

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Тольяттинский государственный университет»
Институт машиностроения

(наименование института полностью)

Кафедра «Оборудование и технологии машиностроительного производства»
(наименование)

15.04.05 Конструкторско-технологическое обеспечение

машиностроительных производств

(код и наименование направления подготовки)

Технология автоматизированного машиностроения

(направленность (профиль))

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА (МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ)

на тему Исследование процесса обработки многогранных отверстий
сборными протяжками с групповой схемой срезания припуска

Студент

В.В. Носов

(И.О. Фамилия)

(личная подпись)

Научный
руководитель

канд. техн. наук., доцент, Л.А. Резников

(ученая степень, звание, И.О. Фамилия)

Тольятти 2020

Содержание

Введение.....	4
1 Состояние вопроса. Формулировка цели и задач	6
1.1 Проведение литературного обзора.....	6
1.2 Результаты литературного обзора.....	7
1.3 Анализ рассмотренных конструкций.....	12
1.4 Методы силового расчёта протяжек	12
1.5 Типовая технология изготовления протяжного инструмента.....	19
1.6 Обзор программ для анализа.....	20
1.7 Формулировка цели и задач.....	32
2 Анализ напряжённого состояния зуба многогранной протяжки	33
2.1 Подготовка исходных данных для анализа	33
2.2 Проведение анализа	34
2.3 Результаты анализа	39
3 Разработка рекомендаций по изменению формы зуба.....	42
3.1 Выбор схемы снятия припуска	42
3.2 Рассмотрение недостатков формы зубьев	50
3.3 Рекомендации по изменению формы зуба	55
4 Разработка рекомендаций по выбору оптимального числа режущих зубьев	57
5 Разработка конструкции внутренней многогранной протяжки	64
5.1 Выбор конструктивных решений	64
5.2 Анализ геометрии снимаемого припуска	71
5.3 Расчёт параметров протяжного инструмента.....	74
5.4 Выводы по разработке конструкции многогранной протяжки	80
6 Анализ напряжённого состояния зуба разработанной протяжки	82
6.1 Подготовка исходных данных для анализа	82
6.2 Проведение анализа	82
6.3 Результаты анализа	86

Заключение	89
Список используемых источников.....	91

Введение

Технический прогресс непрерывно движется вперёд, и движение это ускоряется с каждым годом. С движением прогресса меняется и продукция, выпускаемая тысячами предприятий и фабрик. Однако сейчас, конструкции, считающиеся современными и надёжными, могут потерять актуальность в считанные годы и даже месяцы. Поэтому крайне важно «держать руку на пульсе» и постоянно следить за новинками и изменениями в машиностроении, своевременно выпускать на рынок новую продукцию и совершенствовать уже выпускаемые изделия, дабы оставаться на острие прогресса, не допускать отставания от конкурентов, а наоборот, заставлять конкурирующие организации поспевать за уровнем собственного предприятия. В свою очередь, выпуск новых и модернизация действующих изделий предполагает совершенствование технологического процесса, а вместе с ним и модернизацию средств производства – станков, приспособлений и инструмента. Они должны быть лучше и надёжнее, чтобы обеспечивать лучшее качество и работать больший срок без поломок, для удовлетворения растущих потребностей населения и промышленности в различной технике.

Повышение эффективности обработки сложных отверстий многогранной формы имеет важное значение, поскольку подобный конструктивный элемент присутствует в изделиях любого назначения, любой сложности и размера. Двигатели внутреннего сгорания, электроустановки, корпусные детали различных приборов и механизмов, все они могут иметь сложные отверстия для закрепления конструкции либо являться исполнительными базами для работы детали или базами для последующей сборки с другими изделиями. Подобное разнообразие применения отверстий сложной геометрии означает высокую потребность в протяжках такого профиля, что в свою очередь требует большого количества инструмента на производственных предприятиях. Большое количество

однотипных протяжек накладывает ряд ограничений: нужно, чтобы они были просты в изготовлении, служили дольше чем существующие инструменты и обладали высокой ремонтпригодностью для исключения простоя оборудования. Механическая обработка занимает значительную часть затрат на производство изделий, а значит снижение затрат на операции протягивания как части механической обработки приведёт к экономии большого количества средств и снижению себестоимости готовых изделий. В условиях конкуренции высокая эффективность производства позволяет реализовывать продукцию по ценам, не превышающим аналоги, что благоприятно сказывается на спросе. Кроме того, низкая себестоимость производства является хорошим подспорьем для быстрой и дешёвой модернизации производства, так как объём вливаний средств для перехода на изготовление нового типа продукции прямо пропорционален уровню сложности технологического процесса и изначальным затратам на производство действующей конструкции, что в условиях нестабильной экономической обстановки позволяет обходиться собственными средствами и не увеличивать размер долга предприятия перед кредиторами и инвесторами.

1 Состояние вопроса. Формулировка цели и задач

1.1 Проведение литературного обзора

Для понимания, в какую сторону движется наука и техника в части протяжного инструмента, необходимо ознакомиться с существующими конструкциями протяжек. Одним из лучших способов являются проведение литературного анализа – патентного поиска, а также поиска среди научных и выпускных работ. Именно они, как правило, содержат в себе пласт новой информации, открытой и систематизированной деятелями науки. С массовыми конструкциями, выпускаемыми на протяжении долгого времени, ситуация предстаёт иначе – информации о патентах на них весьма мало, а тонкости вроде материала заготовки и технологии изготовления в открытом доступе найти практически невозможно, поскольку они представляют собой коммерческую тайну. Даже если найти сотрудников предприятий, готовых поделиться подобными сведениями, разумеется, исключительно в научных целях, использовать такие данные потом весьма затруднительно в силу их отрывочного характера. Более того, в случае успешного исследования, подобные предприятия, как правило, редко заинтересованы в практическом применении полученных результатов. Тем не менее, это не означает, что в данной работе будет проигнорирован анализ типовой технологии изготовления инструмента. Протяжка представляет собой весьма специфичный инструмент, и любая информация, касающаяся её проектирования, изготовления и работы может быть весьма полезна. Однако, согласно изложенным выше причинам, предпочтение будет отдано проведению патентного поиска и поиска среди научных работ последних лет. Не стоит забывать и о рассмотрении методик расчёта протяжек, как отправной точки проектирования любого изделия. Поскольку подобные

методики могут быть весьма объёмны для работы, подобной этой, будет в методиках будет рассмотрен лишь отрезок, посвящённый силовому расчёту, как представляющему в данных условиях наибольший интерес.

Кроме того, для получения практических результатов исследования будет полезно коснуться темы проведения анализа напряжённого состояния изделия. Для начала стоит выбрать программу для анализа, чтобы получить как можно более точные результаты, при этом затратив на опыты как можно меньшее время, в том числе на освоение программы.

1.2 Результаты литературного обзора

1.2.1 Патент на протяжку для чистовой обработки многогранных отверстий

Для исследования процесса обработки многогранных отверстий протяжками с групповой схемой срезания припуска был проведён поиск среди патентных и научных работ. Оказалось, что подходящих для исследования результатов в сети Интернет не так уж много. Результаты поиска приведены ниже.



