поковок на износ полученных из них изделий // Вестник МГТУ «Станкин» № 4 (39), 2016. – С. 67-70
4. Clarc W.G. In Fracture Mechanics in Fatigue – Experimental Mechanigs 11, September 1991, p. 421–428
5. Оптимизация технологических процессов и конструирование штампов для холодного и полугорячего выдавливания: Методические рекомендации/ З.А.Евстратов, С.М.Иванов, З.Я.Кузьменко и др.-ЗНИИТЗМР, 1939.- 192с.
6. Атрошенко А. П., Федоров В. И. Материалосберегающие технологии кузнечно-штамповочного производства. — Л.: Машиностроение. Ленингр. отд-ние, 1990. —279 с.: ил.
7. Патент SU 1676735. Поковка для получения конических зубчатых шестерён/ Калашников А. С., Насенков А. С., Стольников М. Е., Делиховский В. Д., Ласунин Б. Д., Шило Э. М., Петров С. Б.; Заявл. 13.10.1989. Оpubл. 15.09.1991
8. Патент SU №1729677. Способ изготовления конических зубчатых шестерён/ Желтонога Л. А., Ластовенко А. А., Макушок Е. М.; Заявл. 14.02.1990. Оpubл. 30.04.1992

9. Востров В.Н., Шекерджиев Э.Р., Порхун А.В. Устройство для накатывания зубчатых профилей. авторское свидетельство SU 1811953, заявка №4920234 от 30.04.1993
10. Витренко О.С. Методика выбора геометрии накатного инструмента в зависимости от геометро-кинематических параметров накатки. Известия КГТУ. 2018. № 49. С. 241-248.
11. Устройство для калибровки зубьев шестерён. Л.М.Натапов, Е.И.Жучков. Авторское свидетельство №432958
12. Аржанов А.Ф., Муконин В.Ф., Асмян Г.А. Инструмент для калибровки зубчатых профилей. Авторское свидетельство SU 1400744, заявка № 4064842 от 30.04.1986.
13. Точная объёмная штамповка изделий из алюминия и стали, главным образом при использовании технологии штампования в закрытых штампах. Хиодзи ЙОСИМУРА, Кацухиса ТАНАКА и Чан Чин ВАНГ Корпорация «НИЧИДАИ», Такиги, Киотанабе, Киото 610-0341, Япония
14. Овчинников А. Г., Дрель О. Ч., Поляков И. С. Штамповка выдавливанием поковок с боковыми отростками и фланцами // Кузнечно-штамповочное производство. - 1979. - № 4. - С. 10-13.
15. Структурно-параметрическая оптимизация при обеспечении эффективности технологических процессов объёмной штамповки. Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук, Шibaков В.Г., Москва – 1993
16. Золотов А.М. Научные основы проектирования технологии высокоточной многопереходной горячей пластической обработки с использованием компьютерного моделирования. Автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук. Санкт-Петербург, 2003.
17. Кашапова Л.Р. Автоматизированная оценка надежности технологического процесса листовой штамповки / Кашапова Л.Р., Шibaков В.Г., Панкратов

- Д.Л, Виноградов А.И. // Вестник машиностроения, М.: «Машиностроение».- №4.-2016.-С.56-59
- 18.Аксенов Л.Б. Системное проектирование процессов штамповки. Л.:Машиностроение, Ленингр. Отд-ие, 1990-284с.
- 19.Kasharova L.R. Providing the quality of shaped machine elements at the design phase of the sheet stamping technological process/ Kasharova L.R., Pankratov D.L., Shibakov V.G., Vinogradov A.L.
- 20.Антонюк Ф.И. Анализ и обеспечение высокой точности холодной объёмной штамповки на прессах научно обоснованным выбором жесткости элементов технологической системы: Автореферат на соискание ученой степени доктора технических наук. – Москва, 2004. – 36 с.
- 21.Крук А.Т. Разработка научно обоснованных технических решений по повышению точности поковок, создание на их основе и промышленное внедрение тяжелых кривошипных горячештамповочных прессов: Автореферат на соискание ученой степени доктора технических наук. – Воронеж, 2006. – 36 с.
- 22.Семенов Е.И. Ковка и объёмная штамповка: Справочник /Под ред. Е.И. Семенова: В 2 т. - М.: Машиностроение, 1986.- Т2.- 563с.
- 23.Clarc W.G. In Fracture Mechanics in Fatigue – Experimental Mechanigs 11, September 1991, p. 421–428
- 24.Juvinall R.C. Stress, Strain and Strength. New York: McGraw-Hill; 2017, p.44.
- 25.Губинский В.И., Минаев А.Н., Гончаров Ю.В. Уменьшение окалинообразования при производстве проката – К.:Техника, 1981 – 135с.
- 26.Северденко В.П., Макушок Е.М., Равин А.М. Окалина при горячей обработке материалов давлением. М.: Материалургия, 1977. 208 с.
- 27.Павлов И.М. Теория прокатки. -М.: Материалургиздат,1950. - 610 с.
- 28.В. Г. Шибаков, Д. Л. Панкратов, Р. В. Шибаков, Р. С. Низамов. Особенности формирования служебных свойств зубчатых передач, получаемых прецизионной штамповкой. Черные материалы, 2020 г., № 7 (1063), с.40-45

- 29.ГОСТ 4543-2016. Прокат из легированной конструкционной стали. Технические условия - М.: Государственный комитет СССР по управлению качеством продукции и стандартам, 1996.-30 с.
- 30.Технологический справочник по ковке и объёмной штамповке. Под редакцией М. В. Сторожева, Москва, 1969г
- 31.Ребельский А. В. Основы проектирования процессов горячей объёмной штамповки. -М.: «Машиностроение», 1965. - 248 с.
- 32.Яловой Н.И., Тылкин М.А., Полухин П.И., Васильев Д.И. Тепловые процессы при обработке материалов и сплавов давлением. Учеб. Пособие для вузов. М., "Высшая школа", 1973. 631 с. с ил.
- 33.Siebel, E. and Fangmeier, E. Untersuchungen Ueber den Kraft-bedarf beim Pressen und Lochen, Mitt. K. W. I. Eisenforsch., 13. 1931, 29.
- 34.V G Shibakov, D L Pankratov, R S Nizamov and R A Hairullin. Surface quality assurance of ring gear during precision stamping of gearwheels. IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 412 (2018) 012073 doi:10.1088/1757-899X/412/1/012073
- 35.Hibbe P., Hirt, G. Analysis of the bond strength of voids closed by open-die forging. International Journal of Material Forming. Vol. 13, Is. 1, January 2020, p. 117-126.
- 36.Петров П А, Крутина Е В, Калпин Ю Г Нагрев и нагревательные устройства в кузнечном производстве: Учебное пособие для вузов. – М.: МГТУ «МАМИ», 2010.– 110 с
- 37.Шибakov В.Г., Панкратов Д.Л., Низамов Р.С., Хайруллин Р.А. Обеспечение качества поверхности зубчатого венца при прецизионной штамповке шестерён. Материалы VIII Международной научно-технической конференции «Инновационные машиностроительные технологии, оборудование и материалы – 2017» (МНТК «ИМТОМ–2017»). Ч. 1. – Казань, 2017. – 388 с., ил