СОЮЗ СОВЕТСКИХ
СОЦИАЛИСТИЧЕСКИХ
РЕСПУБЛИК

(19) **SU (11) 1060357 A**

3(51) В 23 Д 43/02

ГОСУДАРСТВЕННЫЙ КОМИТЕТ СССР
ПО ДЕЛАМ ИЗОБРЕТЕНИЙ И ОТКРЫТИЙ

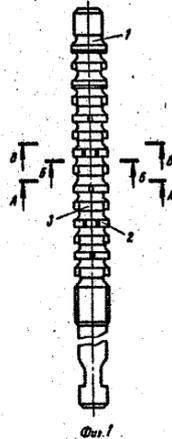
ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ И АВТОРСКОМУ СВИДЕТЕЛЬСТВУ



- (21) 3498123/25-08
(22) 11.10.82
(46) 15.12.83. Бюл. № 46
(72) Е.А.Миронов
(53) 621.919.2(088,8)
(56) Л. Ашихмин В.Н. Протягивание. М.,
"Машиностроение", 1981, с. 83,
фиг. 61.

(54) (57) ПРОТЯЖКА ДЛЯ ЧИСТОВОЙ ОБРА-
БОТКИ МНОГОГРАННЫХ ОТВЕРСТИЙ ПО ПРО-
ФИЛЬНОЙ СХЕМЕ РЕЗАНИЯ, ПРЕДСТАВЛЯЮ-
ЩАЯ СОБОЙ МНОГОГРАННЫЙ СТЕРЖЕНЬ, НА

БОКОВЫХ СТОРОНАХ КОТОРОГО ВЫПОЛНЕНЫ
ЗАТОЧЕННЫЕ ГЛАВНЫЕ И ВСПОМОГАТЕЛЬНЫЕ
РЕЖУЩИЕ КРОМКИ ЗУБЬЕВ, ОТЛИЧА-
ЮЩАЯСЯ ТЕМ, ЧТО, С ЦЕЛЬЮ ПОВЫ-
ШЕНИЯ КАЧЕСТВА ПРОТЯГИВАНИЯ ОТВЕР-
СТИЙ ПУТЕМ УСТРАНЕНИЯ НЕПОСРЕДСТВЕН-
НОГО КОНТАКТА И ТРЕНИЯ ВСПОМОГАТЕЛЬНЫХ
РЕЖУЩИХ КРОМОК ОБ ОБРАБОТАННУЮ ПЕ-
ВЕРХНОСТЬ, ВСПОМОГАТЕЛЬНЫЕ РЕЖУЩИЕ
КРОМКИ КАЖДОГО ЗУБА РАСПОЛОЖЕНЫ НА
ОДНОЙ БОКОВОЙ СТОРОНЕ С ГЛАВНЫМИ РЕ-
ЖУЩИМИ КРОМКАМИ СМЕЖНЫХ ЗУБЬЕВ И ЗА-
ТОЧЕНЫ С ПОСЛЕДНИМИ ЗАПОДЛИЦО.



(19) **SU (11) 1060357 A**

Рисунок 1 – Патент 1

Представленная в [19] и на рисунке 1 протяжка отличается в конструктивной части тем, что представляет собой многогранный стержень с заточенными главными и вспомогательными режущими кромками на боковых сторонах инструмента. Вспомогательные режущие кромки расположены на одной боковой стороне с главными режущими кромками смежных зубьев и заточены с ними заподлицо.

1.2.2 Патент на деформирующе-режущую протяжку

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

(19) **RU** ⁽¹¹⁾ **2 550 984** ⁽¹³⁾ **C2**



ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ

(51) МПК
B23D 43/02 (2006.01)

(12) ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ПАТЕНТУ

прекратил действие, но может быть восстановлен (последнее изменение статуса):
Статус: 27.07.2018)
Поплатина: учтена за 4 год с 15.10.2016 по 14.10.2017

(21)(22) Заявка: 2013145905/02, 14.10.2013

(24) Дата начала отсчета срока действия патента:
14.10.2013

Приоритет(ы):

(22) Дата подачи заявки: 14.10.2013

(43) Дата публикации заявки: 20.04.2015 Бюл. №
11

(45) Опубликовано: 20.05.2015 Бюл. № 14

(56) Список документов, цитированных в отчете о
поиске: RU 2380202 C1, 27.01.2010. SU
543469 A1, 25.01.1977. RU 2380203 C1,
27.01.2010. EP 1477255 A1, 17.11.2004

Адрес для переписки:

426069, Удмуртская республика, г.Ижевск,
ул. Студенческая, 7, ФГБОУ ВПО
"Ижевский государственный технический
университет имени М.Т. Калашникова"

(72) Автор(ы):

Батинов Игорь Васильевич (RU),
Петрова Екатерина Сергеевна (RU)

(73) Патентообладатель(и):

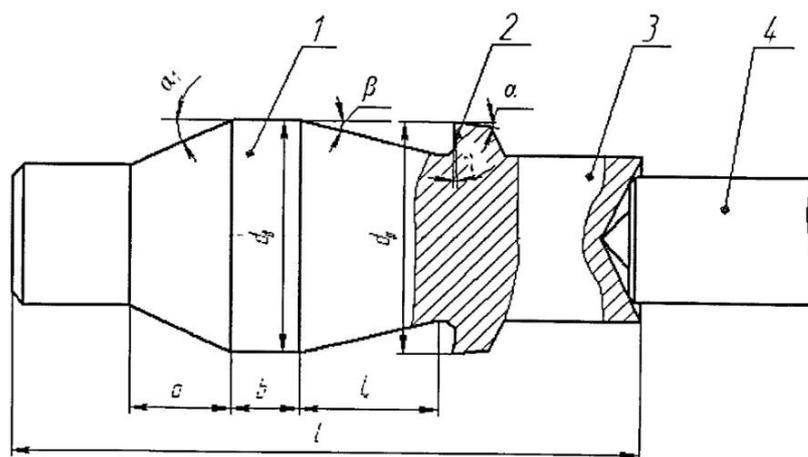
федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего
профессионального образования
"Ижевский государственный технический
университет имени М.Т. Калашникова"
(RU)

(54) ДЕФОРМИРУЮЩЕ-РЕЖУЩАЯ ПРОТЯЖКА

(57) Реферат:

Изобретение относится к металлообработке. Деформирующе-режущая протяжка содержит последовательно расположенные деформирующий элемент с заборным и обратным конусами, режущий зуб и хвостовик. Режущий зуб расположен в области обратного конуса деформирующего элемента и выполнен острозаточенным с передним углом, составляющим $\gamma=5-20^\circ$, и задним углом $\alpha=2-3^\circ$. В результате обеспечивается упрощение конструкции протяжки и повышение ее технологичности.

Рисунок 2 – Патент 2



Фиг.1

Рисунок 3 – Патент 2 (эскиз инструмента)

Представленная в [20] и на рисунках 2 и 3 деформирующе-режущая протяжка состоит из следующих деталей: собственно, деформирующий элемент, состоящий в свою очередь, из заборного и обратного конусов; режущие зубья и хвостовик. Зубья расположены за деформирующим элементом и имеют передний угол в пределах $5-20^\circ$, задний угол в пределах $2-3^\circ$. Создатели протяжки считают, что подобное решение упрощает конструкцию изделия и повышает её технологичность.