38. Гончаров Ю. В. Микроструктура и механические свойства печной и воздушной окалины / Обработка материалов давлением. - Научные труды. Днепропетровский металлургический институт. - М. : Металлургия, 1967. 248 с.
39. Суворов И.К. Обработка материалов давлением. М.: Высшая школа, 1973. 381с.
40. Pachurin, G.V., Shevchenko S.M., Mukhina M.V., Kutepova L.I., Smirnova J.V. The factor of structure and mechanical properties in the production of critical fixing hardware 38XA. Tribology in Industry, Vol. 38, Is. 3, September 2016, p. 385-391
41. Venturato, G., Ghiotti, A., Bruschi, S. Influence of temperature and friction on the 22MnB5 formability under hot stamping conditions. AIP Conference Proceedings, International ESAFORM Conference on Material Forming, Vol. 1960, May 2018, p. 150–156
42. Калимуллин Р.Р, Соловейчик С.С. Новые экономнолегированные стали. Межвузовский сборник «Проектирование и исследование технических систем», №13, Набережные Челны, ИНЭКА, 2009, с.116
43. Ключев В М, Остополовский А Н, Шадек Е Г Штамповка заготовок, нагретых в расплавленном стекле. Кузнечно-штамповочное производство, 1966, №10.
44. Манюров Ш Б Разработка технологии снижения поверхностного окисления и обезуглероживания стальных заготовок при нагреве с применением кратковременных технологических защитных покрытий: дис. кан. техн. наук. - Спб., 2014.
45. V G Shibakov, D L Pankratov, R S Nizamov, L M Nizamova and R A Khairullin Justification of requirements to quality and accuracy of blank for precision stamping / IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. -2019. – Vol.570, Is.1 – Art.№012093

46. Ребельский А. В. Основы проектирования процессов горячей объёмной штамповки. - М.: «Машиностроение», 1965. - 248 с.
47. Хайруллин Р.А., Низамов Р.С., Панкратов Д.Л., Шibaков В.Г. Выбор рациональной системы переходов при прецизионной штамповке зубчатого венца шестерён. Материалы VIII Международной научно-технической конференции «Инновационные машиностроительные технологии, оборудование и материалы – 2017» (МНТК «ИМТОМ–2017»). Ч. 1. – Казань, 2017. – 388 с., ил
48. В.Г.Шibaков, Д.Л.Панкратов, Р.А.Хайруллин, Д.Д.Панкратов, Р.С.Низамов. Обоснование требований к точности заготовки для прецизионной штамповки шестерён. Заготовительные производства в машиностроении. 2019. № 7. С.310-312
49. Зенкевич О., Морган К. Конечные элементы и аппроксимация/ Пер. с англ. – М.: Мир, 1986. - 308 с.
50. Михайлов Ю.О., Тепин Н.В., Храбров В.А. Разработка технологии объёмной штамповки с использованием программного комплекса QFORM. Материалы VIII Международной конференции Технические университеты. Интеграция с европейскими и мировыми системами образования. В 2 томах, 2019, С.624
51. Гун Г.Я., Биба Н.В., Лишний А.И. и др. Система FORM-2D и моделирование технологии горячей объёмной штамповки // Кузнечно-штамповочное производство. - 1994. - №7. - С. 9-11.
52. Дуюн Т.А., Кузьминых С.С. Программный комплекс для исследования теплового и напряженно-деформированного состояния трехмерных объектов // Автоматизация и современные технологии. - 2001. - № 4. - С. 3-7.
53. Михайлов Ю.О., Князев С.Н. Моделирование процесса холодной объёмной штамповки. Журнал Прогрессивные технологии и системы

- машиностроения. Донецкий национальный технический университет. № 4 (63), 2018, с. 83-90
54. Шмаков А.К., Шестерённых А.В., Максименко Н.В., Станиславчик А.С. Оптимизация процесса горячей объёмной штамповки путем моделирования в программном комплексе QFORM. Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. 2013. № 4. С. 28-31.
55. Морозова В.Г., Дресвянников Д.Г., Михайлов Ю.О. Моделирование процесса калибровки в программном продукте QFORM. Интеллектуальные системы в производстве. 2013. № 2 (22). С. 76-78.
56. Логинов Ю.Н., Костоусова Н.Ф. Применение программного модуля QFORM для описания напряженно-деформированного состояния. Сборник «Инновации в материаловедении и металлургии». Материалы IV Международной интерактивной научно-практической конференции. Федеральное государственное автономное образовательное учреждение Высшего профессионального образования «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина, Институт материаловедения и металлургии; Ответственные за выпуск: Н. Н. Озерец, А. С. Жилин. 2015. С. 219-223.
57. Ланской Е.Н., Банкетов А.Н. Элементы расчета деталей и узлов кривошипных прессов. - М.: Машиностроение, 1966. - 360 с.
58. Мартынов Н.Ф. Анализ основных параметров и исследование динамики привода кривошипных горячештамповочных прессов: Дис. ... канд. техн. наук / ВЗМИ. - М., 1978. - 177 с.
59. Ланской Е.Н. Общие методы анализа жесткости прессов для объёмной штамповки / Кузнечно-штамповочное производство.- 1969. - № 5. – с. 29-32.
60. Сафонов А.В., Крук А.Т. К вопросу определения жесткости кривошипных горячештамповочных прессов // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение. - 1998. - № 2. - С. 73-83.

- 61.Крук А.Т. Разработка конструкции и методики проектирования тяжелых кривошипных горячештамповочных прессов: Дис. ... канд. техн. наук / МГТУ им. Н.Э. Баумана. - М., 2000. - 299 с.
- 62.Дибнер Ю.А. Вариант подналадки горячештамповочных прессов при нелинейной системе «пресс – штамп – поковка» / Дибнер Ю.А., Пруцков Р.Н. // КШП ОМД. – 2003 г. - №10 – С 29-33.
- 63.Плюгачев В.Г., Моисеев Б.М., Милов В.А. Уточнение коэффициента вертикальной податливости штампов КГШП // Машины и автоматизация кузнечно-штамповочного производства: Межвуз. сб. науч. тр. М.: ВЗМИ, 1984.-С. 47-52.
- 64.Семенов Е.И., Трегубов Г.П. Концепция восстановления и развития кузнечно-штамповочного производства в машиностроении России // Вестник машиностроения. - 2000. - № 2. - С. 50-61.
- 65.Крук А.Т. Развитие конструкций кривошипных горячештамповочных прессов // Заготовительные производства в машиностроении. - 2003. - № 1.- С. 26-28.
- 66.Федоркевич В.Ф., Крук А.Т. Кривошипные горячештамповочные прессы универсального технологического назначения // Кузнечно- штамповочное производство. Обработка материалов давлением. - 2000. - №10.-С. 27-30.
- 67.Pischel H. Entwicklung und Stand des deutschen Pressenbaus zum Schmieden // Werkstatt und Betrieb. - 1991. -N. 5. - S. 391-396.
- 68.Крук А.Т. Проблемы повышения точности штамповки на кривошипных горячештамповочных прессах. // Заготовительные производства в машиностроении. - 2004,-№ 1.- С.26-31.
- 69.Крук А.Т., Сафонов А.В. О повышении точности штамповки на кривошипных горячештамповочных прессах//Вопросы исследования прочности деталей машин: Межвуз. сб. науч. тр.- М.: МГАПИ, -2002. -вып. 7. - С.72-78.

70. Belur, B.K., Grandhi, R.V. Geometric deviations in forging and cooling operations due to process uncertainties. *Journal of Materials Processing Technology* Volume 152, Is. 2, 20 October 2004, p. 204-214
71. V G Shibakov, D L Pankratov, R S Nizamov and L M Nizamova Assessment of the impact of technological parameters of hot stamping on the cost of the product / *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*. -2019. – Vol.570, Is.1 – Art.№012092
72. Рожков И.И., Мыльников В.В. Расчёт внутренних остаточных напряжений, возникающих в закалённых деталях машин после ХТО// *Международный журнал экспериментального образования*, 2014г., №1-2, с.114-118
73. Астащенко В.И. Технологические методы управления структурообразованием стали при производстве деталей машин/Астащенко В.И., Шибakov В.Г./ *M.Academia*, 2006г., 328с.
74. Шибakov В.Г. Наследственность макро- и микростроения в стальных заготовках деталей машин/Астащенко В.И., Соловейчик С.С. и др./ *Международный научный сборник «Оборудование и технология термической обработки материалов и сплавов»*, Харьков: ХФТИ, 2007г., том 1, с.117-122
75. В. Г. Шибakov, Д. Л. Панкратов, Р. В. Шибakov, Р. С. Корректировка параметров прецизионной штамповки шестерён по результатам моделирования физических процессов при их химико-термической обработке. *Черные материалы*, март 2021 г., № 3 (1071), с.34-39
76. Калинин, Геннадий Григорьевич. Совершенствование технологии объёмной штамповки на основе анализа формoизменения : диссертация ... кандидата технических наук : 05.03.05.- Ростов-на-Дону, 1998 - ил. РГБ ОД, 61 99-5/1232-6.
77. Колмогоров В.Л. Механика обработки материалов давлением: учебник для вузов. - М.: Материалургия, 1986. - 688 с.

- 78.Шарапин Е. Ф. Элементы теории обработки материалов давлением. -М.: Металлургия, 1961
- 79.Восстановление деталей пластической деформацией (теория, технология, оборудование)/Дмитриев А.М.,Шибakov В.Г.,Панкратов Д.Л.//Научное издание. М.:Academia, 2012. – 387 с. (Монографические исследования: технология)
- 80.ГОСТ 25.503 «Расчеты и испытания на прочность. Методы механических испытаний» М.: Издательство стандартов, 1988 год
- 81.Антонюк Ф.И. Исследование факторов, влияющих на точность осадки осесимметричных поковок // Создание прогрессивных технологий, конструкций и систем и социально-экономические проблемы производства: Труды Всероссийской науч.-техн. конф. - Калуга, 1998. - С. 384.
- 82.Дмитриев А. М. и Воронцов А. Л., 2005, Общая теория осадки и высадки цилиндрических заготовок. (Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана.Серия “Машиностроение”),125 с.
- 83.Губкин С. И. Теория обработки материалов давлением. -М.: Металлургия, 1947. - 532 с.
- 84.Ребельский А. В. Прогрессивные методы горячей объёмной штамповки и пути их внедрения в производство. // Сб. «Прогрессивная технология горячей штамповки»/ Под ред. М. В. Сторожена. -М.: Машгиз, 1955 (МДНТП им. Дзержинского).
- 85.ГОСТ 1758-81 Основные нормы взаимозаменяемости. Передачи зубчатые конические и гипоидные. Допуски
- 86.Анухин, В. И. Допуски и посадки : учебное пособие для студентов высших учебных заведений, обучающихся по направлению подготовки бакалавров и магистров "Технологические машины и оборудование" и направлениям подготовки дипломированных специалистов "Машиностроительные технологии и оборудование" и "Технологические машины и оборудование"

- / В. И. Анухин ; В. И. Анухин. – 4-е изд.. – Санкт-Петербург [и др.] : Питер, 2007. – (Учебное пособие). – ISBN 978-5-91180-331-5. – EDN QNBVNZ.
- 87.Сафонов А.В., Хрущев Г.Г., Крук А.Т. Исследование условий повышения точности штамповки на кривошипных горячештамповочных прессах. //Изв.ТулГУ. Сер. Механика деформируемого твердого тела и обработка материалов давлением. - Тула, 2003. Вып. 1.-С. 148-156.
- 88.Хайруллин Р.А., Низамов Р.С., Владимирова С.Г. Выбор метода штамповки, обеспечивающего получения рабочих поверхностей детали без применения механической обработки. «IX Камские чтения»: всероссийская научно-практическая конференция. (2017; Набережные Челны). Часть 1.
- 89.Губкин С. И. Деформируемость материалов. -М.: Металлургия, 1953. - 199 с.
- 90.Колмогоров В.Л. Механика обработки материалов давлением: учебник для вузов. -2-е изд., перераб. и доп.– Екатеринбург: Изд-во Уральского гос. техн. ун-та – УПИ, 2001. - 836 с
- 91.Кутяйкин В.Г., Кутяйкин О.В. Анализ микроструктуры заготовок в очаге деформации при вдавливании пуансона с плоским торцом // Кузнечно-штамповочное производство. ОМД. – М.: 2007. – №5.
- 92.Березкин В. Г. Формоизменение материалов при обработке давлением. - М.: Машиностроение, 1973. - 154 с.
- 93.Воронцов А. Л. Теория и расчеты процессов обработки материалов давлением : учеб. пособие : в 2 т. / А. Л. Воронцов. – М. : Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2014.
- 94.Губкин С. И. Пластическая деформация материалов. - М.: Металлургия, 1960. Т. 1-3.
- 95.Основы теории обработки материалов давлением / Губкин С. И., Звороно Б. П., Катков В. Ф. и др.; под ред. М. В. Сторожева. - М.: Машгиз, 1959.- 540 с.