1.2.3 Магистерская диссертация на тему: «Модульная система сборных протяжек со сменными пластинами из твердого сплава для обработки сложных поверхностей»

Система, разработанная в [21], и представленная на рисунке 4, позволяет обрабатывать отверстия различных профилей благодаря сменным корпусам с пластинами из твердого сплава. Благодаря замене материала режущих зубьев с часто применяемой стали Р6М5 на ВК8, разработанный инструмент можно применять для обработки труднообрабатываемых материалов, а также увеличить подачу до $0,21$ мм/зуб.

1.3 Анализ рассмотренных конструкций

Теперь необходимо разобраться, возможно ли применить конструктивные решения, рассмотренные выше, для модернизации устройства протяжки.

Одним из главных недостатков протяжки, представленной в п. 1, является ее цельное исполнение, что влечёт за собой наличие всех недостатков, присущих классической компоновке. Разработанная ранее конструкция уже избавлена, как минимум, от части из них.

Конструктивные решения протяжки, описанной в п. 2 применить так же затруднительно, поскольку для создания деформирующего элемента потребуется применение другого, более прочного материала при изготовлении хвостовика, что повлечет за собой значительное увеличение затрат на изготовление детали.

Протяжка, представленная в п. 3 является круглой, однако отдельные технические решения, в частности, способ закрепления режущих пластин и иной материал изготовления режущих секций представляют собой интерес для рассмотрения и применения в новом изделии.

1.4 Методы силового расчёта протяжек

В основе корректной работы любого инструмента в первую очередь лежит правильная методика его проектирования. Если резец, сверло или протяжка сконструированы неправильно, то никакое точное оборудование уже не будет способно исправить его недостатки. Поэтому особое внимание следует уделять теоретической части разработки инструмента, чтобы избежать ошибок ещё до стадии, когда изделие появится в металле и конструктивные просчёты будут стоить вполне конкретного числа испорченных заготовок и срыва производственного плана.

Для понимания принципов проектирования протяжного инструмента в качестве примеров будет рассмотрено два метода силового расчёта протяжек, поскольку именно силовой расчёт обеспечивает корректный съём припуска, точность и чистоту полученной поверхности.

1.4.1 Проектирование протяжек для обработки цилиндрических отверстий

Методика [23], разработанная Резниковым Л.А. На её основе была сконструирована сборная протяжка, анализ обработки которой представлен в данной работе. Ниже представлена лишь часть методики, описывающая силовой расчёт конструкции.

1.4.1.1 Расчет шага режущих зубьев

Шаг режущих зубьев рассчитывается по формуле

$$t = (1,25...1,5)\sqrt{L_0} , \quad (1)$$

где: L_0 – длина протягивания, из задания.

1.4.1.2 Назначение размеров стружечных канавок

Размеры стружечных канавок назначаются согласно [23, табл. 2], исходя из шага режущих зубьев.

1.4.1.3 Расчёт толщины среза

Толщина среза, приходящегося на один зуб протяжки, рассчитывается согласно формуле

$$a_z = \frac{F_K}{K \cdot L_0} , \quad (2)$$

где: F_K – площадь сечения канавки; K – коэффициент заполнения канавки.

Для стальных заготовок коэффициент принимается равным $K = 3,5...4$.

1.4.1.4 Определение числа одновременно работающих режущих зубьев

Для этого необходимо воспользоваться формулой

$$q = \left[\frac{L_0}{t} \right] + 1 . \quad (3)$$

1.4.1.5 Расчёт силы, приходящейся на контур

Для того чтобы рассчитать силу, приходящуюся на 1 мм длины обрабатываемого контура, нужно воспользоваться формулой

$$p_z = C_p \cdot \sigma_b \cdot a_z^{0,85} \cdot K_\gamma, \quad (4)$$

где C_p – табличный коэффициент, выбираемый исходя из марки обрабатываемого материала.

Коэффициент K_γ рассчитывается по формуле

$$K_\gamma = \frac{90 - \gamma}{75}. \quad (5)$$

1.4.1.6 Расчёт усилия протягивания

Усилие протягивания рассчитывается по формуле

$$P_T = \pi \cdot p_z \cdot D \cdot q \quad (6)$$

Напряжения в канавке перед первым зубом режущей части протяжки

$$\sigma_1 = \frac{4 \cdot P_T}{\pi \cdot (D_0 - 2 \cdot h)^2}. \quad (7)$$

Необходимо, чтобы выполнялось условие $\sigma_1 \leq [\sigma_n] = 450$ МПа.

1.4.1.7 Выбор наибольшего диаметра хвостовика

Параметры хвостовика выбираются согласно [23], табл. 4. Диаметр d_1 выбирается как ближайшее значение, которое меньше диаметра отверстия под протягивание.

1.4.1.8 Расчёт напряжения в опасном сечении хвостовика

Напряжение, возникающее под действием силы P_T , рассчитывается по формуле

$$\sigma_x = \frac{P_T}{F_x}, \quad (8)$$

где: F_x – площадь опасного сечения.

Необходимо, чтобы выполнялось условие $\sigma_x \leq [\sigma_x] = 250$ МПа.

Если условие не выполняется, необходимо уменьшить толщину среза на черновых зубьях протяжки до значения, определяемого формулой

$$a_z \leq \left(\frac{F_x}{\pi \cdot C_p \cdot K_\gamma \cdot D \cdot q} \cdot \frac{[\sigma_x]}{\sigma_B} \right)^{1/0,85} \quad (9)$$

В таком случае нужно пересчитать силу, приходящуюся на 1 мм длины обрабатываемого контура и пересчитать усилие протягивания, воспользовавшись формулами 4 и 6, после чего подставить новое значение в формулу 8.

1.4.2 Проектирование инструментов, расчёт и проектирование круглых протяжек

Методика [14], разработанная Дерли А.Н. в орловском Госуниверситете-УНПК. Как и в случае с предыдущей методикой, ниже предлагается отрывок из учебного пособия, касающийся только силового расчёта инструмента.

1.4.2.1 Порядок расчёта

Диаметр хвостовика выбирают немного меньше, чем диаметр отверстия до протягивания (табл. П.1.4). Это делается для того, чтобы он мог пройти через отверстие в заготовке. Принимается ближайшее стандартное значение. Сила, допустимая прочностью хвостовика, рассчитывается по формуле

$$P_{хв} = [\sigma]_p \cdot F_{оп}, \quad (10)$$

где $[\sigma]_p$ – допустимое напряжение при растяжении, МПа; $F_{оп}$ – площадь опасного сечения хвостовика, мм².

Площади опасных сечений стандартных хвостовиков стандартизированы, и показаны в ГОСТ 4044-70: для хвостовиков из быстрорежущей стали $[\sigma]_p = 400$ МПа; для хвостовиков из сталей ХВГ и 40Х $[\sigma]_p = 300$ МПа.