- 96.Игнатов А.А., Игнатова Т.А. Кривошипные горячештамповочные прессы. - М.: Машиностроение, 1984. - 312 с.
- 97.Леванов А.Н., Колмогоров В.Л., Буркин С.П. и др. Контактное трение в процессах ОМД, -Москва, 1976.
- 98.Трение и смазки при обработке материалов давлением: справ., изд. Грудев А.П., Зильберг Ю.В., Тилик В.Т. –М.: Материалургия. 1982.- 312 с.
- 99.Pankratov D. L., Nizamov R. S. and Harisov I. Zh. Improvements in the process of boss bar upset forging into a horizontal forging machine with the aim of joint knuckle forging quality improvement // Materials Science and Engineering 134 (2016) 012044
100. Панкратов Д.Л., Низамов Р.С. Решение задачи исключения неравномерности распределения материала при высадке поковок типа стержней с утолщением // Научный вестник. 2016. N 3(9). С.104-111. DOI: 10.17117/nv.2016.03.104
101. Антонюк Ф.И., Малышев А Н Исследование влияния погрешности исходной заготовки на геометрические параметры поковки // Прогрессивные технологии, конструкции и системы в приборо- и машиностроении. Труды Всероссийской науч.-техн. конф -М., 2002. - С 139-140
102. ГОСТ 2590-2006 Прокат сортовой стальной горячекатаный круглый. Сортамент
103. ГОСТ 14955-77 Сталь качественная круглая со специальной отделкой поверхности. Технические условия
104. Охрименко Я.М., Тюрин В.А. Неравномерность деформации при ковке. М., «Машиностроение», 1969, 182 с., 2 труда Охрименко Ребельский
105. Ланской Е.Н. Влияние жесткости процесса на точность штамповки //Повышение точности и автоматизация штамповки и ковки. М.: «Машиностроение», 1967. с. 21- 30.

106. Pankratov D. L., Nizamov R. S. and Harisov I. Zh. Research of influence of geometrical parameters of a stamp engraving of setting transitions at setting of semi finished pipe products to receiving defect-free products // Materials Science and Engineering 134 (2016) 012047
107. Pankratov D. L., Nizamov R. S. and Harisov I. Zh. Improving upset forgingtube billettechnology to avoid the clamp defecton semi-axle housingforging // Materials Science and Engineering 240 (2017) 012055
108. Тарновский И. Я. Формоизменение при пластической обработке материалов. -М.: Материалургиздат, 1954.
109. Shibakov V, Pankratov D, Khairullin R, 2017, System analysis of technological precision forgings management capabilities. Series: Solid State Phenomena 265 (2017), p. 1110-1115
110. ГОСТ 7505-89. Поковки стальные, штампованные. Допуски, припуски и напуски. -М.: Государственный комитет СССР по управлению качеством продукции и стандартам, 1990.-52 с.
111. Hawryluk M. Review of selected methods of increasing the life of forging tools in hot die forging processes. Archives of Civil and Mechanical Engineering. Vol. 16, Is. 4, September, 2016
112. Шибakov В.Г., Гончаров М.Н., Руднев М.П., Мулюков Р.И. Системная модель автоматизации технологической подготовки производства поковок объёмной штамповкой // Проектирование и исследование технических систем: Межвузовский научный сборник. -№6. -2005.
113. Симонова Л.А., Гавариева К.Н. Разработка базы знаний для системы нечеткого логического вывода процесса прецизионной штамповки. Научно-технический вестник поволжья, Казань, 2020г., с.62-64
114. Шибakov В.Г., Панкратов Д.Л., Низамов Р.С., Хайруллин Р.А., Панкратов Д.Д. Целесообразность и возможность автоматизации

прецизионной калибровки зубчатого венца шестерён. КШП ОМД, №11,
2019. с.28-33

ПРИЛОЖЕНИЕ

Для упрощения вычислений заменим переменные величина деформации ε на X_1 , радиус R на X_2 , температуру T на X_3 . Интенсивность напряжений σ в центральной области образца обозначим Y .

Результаты эксперимента представлены в таблице 14.

Таблица 15 - Сводная таблица результатов моделирования для оценки интенсивности сжимающих напряжений для образца с припуском выпуклой формы.

№ опыта	Деформация, ε , %	Форма припуска, R , мм	Температура, $^{\circ}\text{C}$	Напряжения, МПа
	X_1	X_2	X_3	Y
1	6	34	20	580,0
2	4	34	20	553,3
3	6	0	20	445,0
4	4	0	20	432,5
5	6	34	150	500,0
6	4	34	150	493,3
7	6	0	150	388,0
8	4	0	150	385,2

Уравнение множественной регрессии может быть представлено в виде:

$$Y = f(\beta, X) + \varepsilon, \quad (2.13)$$

где $X = X(X_1, X_2, \dots, X_m)$ - вектор независимых (объясняющих) переменных;

β - вектор параметров (подлежащих определению); ε - случайная ошибка (отклонение);

Y - зависимая (объясняемая) переменная.

Теоретическая линейная функция множественной регрессии имеет вид:

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \dots + \beta_m X_m + \varepsilon, \quad (2.14)$$

где β_0 - свободный член, определяющий значение Y , в случае, когда все объясняющие переменные X_j равны 0.

Определим вектор оценок коэффициентов регрессии. Согласно методу наименьших квадратов, вектор s получается из выражения: $s = (X^T X)^{-1} X^T Y$
 К матрице с переменными X_j добавляем единичный столбец:

1	6	34	20
1	4	34	20
1	6	0	20
1	4	0	20
1	6	34	150
1	4	34	150
1	6	0	150
1	4	0	150

Матрица Y

580
553.3
445
432.5
500
493.3
388
385.2

Матрица X^T

1	1	1	1	1	1	1	1
6	4	6	4	6	4	6	4
34	34	0	0	34	34	0	0
20	20	20	20	150	150	150	150

Умножаем матрицы, $(X^T X)$

8	40	136	680
40	208	680	3400
136	680	4624	11560
680	3400	11560	91600

В матрице, $(X^T X)$ число 8, лежащее на пересечении 1-й строки и 1-го столбца, получено как сумма произведений элементов 1-й строки матрицы X^T и 1-го столбца матрицы X .

Умножаем матрицы, $(X^T Y)$

3777.3
18935.2
72304.4
305191

Находим обратную матрицу $(X^T X)^{-1}$

$(X^T X)^{-1} =$	3,5888	-0,625	-0,00735	-0,00251
	-0,625	0,125	0	0
	-0,00735	0	0,000433	0
	-0,00251	0	0	3,0E-5

Вектор оценок коэффициентов регрессии равен

$Y(X) =$	3,5888	-0,625	-0,00735	-0,00251	*	3777,3	422,1712
	-0,625	0,125	0	0		18935,2	6,0875
	-0,00735	0	0,000433	0		72304,4	3,4993
	-0,00251	0	0	3,0E-5		305191	-0,4698

Уравнение регрессии

$$Y = 422.1712 + 6.0875X_1 + 3.4993X_2 - 0.4698X_3 \quad (2.15)$$

Число наблюдений $n = 8$. Число независимых переменных в модели равно 3, а число регрессоров с учетом единичного вектора равно числу неизвестных

коэффициентов. С учетом признака Y , размерность матрицы становится равным 5. Матрица, независимых переменных X имеет размерность (8 x 5).