Если выбранному диаметру хвостовика соответствует сила протягивания, допустимая по условию его прочности и значительно большая, чем тяговое усилие, то диаметр хвостовика можно уменьшить. В этом случае хвостовику принятым диаметром должна соответствовать сила, допустимая

прочностью его опасного сечения, несколько большая, чем тяговая сила станка.

Передний γ и задний α углы выбирают по [14], табл. П.1.5. Передний угол выбирают в зависимости от группы обрабатываемости и вида зубьев.

Скорость резания выбирают в зависимости от типа производства, группы качества и группы обрабатываемости и проверяют по характеристике станка (см. [14], табл. П.1.6). Если на станке не предусмотрена требуемая скорость, то принимают для расчета имеющуюся скорость.

При определении подачи черновых зубьев по средней наработке между отказами S_{zc} сначала устанавливают наработку чистовой части согласно [14], табл. П.2.1 – П.2.7 для принятой в табл. П.1.6 скорости резания при максимальной подаче чистовых зубьев 0,02 мм. Подачу черновых зубьев выбирают из условия равной стойкости черновой и чистовой частей протяжки по тем же таблицам для той же скорости резания и принимают левее жирной ломаной линии в [14], табл. П.2.1 – П.2.7. Нарботка черновых зубьев должна быть равна наработке чистовых зубьев или несколько больше её.

Выбранные подачи черновых зубьев из условия равной стойкости при протягивании отверстий 1-й и 2-й групп качества в заготовках из вязких мягких металлов (1, 2, 3 и 10-я группы обрабатываемости), а также из хрупких металлов (6, 7, 8 и 9-я группы обрабатываемости) во избежание вырывов, рванин и сколов на протянутой поверхности следует ограничивать в соответствии с [14], табл. П.3.1.

Поправочные коэффициенты на среднюю наработку между отказами берут из [14], табл. П.3.2.

Глубину стружечной канавки h , необходимой для размещения стружки при подъеме черновых зубьев S_{zc} , определяют по формулам:

– для сливной стружки

$$h = 1,1283 \sqrt{Kl_s S_{zc}} ; \quad (11)$$

– для стружки надлома

$$h = 0,8917\sqrt{Kl_s S_{zc}}, \quad (12)$$

где l_s – суммарная длина протягиваемых участков, мм.

Рекомендуются следующие значения K для сталей всех групп и алюминия: 10-я группа обрабатываемости – $K = 3$ (допускается $K = 2,5$); 6, 7, 8 и 9-я группы обрабатываемости – $K = 2,5$ (допускается $K = 2$).

По расчетному значению h выбирают из [14], табл. П.3.3 ближайшее большее значение глубины стружечной канавки. Остальные размеры стружечной канавки (b, R, r) принимают из той же таблицы.

Для обеспечения достаточной жесткости протяжек, имеющих диаметр сечения по дну стружечной канавки меньше 40 мм, необходимо, чтобы глубина стружечной канавки была равна:

$$h_{ж} = (0,2...0,3)D_0, \quad (13)$$

Меньшее значение коэффициента в формуле 13 выбирают при $D_0 < 20$ мм. Если $h_{ж}$ больше выбранного табличного h , то необходимо, чтобы $S_{zo} = S_{zc}$. Если $h_{ж} < h$, то для размещения стружки подача должна быть уменьшена:

– для сливной стружки

$$S_{zo} = 0,785 \frac{h_{б.Т}^2}{h_{жТ} l_s}; \quad (14)$$

– для стружки надлома

$$S_{zo} = 1,267 \frac{h_{б.Т}^2}{h_{жТ} l_s}, \quad (15)$$

где $h_{жТ}$ принимают ближайшей меньшей к $h_{ж}$ согласно [14], табл. П.3.3.

Шаг черновых зубьев t_0 выбирают по [14], табл. П.3.3 в зависимости от принятой ранее глубины стружечной канавки. Поскольку одной и той же глубине стружечной канавки соответствует несколько значений шага, то для первого варианта берут меньший из них. Шаг и профиль переходных зубьев – такие же, как у черновых.

Число одновременно участвующих в работе зубьев находят по

формуле

$$z_p = \frac{l_{\max}}{t_0} + 1. \quad (16)$$

Если z_p получается нецелым числом, то дробную часть не учитывают. При протягивании прерывистых отверстий z_p подсчитывают для каждого участка и их округленные значения суммируют:

$$z_p = z_{p1} + z_{p2} + z_{p3} + \dots \quad (17)$$

Минимально допустимое $z_p = 3$.

В исключительных случаях (при очень короткой длине протягиваемого участка) допускается $z_p = 2$.

Сила резания ограничивается тяговой силой станка $P_{\text{ст}}$ или прочностью протяжки в опасных сечениях по хвостовику $P_{\text{хв}}$ и по впадине перед первым зубом $P_{\text{о.п.}}$. Наименьшую из этих сил следует принимать в качестве максимально допустимой силы резания:

$$P_{\text{о.п.}} = (0,8 \dots 0,9)Q, \quad (18)$$

где Q – паспортная тяговая сила станка.

Величину $P_{\text{хв}}$ рассчитывают по формуле 10, а $P_{\text{о.п.}}$ – по формуле

$$P_{\text{о.п.}} = F_{\text{о.п.}} [\sigma]_p, \quad (19)$$

где

$$F_{\text{о.п.}} = 0,785 \cdot (D_0 - 2h)^2. \quad (20)$$

Для протяжек из быстрорежущей стали диаметром до 15 мм обычно принимают $[\sigma]_p = 400 \dots 500$ МПа; диаметром более 15 мм – $[\sigma]_p = 350 \dots 400$ МПа; для протяжек из ХВГ – $[\sigma]_p = 200$ МПа.

Число зубьев в группе z_c может меняться от 2 до 5; его определяют по формуле

$$z_c = \frac{\pi D q_0 z_p K_{\text{PM}} K_{\text{PO}} K_{\text{PK}} K_{\text{PP}}}{P_{\text{max}}}, \quad (21)$$

где q_0 принимают согласно [14], табл. П.3.4 в зависимости от S_{zc} и γ ; поправочные коэффициенты K_{PM} , K_{PO} , K_{PK} , K_{PP} – согласно [3], табл. П.3.5.

Поправочный коэффициент K_{PO} задают в зависимости от вида СОЖ, которую конструктор назначает по [14], табл. П.3.2. Если подсчитанное по формуле 21 $z_c < 2$, то дальнейшие расчеты ведут для $z_c = 2$. Если z_c – дробное число, большее двух, то его округляют до ближайшего большего числа (до 3, 4 или 5). Если $z_c > 5$, то при $z_c = 5$ определяют q_0 :

$$z_c = \frac{z_c P_{\max}}{\pi D q_0 z_p K_{PM} K_{PO} K_{Pk} K_{Pp}}. \quad (22)$$

Из [14], табл. П.3.4 берут новое значение подачи по ближайшему значению q_0 , меньшему, чем расчётное.

При расчете на ЭВМ эту операцию не выполняют, а рассчитывают новые варианты при подаче, уменьшенной на 0,01 мм.