Матрица, составленная из Y и X

1	580	6	34	20
1	553.3	4	34	20
1	445	6	0	20
1	432.5	4	0	20
1	500	6	34	150
1	493.3	4	34	150
1	388	6	0	150
1	385.2	4	0	150

Транспонированная матрица.

1	1	1	1	1	1	1	1
580	553.3	445	432.5	500	493.3	388	385.2
6	4	6	4	6	4	6	4
34	34	0	0	34	34	0	0
20	20	20	20	150	150	150	150

Матрица $X^T X$.

8	3777.3	40	136	680
3777.3	1819890.07	18935.2	72304.4	305191
40	18935.2	208	680	3400
136	72304.4	680	4624	11560
680	305191	3400	11560	91600

Полученная матрица имеет следующее соответствие:

$\sum n$	$\sum y$	$\sum x_1$	$\sum x_2$	$\sum x_3$
$\sum y$	$\sum y^2$	$\sum x_1 y$	$\sum x_2 y$	$\sum x_3 y$
$\sum x_1$	$\sum y x_1$	$\sum x_1^2$	$\sum x_2 x_1$	$\sum x_3 x_1$
$\sum x_2$	$\sum y x_2$	$\sum x_1 x_2$	$\sum x_2^2$	$\sum x_3 x_2$
$\sum x_3$	$\sum y x_3$	$\sum x_1 x_3$	$\sum x_2 x_3$	$\sum x_3^2$

Найдем парные коэффициенты корреляции.

$$r_{xy} = \frac{\bar{x} \cdot \bar{y} - \bar{x} \cdot \bar{y}}{s(x) \cdot s(y)} \quad (2.16)$$

$$r_{yx_1} = \frac{2366.9 - 5 \cdot 472.163}{1 \cdot 67.445} = 0.0903$$

Значения парного коэффициента корреляции свидетельствует о низкой линейной связи между x_1 и y .

$$r_{yx_2} = \frac{9038.05 - 17 \cdot 472.163}{17 \cdot 67.445} = 0.882$$

Значения парного коэффициента корреляции свидетельствует о сильной линейной связи между x_2 и y .

$$r_{yx_3} = \frac{38148.875 - 85 \cdot 472.163}{65 \cdot 67.445} = -0.453$$

Значения парного коэффициента корреляции свидетельствует о не сильной линейной связи между x_3 и y .

$$r_{x_1 x_2} = \frac{85 - 17 \cdot 5}{17 \cdot 1} = 0$$

Значения парного коэффициента корреляции свидетельствует о низкой линейной связи между x_2 и x_1 .

$$r_{x_1 x_3} = \frac{425 - 85 \cdot 5}{65 \cdot 1} = 0$$

Значения парного коэффициента корреляции свидетельствует о низкой линейной связи между x_3 и x_1 .

$$r_{x_2x_3} = \frac{1445 - 85 \cdot 17}{65 \cdot 17} = 0$$

Значения парного коэффициента корреляции свидетельствует о низкой линейной связи между x_3 и x_2 .

Признаки x и y	$\sum x_i$	$\bar{x} = \frac{\sum x_i}{n}$	$\sum y_i$	$\bar{y} = \frac{\sum y_i}{n}$	$\sum x_i \cdot y_i$	$\overline{xy} = \frac{\sum x_i y_i}{n}$
Для y и x_1	40	5	3777.3	472.163	18935.2	2366.9
Для y и x_2	136	17	3777.3	472.163	72304.4	9038.05
Для y и x_3	680	85	3777.3	472.163	305191	38148.875
Для x_1 и x_2	136	17	40	5	680	85
Для x_1 и x_3	680	85	40	5	3400	425
Для x_2 и x_3	680	85	136	17	11560	1445

Дисперсии и среднеквадратические отклонения.

Признаки x и y	$D(x) = \frac{\sum x_i^2}{n} - \bar{x}^2$	$D(y) = \frac{\sum y_i^2}{n} - \bar{y}^2$	$s(x) = \sqrt{D(x)}$	$s(y) = \sqrt{D(y)}$
Для y и x_1	1	4548.832	1	67.445
Для y и x_2	289	4548.832	17	67.445
Для y и x_3	4225	4548.832	65	67.445
Для x_1 и x_2	289	1	17	1
Для x_1 и x_3	4225	1	65	1
Для x_2 и x_3	4225	289	65	17

Матрица парных коэффициентов корреляции R:

-	y	x_1	x_2	x_3
y	1	0.09026	0.882	-0.4528
x_1	0.09026	1	0	0
x_2	0.882	0	1	0
x_3	-0.4528	0	0	1

Рассчитаем наблюдаемые значения t-статистики для r_{yx1} по формуле:

$$t_{nabl} = r_{yx1} \cdot \frac{\sqrt{n-m-1}}{\sqrt{1-r_{yx1}^2}} \quad (2.17)$$

где $m = 1$ - количество факторов в уравнении регрессии.

$$t_{nabl} = 0.0903 \cdot \frac{\sqrt{8-1-1}}{\sqrt{1-0.0903^2}} = 0.22$$

По таблице Стьюдента находим $T_{табл}$

$$t_{крит}(n-m-1; \alpha/2) = (6; 0.025) = 2.969 \quad (2.18)$$

Поскольку $t_{набл} < t_{крит}$, то принимаем гипотезу о равенстве 0 коэффициента корреляции. Другими словами, коэффициент корреляции статистически - не значим.

Рассчитаем наблюдаемые значения t-статистики для r_{yx2} по формуле:

$$t_{nabl} = 0.88 \cdot \frac{\sqrt{8-1-1}}{\sqrt{1-0.88^2}} = 4.58$$

Поскольку $t_{набл} > t_{крит}$, то отклоняем гипотезу о равенстве 0 коэффициента корреляции. Другими словами, коэффициент корреляции статистически - значим

Рассчитаем наблюдаемые значения t-статистики для r_{yx3} по формуле:

$$t_{nabl} = 0.45 \cdot \frac{\sqrt{8-1-1}}{\sqrt{1-0.45^2}} = 1.24$$

Поскольку $t_{набл} < t_{крит}$, то принимаем гипотезу о равенстве 0 коэффициента корреляции. Другими словами, коэффициент корреляции статистически - не значим.

Проверим переменные на мультиколлинеарность по второму виду статистических критериев (критерий Фишера).

Определяем обратную матрицу $D = R^{-1}$:

112.3914	-10.1443	-99.1309	50.8882
-10.1443	1.9156	8.9474	-4.5931
-99.1309	8.9474	88.4349	-44.8841
50.8882	-4.5931	-44.8841	24.0409

Вычисляем F-критерии Фишера:

$$F_k = (d_{kk} - 1) \frac{n-m}{m-1} \quad (2.19)$$

где d_{kk} - диагональные элементы матрицы.

Рассчитанные значения критериев сравниваются с табличными при $v_1=n-m$ и $v_2=m-1$ степенях свободы и уровне значимости α . Если $F_k > F_{\text{табл}}$, то k -я переменная мультиколлинеарна с другими.

$$v_1=8-3 = 6; v_2=3-1 = 3. F_{\text{табл}}(6;3) = 8,94$$

$$F_1 = (112.391 - 1) \frac{8-3}{3-1} = 222.78$$

Поскольку $F_1 > F_{\text{табл}}$, то переменная x_1 мультиколлинеарна с другими.

$$F_2 = (1.916 - 1) \frac{8-3}{3-1} = 1.83$$

Поскольку $F_2 \leq F_{\text{табл}}$, то переменная x_2 не мультиколлинеарна с другими.

$$F_3 = (88.435 - 1) \frac{8-3}{3-1} = 174.87$$

Поскольку $F_3 > F_{\text{табл}}$, то переменная x_3 мультиколлинеарна с другими.

$$F_4 = (24.041 - 1) \frac{8-3}{3-1} = 46.08$$

Поскольку $F_4 > F_{\text{табл}}$, то переменная x_4 мультиколлинеарна с другими.

Для несмещенной оценки дисперсии проделаем следующие вычисления.

Несмещенная ошибка $\varepsilon = Y - Y(x) = Y - X*s$ (абсолютная ошибка аппроксимации)

Y	Y(x)	$\varepsilon = Y - Y(x)$	ε^2	$(Y - Y_{cp})^2$	$ \varepsilon : Y $
580	568.275	11.725	137.476	11628.926	0.0202
553.3	556.1	-2.8	7.84	6583.294	0.00506
445	449.3	-4.3	18.49	737.801	0.00966
432.5	437.125	-4.625	21.391	1573.114	0.0107
500	507.2	-7.2	51.84	774.926	0.0144
493.3	495.025	-1.725	2.976	446.794	0.0035
388	388.225	-0.225	0.0506	7083.326	0.00058
385.2	376.05	9.15	83.722	7562.476	0.0238
			323.785	36390.659	0.0879

Средняя ошибка аппроксимации

$$A = \frac{\sum |\varepsilon : Y|}{n} \cdot 100\% = \frac{0.0879}{8} \cdot 100\% = 1.1\% \quad (2.20)$$

Оценка дисперсии равна:

$$s_e^2 = (Y - Y(X))^T (Y - Y(X)) = 323.785 \quad (2.21)$$

Несмещенная оценка дисперсии равна:

$$s^2 = \frac{1}{n - m - 1} \cdot s_e^2 = \frac{1}{8 - 3 - 1} \cdot 323.785 = 80.9463 \quad (2.22)$$

Оценка среднеквадратичного отклонения (*стандартная ошибка для оценки Y*):

$$S = \sqrt{S^2} = \sqrt{80.9463} = 8.997 \quad (2.23)$$

Найдем оценку ковариационной матрицы вектора $k = S^2 \cdot (X^T X)^{-1}$

$k(x) = 80.95$	3,5888	-0,625	-0,00735	-0,00251	290,4965	-50,5914	-0,5952	-0,2036
	-0,625	0,125	0	0	-50,5914	10,1183	0	0
	-0,00735	0	0,000433	0	-0,5952	0	0,03501	0
	-0,00251	0	0	3,0E-5	-0,2036	0	0	0,00239

Дисперсии параметров модели определяются соотношением $S^2_i = K_{ii}$, т.е. это элементы, лежащие на главной диагонали

$$S_{b0} = \sqrt{290.496} = 17.044$$

$$S_{b1} = \sqrt{10.118} = 3.181$$

$$S_{b2} = \sqrt{0.035} = 0.187$$

$$S_{b3} = \sqrt{0.00239} = 0.0489$$

Стандартизированные частные коэффициенты регрессии - β -коэффициенты (β_j) показывают, на какую часть своего среднего квадратического отклонения $S(y)$ изменится признак-результат y с изменением соответствующего фактора x_j на величину своего среднего квадратического отклонения (S_{x_j}) при неизменном влиянии прочих факторов (входящих в уравнение). По максимальному β_j можно судить, какой фактор сильнее влияет на результат Y . По коэффициентам эластичности и β -коэффициентам могут быть сделаны противоположные выводы. Причины этого: а) вариация одного фактора очень велика; б) разнонаправленное воздействие факторов на результат. Коэффициент β_j может также интерпретироваться как показатель прямого (непосредственного) влияния j -ого фактора (x_j) на результат (y). Во множественной регрессии j -ый фактор оказывает не только прямое, но и косвенное (опосредованное) влияние на результат (т.е. влияние через другие факторы модели).

Косвенное влияние измеряется величиной: $\sum \beta_i r_{x_j, x_i}$, где m - число факторов в модели. Полное влияние j -ого фактора на результат равно сумме прямого и

косвенного влияния измеряет коэффициент линейной парной корреляции данного фактора и результата - $r_{x_j,y}$.

Так для нашего примера непосредственное влияние фактора x_1 на результат Y в уравнении регрессии измеряется β_j и составляет 0.0903; косвенное (опосредованное) влияние данного фактора на результат определяется как:
 $r_{x_1x_2}\beta_2 = 0 * 0.882 = 0$

Тесноту совместного влияния факторов на результат оценивает индекс множественной корреляции. В отличие от парного коэффициента корреляции, который может принимать отрицательные значения, он принимает значения от 0 до 1. Поэтому R не может быть использован для интерпретации направления связи. Чем плотнее фактические значения y_i располагаются относительно линии регрессии, тем меньше остаточная дисперсия и, следовательно, больше величина $R_{y(x_1, \dots, x_m)}$.

Таким образом, при значении R близком к 1, уравнение регрессии лучше описывает фактические данные и факторы сильнее влияют на результат. При значении R близком к 0 уравнение регрессии плохо описывает фактические данные и факторы оказывают слабое воздействие на результат.

$$R = \sqrt{1 - \frac{s_e^2}{\sum(y_i - \bar{y})^2}} = \sqrt{1 - \frac{323.785}{36390.66}} = 0.9955 \quad (2.24)$$

Коэффициент множественной корреляции можно определить через матрицу парных коэффициентов корреляции:

$$R = \sqrt{1 - \frac{\Delta_r}{\Delta_{r11}}} \quad (2.25)$$

где Δ_r - определитель матрицы парных коэффициентов корреляции; Δ_{r11} - определитель матрицы межфакторной корреляции.

$$\Delta_r = \begin{array}{|c|c|c|c|} \hline 1 & 0,09026 & 0,882 & -0,4528 \\ \hline 0,09026 & 1 & 0 & 0 \\ \hline 0,882 & 0 & 1 & 0 \\ \hline -0,4528 & 0 & 0 & 1 \\ \hline \end{array} = 0.0089$$

$$\Delta_{r11} = \begin{array}{|c|c|c|} \hline 1 & 0 & 0 \\ \hline 0 & 1 & 0 \\ \hline 0 & 0 & 1 \\ \hline \end{array} = 1$$

Коэффициент множественной корреляции

$$R = \sqrt{1 - \frac{0.0089}{1}} = 0.9955$$

Связь между признаком Y и факторами X_i весьма сильная.