Силу протягивания определяют по формуле

$$q_0 = \frac{z_c P_{\max}}{\pi D z_p K_{PM} K_{PO} K_{Pk} K_{Pp}}. \quad (23)$$

1.4.3 Результаты рассмотрения методов силового расчёта протяжек

Таким образом, в двух предыдущих разделах были рассмотрены две методики силового расчёта инструмента. В целом принципы расчёта во многом схожи, однако первый из них видится намного более простым. Кроме того, создатель первой методики является научным руководителем автора настоящей работы, что позволяет значительно упростить понимание тонкостей расчёта. Поэтому расчёт [23] будет принят в качестве основы для разработки конструкции инструмента.

1.5 Типовая технология изготовления протяжного инструмента

Далее рассмотрим технологию изготовления протяжек. В качестве образца для сравнения взят типовой технологический процесс круглой протяжки, изготавливаемой на одном из промышленных предприятий Самарской области. Это позволит сравнить разрабатываемую протяжку с

реальным изделием, производящемся массово и конструкция которого отработана на протяжении многих лет.

Представленная протяжка представляет собой цельный инструмент и изготавливается из стали Р6М5. Чертеж протягиваемого отверстия представлен ниже.

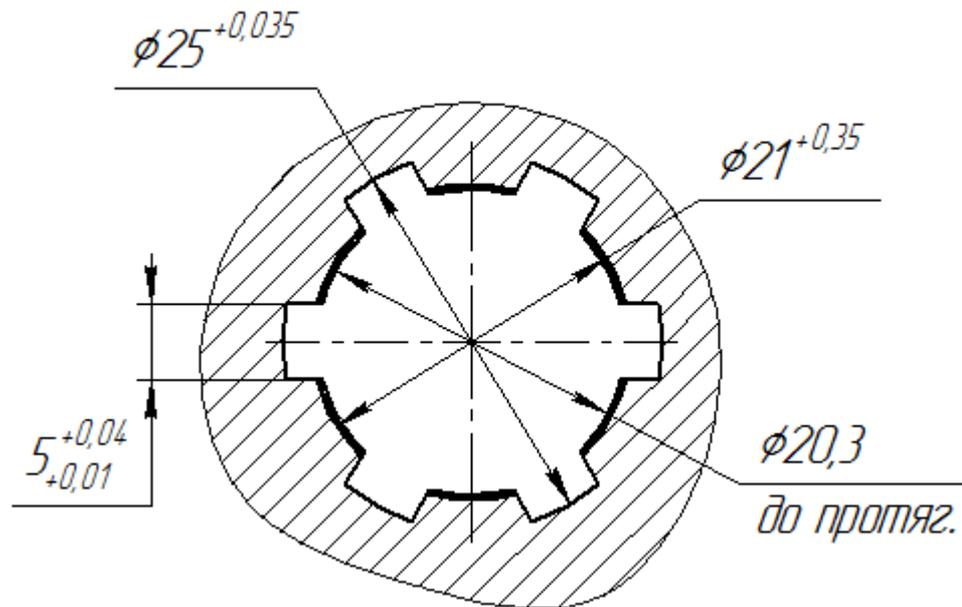


Рисунок 5 – Данные о протягивании круглой протяжкой

Некоторые данные о протягивании данным изделием:

1. Материал протягивания: Сталь 40
2. Длина протягивания: $L = 31$ мм
3. Усилие протягивания: $P = 1500$ кг
4. Напряжение в опасном сечении: $G = 11,5$ кг/мм²
5. Коэффициент вместимости стружки: $k = 6,5$
6. Число шлицев: $z = 6$.

Также имеется маршрутная карта изготовления круглой протяжки. В ней задан следующий порядок выполнения операций.

Таблица 1 – Маршрутная карта

Операция	Содержание
Заготовительная	Отрезать 7 заготовок длиной 1194 мм. Отрезать образцы Ø35x30 для термообработки
Контроль	Контроль заготовки
Рихтовка	Рихтовать в призмах. Прямолинейность 0,3 мм на всю длину
Фрезерная	Торцевать, центровать
Токарная	Точить по наружному диаметру предварительно
Токарная	Обработать образцы по торцам
Маркировочная	Маркировать образцы: марка стали, шифр протяжки
Рихтовка	Рихтовать в призмах. Прямолинейность 0,3 мм на всю длину
Контроль	
Отпуск	Выполнить высокий отпуск
Токарная	Точить по наружному диаметру с припуском 1,0...1,2 мм
Заточная	Заточить профиль резца из полуфабриката
Токарная	Нарезать зубья по профилю впадины и наружному диаметру с припуском
Заточная	Заточить профиль резца из полуфабриката
Токарная	Точить переднее направление и хвостовик с припуском 0,5...0,6 мм, диаметр шейки окончательно, точить канавки под люнет
Токарная	Точить заднее направление и хвостовик с припуском 0,5...0,6 мм, шейки, фаски в размер.
Токарная	Точить канавку под люнет перед зубом №56
Фрезерная	Фрезеровать лыску на переднем хвостовике с припуском
Фрезерная	Фрезеровать пазы замка на переднем хвостовике с припуском
Слесарная	Притупить острые кромки
Рихтовка	Рихтовать в призмах. Прямолинейность 0,3 мм на всю длину
Контроль	
Закалка	HRC 64...66
Отпуск	Отпустить хвостовик HRC 42...47

Продолжение таблицы 1

Центрошлифовальная	Довести центра
Заточная	Заточить передний угол предварительно с 1 по 93 зуб
Заточная	Шлифовать зубья по профилю впадины начисто с 1 по 93 зуб.
Заточная	Заточить передний угол предварительно с 94 по 117 зуб
Заточная	Шлифовать зубья по профилю впадины начисто с 94 по 117 зуб
Круглошлифовальная	Шлифовать место под люнет окончательно с подрихтовкой для шлифовки переднего направления, заднего направления, хвостовика и рабочей части
Круглошлифовальная	Шлифовать переднее направление и хвостовик в Р-Р
Круглошлифовальная	Шлифовать заднее направление и хвостовик окончательно
Круглошлифовальная	Шлифовать подъем на зубьях
Круглошлифовальная	Шлифовать перепад на зубьях по секциям с 2 по 18 зуб (четные) и с 20 по 36 зуб (четные) и 38, 40 зуб
Круглошлифовальная	Шлифовать подъем на круглых зубьях с 95 по 100 зуб
Круглошлифовальная	Шлифовать зубья со 102 по 116 зуб (четные)
Круглошлифовальная	Шлифовать зубья по заднему углу 11 градусов 30 минут
Круглошлифовальная	Шлифовать зубья по заднему углу 3 градуса
Круглошлифовальная	Шлифовать канавку под люнет перед зубом №56
Круглошлифовальная	Шлифовать занижение на переднем хвостовике в размер
Шлицешлифовальная	Шлифовать шлицы с 51 по 117 зуб предварительно
Шлицешлифовальная	Шлифовать шлицы с 51 по 117 зуб окончательно
Шлицешлифовальная	Шлифовать фасочные зубья
Шлицешлифовальная	Шлифовать поднутрение на нечетных шлицах
Шлицешлифовальная	Шлифовать R на шлицах
Шлицешлифовальная	Шлифовать стружкоразделительные канавки
Заточная	Шлифовать пазы замка, лыску на переднем хвостовике в размер
Заточная	Шлифовать выкружки с затылками по чертежу
Заточная	Заточить зубья по переднему углу
Контроль	
Рихтовка	Подрихтовать
Маркировочная	Маркировать шифр изделия, дату изготовления
Контроль, консервация, упаковка.	

Таким образом, в представленной технологии, в начале присутствует большой объём черновых операций. Затем термические операции для достижения требуемой твёрдости, и наконец большое количество заточных и шлифовальных операций для обеспечения требуемой точности. Всё это в целом свидетельствует о правильности спроектированных операций для изготовления протяжки и о соответствии технологии общепринятым нормам [16], [18].

1.6 Обзор программ для анализа

Использование систем, использующих метод конечно-элементного анализа (МКЭ) позволяет значительно упростить анализ разработанных изделий. Уменьшается количество расчётов, которые необходимо провести в процессе проектирования, исключается вероятность появления ошибок, отсюда, уменьшается время на проектирование. Кроме того, во многих случаях отпадает необходимость в тестировании физических образцов, что значительно экономит средства на этапе запуска в производство.

В настоящей работе так же будет проведён анализ обработки отверстия изготовленной протяжкой, поэтому необходимо будет выбрать подходящую программу, которая позволит спроектировать поведение сборного инструмента достаточно точно и без лишних сложностей.

В настоящее время различными компаниями предлагается множество систем для анализа, однако часть из них представляет собой упрощенные модули, идущие «в нагрузку» к системам автоматизированного проектирования, предназначенным в первую очередь именно для проектирования продукции, но никак не для проведения серьёзного анализа. Поэтому ниже будут рассмотрены несколько самостоятельных программ, относящихся к категории CAE (Computer-Aided Engineering), то есть программ, предназначенных для расчётов, анализов и симуляций. Кроме того, компании, разрабатывающие подобные программные комплексы, как

правило сосредотачивают внимание на какой-то определённой сфере, как например автомобилестроение или космонавтика, поэтому важно выбрать программу, наиболее подходящую для решения конкретных задач.

1.6.1 Программная система конечно-элементного анализа ANSYS

Программное обеспечение ANSYS для структурного анализа позволяет решать сложные инженерные задачи и создавать более качественные и быстрые решения по проектированию. С помощью продукта для анализа методом конечных элементов (FEA), доступного в пакете, можно настраивать и автоматизировать решения для своих задач структурной механики и параметризовать их для анализа нескольких сценариев проектирования. Программное обеспечение ANSYS для структурного анализа используется во всех отраслях промышленности, чтобы помочь инженерам оптимизировать конструкцию своих продуктов и снизить затраты на физическое тестирование. Пример работы в программе показан на рисунке 7.

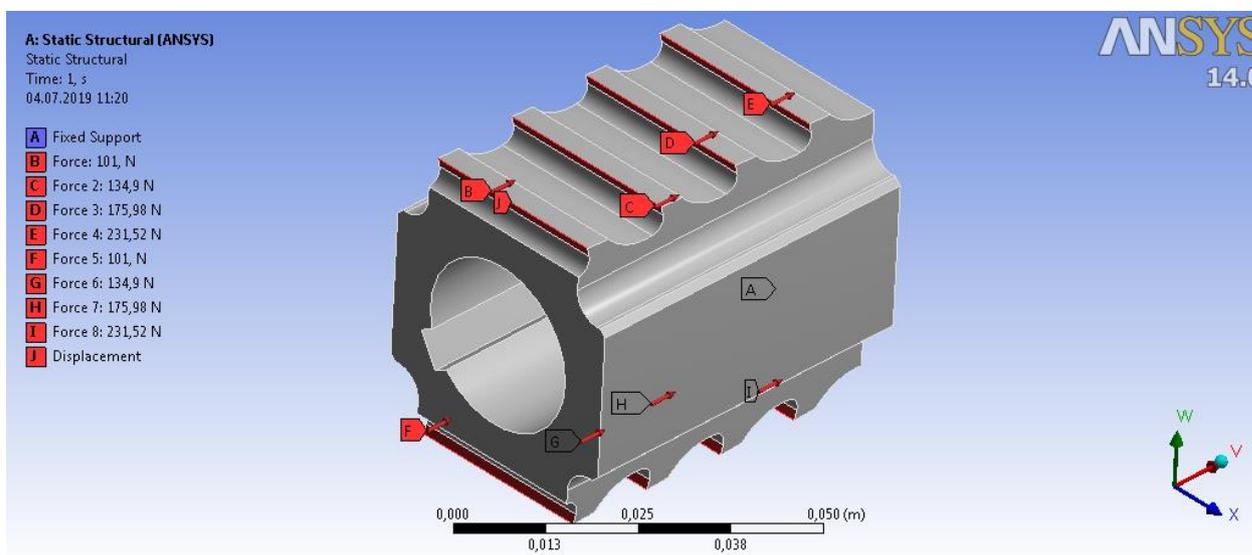


Рисунок 7 – Анализ детали в модуле ANSYS Mechanical

ANSYS поможет любому, от дизайнера и случайного пользователя, которые ищут быстрые, простые и точные результаты, до экспертов, которые

хотят моделировать сложные материалы, большие сборки и нелинейное поведение. Интуитивно понятный интерфейс ANSYS Mechanical позволяет инженерам всех уровней получать ответы быстро и с большой точностью. Программа позволяет проводить расчет как на локальном компьютере, так и в облаке. Можно запустить сотни точек проектирования, используя распределенные вычислительные сервисы ANSYS (DCS).

Модуль Mechanical имеет интеллектуальную технологию создания сетки, поэтому можно быстро получить оптимальную структуру для каждой модели. Легко добавленные элементы управления позволяют настраивать сетку по мере необходимости.

Моделирование сложных материалов и поведения материалов может быть достигнуто с помощью встроенных моделей, определяемых пользователем моделей материалов или конструктора материалов в механическом режиме для создания представительных элементов объема (RVE). Модели с очень большой деформацией не должны быть упрощены путем ненужного переключения на явные решатели. Способность к нелинейной адаптивности (NLAD) автоматически обрабатывает сложные моделирования, объединяя решение по мере его продвижения.

Технология разрушения с использованием технологии морфинга с адаптивным повторным перемешиванием (SMART) была добавлена в Mechanical для моделирования роста трещин в структурах, где существует проблема разрушения, поэтому сложные процессы построения сетки вслепую больше не имеют смысла.

ANSYS Motion – это инженерное решение нового поколения, основанное на гибкой динамике нескольких тел в механическом интерфейсе. Оно позволяет быстро и точно анализировать жесткие и гибкие тела в одном решателе. Серия наборов инструментов расширяет функциональные возможности ANSYS Motion, так что теперь появляются новые возможности, к примеру исследование поведения конструкции трансмиссии транспортного

средства, включая шестерни и подшипники, а также системы, включающие цепи, ремни и непрерывные гусеницы.