Коэффициент детерминации.

$$R^2 = 0,9955^2 = 0,9911$$

Чем ближе этот коэффициент к единице, тем больше уравнение регрессии объясняет поведение Y .

Число $\nu = n - m - 1$ называется числом степеней свободы. Считается, что при оценивании множественной линейной регрессии для обеспечения статистической надежности требуется, чтобы число наблюдений, по крайней мере, в 3 раза превосходило число оцениваемых параметров.

1) t-статистика

$$T_{\text{табл}}(n-m-1; \alpha/2) = (4; 0.025) = 3,495$$

$$t_i = \frac{b_i}{S_{b_i}} \quad (2.26)$$

$$t_0 = \frac{422.171}{17.044} = 24.77 > 3.495$$

Статистическая значимость коэффициента регрессии b_0 подтверждается.

$$t_1 = \frac{6.088}{3.181} = 1.914 < 3.495$$

Статистическая значимость коэффициента регрессии b_1 не подтверждается.

$$t_2 = \frac{3.499}{0.187} = 18.701 > 3.495$$

Статистическая значимость коэффициента регрессии b_2 подтверждается.

$$t_3 = \frac{-0.47}{0.0489} = 9.6 > 3.495$$

Статистическая значимость коэффициента регрессии b_3 подтверждается.

Определим доверительные интервалы коэффициентов регрессии, которые с надежностью 95% будут следующими:

$$(b_i - t_{\text{табл}} * S_{b_i}; b_i + t_{\text{табл}} * S_{b_i}) \quad (2.27)$$

$$b_0: (422.171 - 3.495 * 17.044; 422.171 + 3.495 * 17.044) = (362.603; 481.74)$$

$$b_1: (6.088 - 3.495 * 3.181; 6.088 + 3.495 * 3.181) = (-5.03; 17.205)$$

Поскольку найденный интервал включает 0, то коэффициент b_1 не значим.

$$b_2: (3.499 - 3.495 * 0.187; 3.499 + 3.495 * 0.187) = (2.845; 4.153)$$

$$b_3: (-0.47 - 3.495 * 0.0489; -0.47 + 3.495 * 0.0489) = (-0.641; -0.299)$$

Оценка значимости уравнения множественной регрессии осуществляется путем проверки гипотезы о равенстве нулю коэффициент детерминации рассчитанного по данным генеральной совокупности: R^2 или $b_1 = b_2 = \dots = b_m = 0$ (гипотеза о незначимости уравнения регрессии, рассчитанного по данным генеральной совокупности).

Для ее проверки используют F-критерий Фишера. При этом вычисляют фактическое (наблюдаемое) значение F-критерия, через коэффициент детерминации R^2 , рассчитанный по данным конкретного наблюдения.

По таблицам распределения Фишера-Снедеккера находят критическое значение F-критерия ($F_{кр}$). Для этого задаются уровнем значимости α (обычно его берут равным 0,05) и двумя числами степеней свободы $k_1 = m$ и $k_2 = n - m - 1$. F-статистика. Критерий Фишера.

$$R^2 = 1 - \frac{s_e^2}{\sum(y_i - \bar{y})^2} = 1 - \frac{323.785}{36390.66} = 0.9911 \quad (2.28)$$

Проверим гипотезу об общей значимости - гипотезу об одновременном равенстве нулю всех коэффициентов регрессии при объясняющих переменных:

$$H_0: R^2 = 0; \beta_1 = \beta_2 = \dots = \beta_m = 0.$$

$$H_1: R^2 \neq 0.$$

Проверка этой гипотезы осуществляется с помощью F-статистики распределения Фишера (правосторонняя проверка).

Если $F < F_{кр} = F_{\alpha; n-m-1}$, то нет оснований для отклонения гипотезы H_0 .

$$F = \frac{R^2}{1-R^2} \cdot \frac{n-m-1}{m} = \frac{0.9911}{1-0.9911} \cdot \frac{8-3-1}{3} = 148.522 \quad (2.29)$$

Табличное значение при степенях свободы $k_1 = 3$ и $k_2 = n-m-1 = 8 - 3 - 1 = 4$, $F_{кр}(3;4) = 6,59$

Поскольку фактическое значение $F > F_{кр}$, то коэффициент детерминации статистически значим и уравнение регрессии статистически надежно (т.е. коэффициенты b_i совместно значимы).

Выводы.

В результате расчетов было получена функция множественной регрессии:

$$Y = 422,1712 + 6,0875X_1 + 3,4993X_2 - 0,4698X_3 \quad (2.30)$$

Подставив вместо переменных X_1 , X_2 и X_3 соответствующие обозначения ε , R , T и вместо Y обозначение σ получаем:

$$\sigma = 422,1712 + 6,0875 * \varepsilon + 3,4993 * R - 0.4698 * T, \text{ МПа} \quad (2.31)$$

Интерпретация параметров модели:

- увеличение ε на 1%. приводит к увеличению σ в среднем на 6,088МПа;
увеличение R на 1мм приводит к увеличению σ в среднем на 3,499 МПа.;

увеличение T на 1°C приводит к уменьшению σ в среднем на 0.47 МПа. По максимальному коэффициенту $\beta_2=0.882$ делаем вывод, что наибольшее влияние на результат σ оказывает фактор R . Статистическая значимость полученной зависимости проверена с помощью коэффициента детерминации и критерия Фишера. Установлено, что в исследуемой ситуации 99.11% общей вариабельности σ объясняется изменением факторов ε , R , T .



Рисунок 51 - Поковка Сателлит после горячей объёмной штамповки



Рисунок 52 - Поковка Сателлит после термической обработки

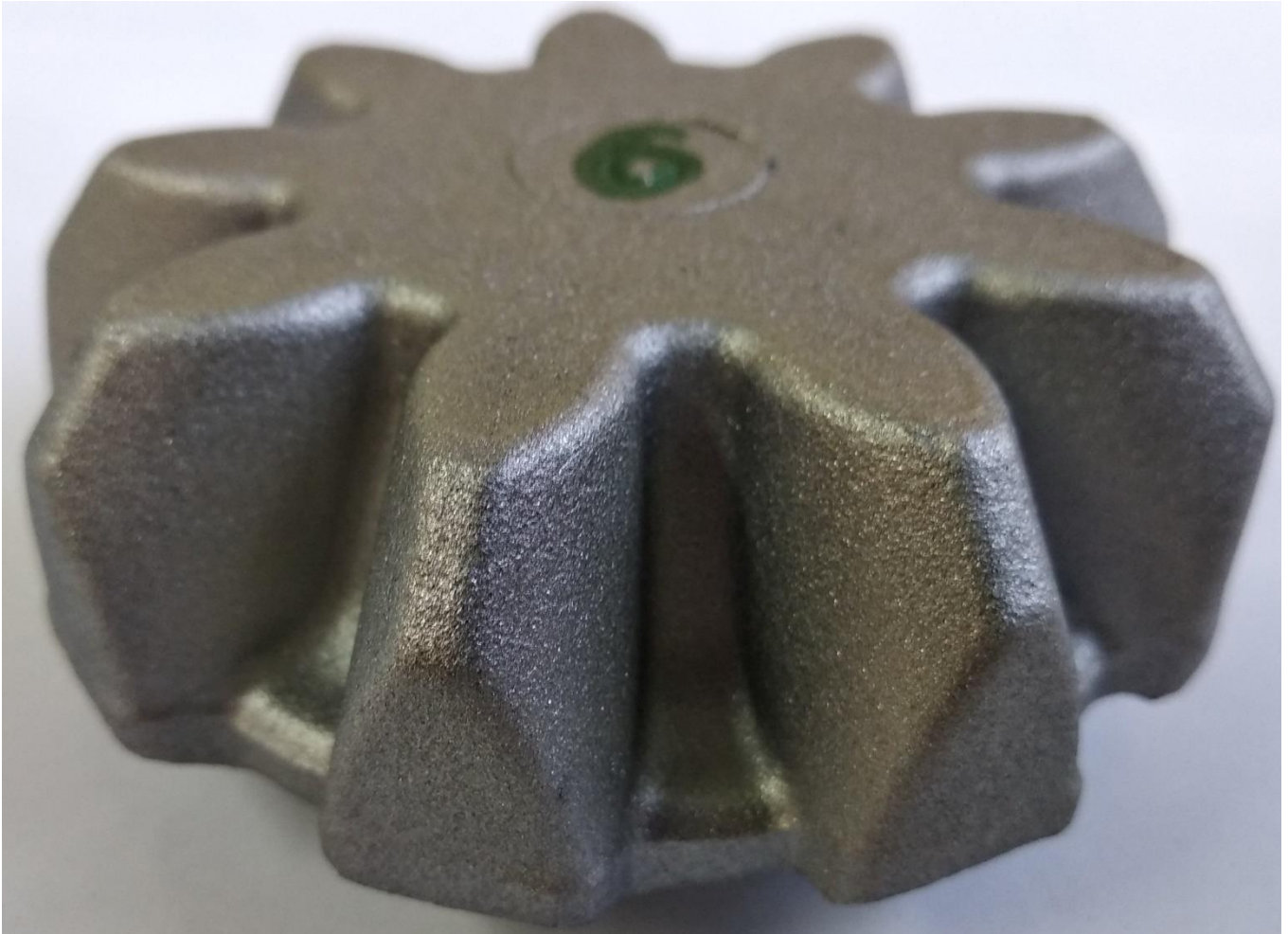


Рисунок 53- Поковка Сателлит после термической обработки



Рисунок 54- Поковка Сателлит после калибровки

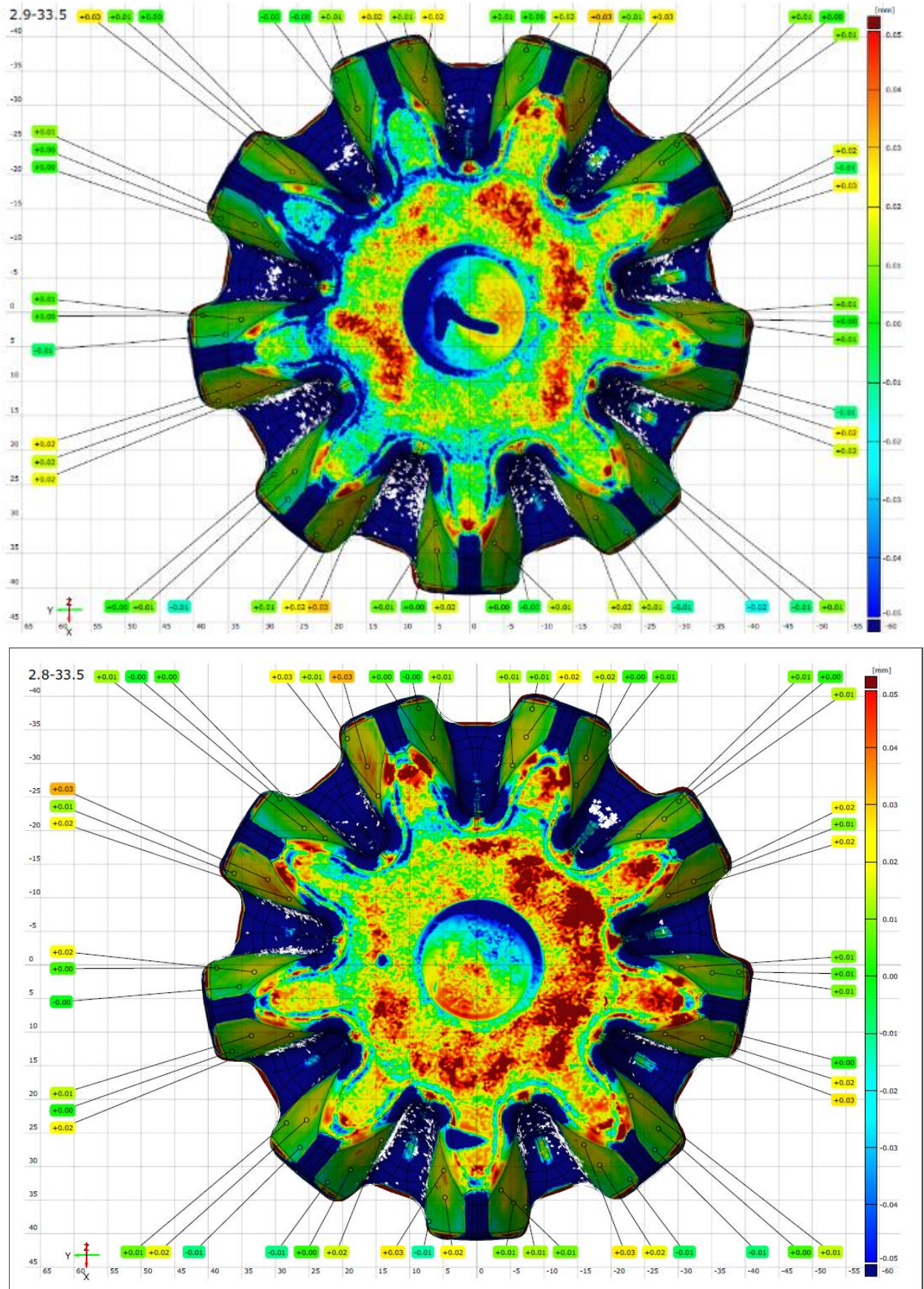


Рисунок 55 - Результаты сканирования поковок после калибровки и сравнение с идеальной 3D моделью поковки