ANSYS предлагает комплексное масштабируемое программное решение, которое сводит к минимуму риски процессов аддитивного производства и обеспечивает высококачественные сертифицируемые детали. С аддитивными решениями ANSYS вы можете полностью перейти от проектирования для аддитивного производства (DfAM) к квалификации и сертификации деталей с возможностью подготовки файла сборки, моделирования процесса сборки металла AM и анализа материала на уровне микроструктуры.

Доступен полный набор инструментов анализа для анализа случаев одиночной нагрузки, анализа вибрации или переходных процессов; имеется возможность изучить линейное и нелинейное поведение материалов, соединений и геометрии. Усовершенствованная технология решателя с ANSYS Autodyn и ANSYS LS-DYNA позволяет выполнять имитацию падения, удара и взрыва. ANSYS AQWA, наряду с возможностями морского моделирования в Mechanical, предоставляет отраслевые возможности для инженеров, проектирующих морские среды.

1.6.2 Семейство модулей инженерного анализа Solidworks

SOLIDWORKS Simulation – это решение, интегрированное в среду SOLIDWORKS, предназначенное для проведения инженерных расчётов и анализа изделий методом конечных элементов. SOLIDWORKS Simulation позволяет имитировать статический анализ как нелинейного, так и линейного вида, анализировать устойчивость, температуру, проводить частотный анализ и анализ сосудов давления. Так же имеется возможность проводить опыты на ударную нагрузку, различные типы динамического анализа. Кроме того, можно проанализировать степень оптимизации продукта. Пример работы в программе показан на рисунке 8.

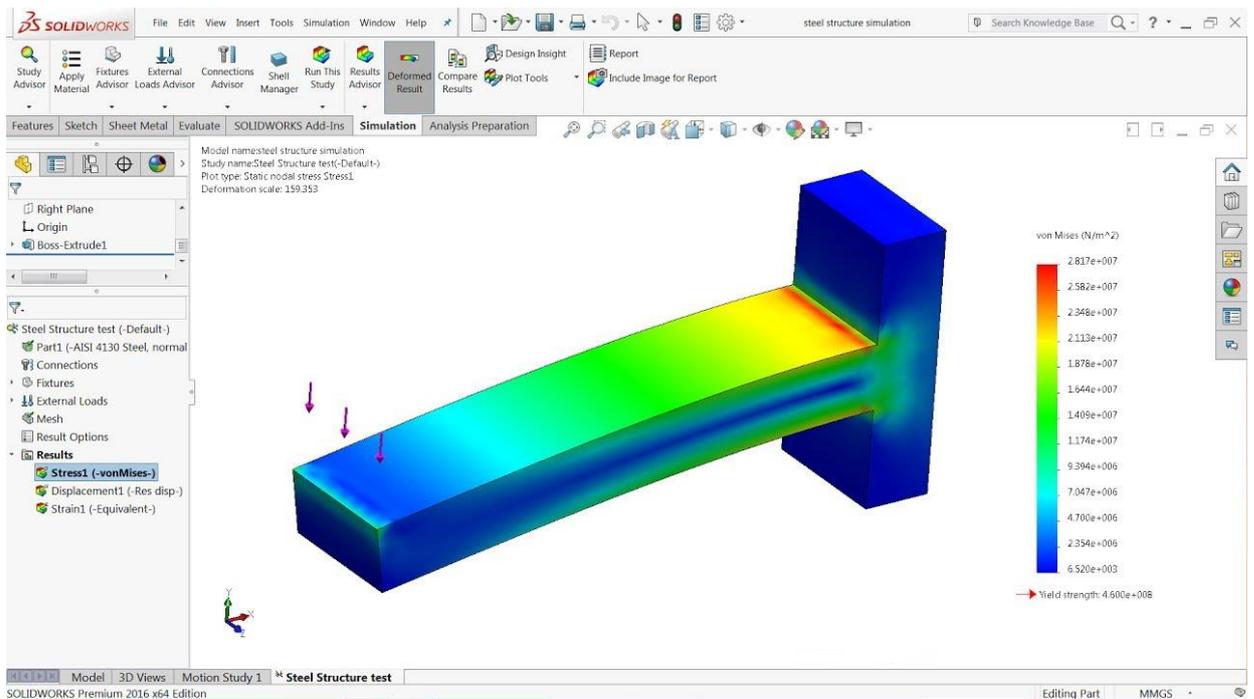


Рисунок 8 – Анализ балки в программе SOLIDWORKS Simulation

Возможности пакета SOLIDWORKS Simulation:

- а) анализ методом конечных элементов изделий, сборок, подборок, сварных конструкций. Автоматическое и ручное создание КЭ сеток: 3-х и 6-ти узловые треугольники, 4-х и 10-ти узловые тетраэдры, стержней, балок;
- б) определение запаса прочности, усталостных напряжений, частотных характеристик, анализ движения механизмов;
- в) проверка влияния температуры и других воздействий на модель;
- г) расчёт тонкостенных элементов, изделий из листового металла, сосудов давления;
- д) параметрическая оптимизация и оптимизация изделия с использованием исследования топологии;
- е) нелинейные статические и динамические исследования, расчёт потери устойчивости и имитация падения;
- ж) автоматическое формирование отчета по анализу;
- з) «Консультант Simulation» для быстрого определения типа расчёта и конечных условий.

Использование SOLIDWORKS SIMULATION позволяет:

а) сократить длительность опытно-конструкторских работ благодаря анализу рабочих режимов изделия в цифровой среде;

б) сократить расход материала за счет выявления и оптимизации конструктивных элементов, применение которых избыточно;

в) исследовать сразу нескольких вариантов изделий в рамках одного расчёта.

1.6.3 Система конечно-элементного анализа MSC Nastran

MSC Nastran – это многофункциональное приложение для структурного анализа, используемое инженерами для выполнения статического, динамического и термического анализа в линейных и нелинейных областях, дополненное автоматизированной структурной оптимизацией и отмеченные наградами технологии встроенного анализа усталости, которые обеспечиваются высокопроизводительными вычислениями. Пример работы в программе показан на рисунке 9.

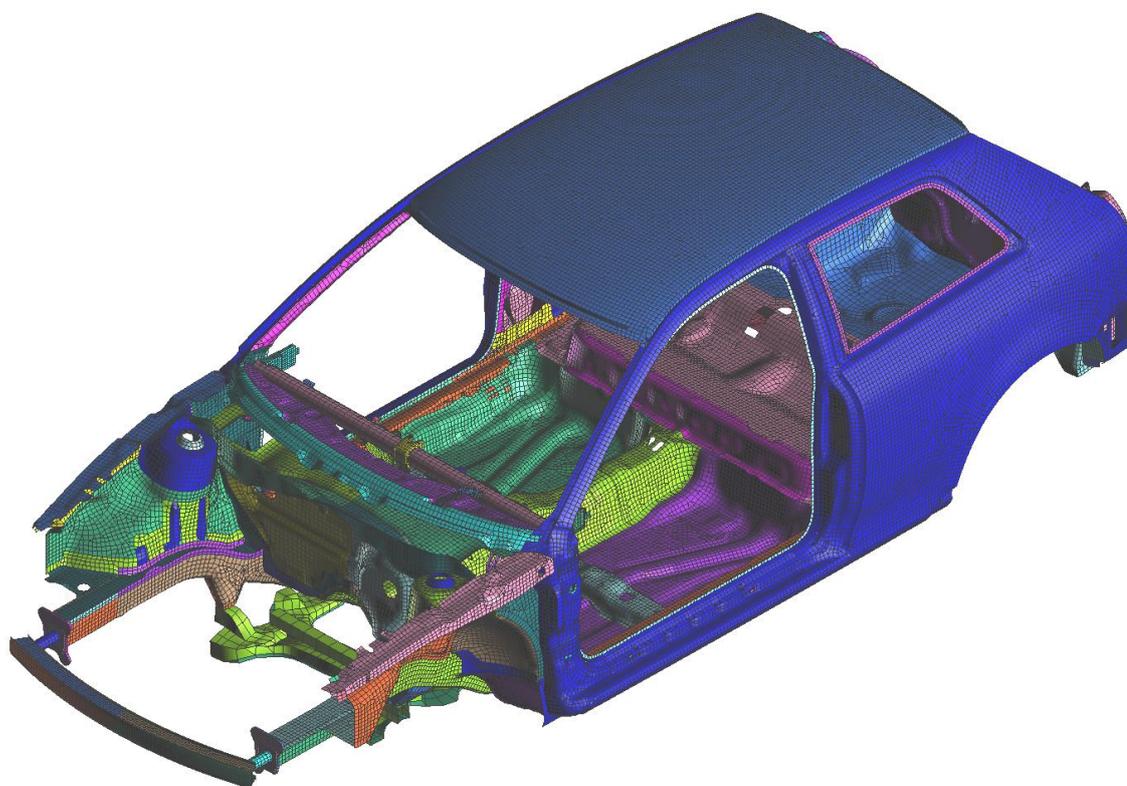


Рисунок 9 – Анализ конструкции автомобиля в программе MSC Nastran

MSC Nastran используется инженерными работниками для проверки прочности и жёсткости систем. Это делается для того, чтобы предотвратить разрушения (чрезмерные напряжения, резонанс, деформацию или вредную деформацию), которые могут поставить под угрозу структуру изделия и, соответственно, безопасность людей. MSC Nastran также используется для повышения экономичности и комфорта пользователей при проектировании конструкций.

Производители используют уникальный многофункциональный подход MSC Nastran к анализу структуры на всех этапах разработки готовых изделий. MSC Nastran используется для:

а) создания прототипа конструкции на практике ещё на первых стадиях процесса проектирования, экономии затрат, традиционно связанных с физическим прототипированием;

б) устранения структурных проблем, которые могут возникнуть во время обслуживания продукта, сократив время простоя и затраты;

в) оптимизации производительности существующих конструкций или разработки уникальных отличительных качеств продуктов, что даёт отраслевые преимущества перед конкурентами.

MSC Nastran основан на сложных численных методах, наиболее выдающимся из которых является метод конечных элементов. Нелинейные задачи КЭ могут быть решены с помощью встроенных неявных численных методов. Доступен ряд алгоритмов оптимизации, включая MSCADS и IPOPT. Модуль проверки подверженности усталостным нагрузкам в MSC Nastran был разработан совместно nCode International Ltd. и MSC Software.

Общие решения структурного анализа предназначены для одной или нескольких аналитических дисциплин, что позволяет клиентам с одним решением структурного анализа использовать его для широкого спектра инженерных задач.

Можно использовать одну платформу для выполнения линейного или нелинейного анализа для следующих дисциплин: статического,

динамического (включая NVH и акустику), термического и анализа при изгибе, что позволит уменьшить зависимость от нескольких программ структурного анализа от различных поставщиков.

Имеется возможность выполнить анализ усталостности с помощью встроенных технологий усталости, что позволит сократить время, связанное с определением усталостного ресурса.

Можно оценить поведение современных композитов и армированных волокон пластин с помощью встроенного анализа постепенного разрушения и пользовательских настроек для обеспечения однородности среднего поля с Digimat.

1.6.4 Анализ рассмотренных программ

Программный комплекс ANSYS является наиболее подходящим для анализа изделий, относящихся к сфере машиностроения. Она обладает простым интерфейсом и большими возможностями, при этом она не привязана к какой-либо конкретной системе автоматизированного проектирования, что исключает возможность появления программных ошибок на этапе анализа. Наконец, в Тольяттинском государственном университете проводится обучение основам работы в этом комплексе в рамках некоторых предметов, включённых в обязательный курс для инженеров-магистров.

Несмотря на расширенный функционал SOLIDWORKS SIMULATION, она представляет собой семейство модулей анализа в дополнение к основной CAD-программе SOLIDWORKS, и более удобна для проведения всего цикла проектирования в пределах одной среды. Поскольку разработка конструкции протяжки велась в программе КОМПАС-3D, могут возникнуть сложности при импорте геометрии и на этапах отражения результатов.

MSC Nastran обладает более сложным интерфейсом, и больше подходит для расчёта конструкций летальных аппаратов. Кроме того, она наименее распространена в учебных заведениях Российской Федерации.

Таким образом, на основе вышесказанного, расчёт конструкции сборной многогранной протяжки будет проводиться в комплексе ANSYS.

1.7 Формулировка цели и задач

Изучив настоящее состояние вопроса в данный момент, и руководствуясь выбранными инструментами для проектирования и последующего анализа МКЭ, целью настоящей работы является повышение работоспособности внутренних многогранных протяжек. Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

1. Провести анализ напряженного состояния зуба многогранной протяжки
2. Разработать рекомендации по изменению формы зуба
3. Разработать рекомендации по выбору оптимального числа режущих зубьев
4. Разработать конструкцию внутренней многогранной протяжки с групповой схемой съёма припуска
5. Провести анализ напряжённого состояния отдельных деталей полученной сборной протяжки.

2 Анализ напряжённого состояния зуба многогранной протяжки

2.1 Подготовка исходных данных для анализа

Для того, чтобы сформулировать перечень недостатков, которыми обладает классическая шестигранная протяжка, необходимо провести анализ напряжённого состояния инструмента. Это позволит наметить пути для устранения проблем, связанных с геометрией зуба и силовой схемой, чтобы в дальнейшем применить конкретные технические решения, который сделают инструмент эффективнее и производительнее.

Поскольку основные проблемы, связанные с шестигранной протяжкой, возникают в процессе обработки, нет нужды моделировать поведение всего инструмента целиком в системе СПИЗ (станок – приспособление – инструмент – заготовка). Это значительно усложнит процесс симуляции и займёт слишком много времени. Достаточно смоделировать небольшой участок, на котором непосредственно происходит обработка заготовки в некоторый момент времени. Для этого понадобятся две модели – некая секция протяжного инструмента и часть отверстия в процессе обработки.

Согласно предыдущему разделу, в качестве программы для расчёта выбрана система конечно-элементного анализа ANSYS. Наиболее доступным и подходящим модулем в данном случае представляется модуль Static Structural. Он позволяет указать нагрузки, выбрать статичные заделки и рассмотреть результат с точки зрения напряжений, перемещений и тому подобного.

В качестве объекта анализа выбрана режущая секция шестигранной протяжки, чертёж которой представлен ниже.

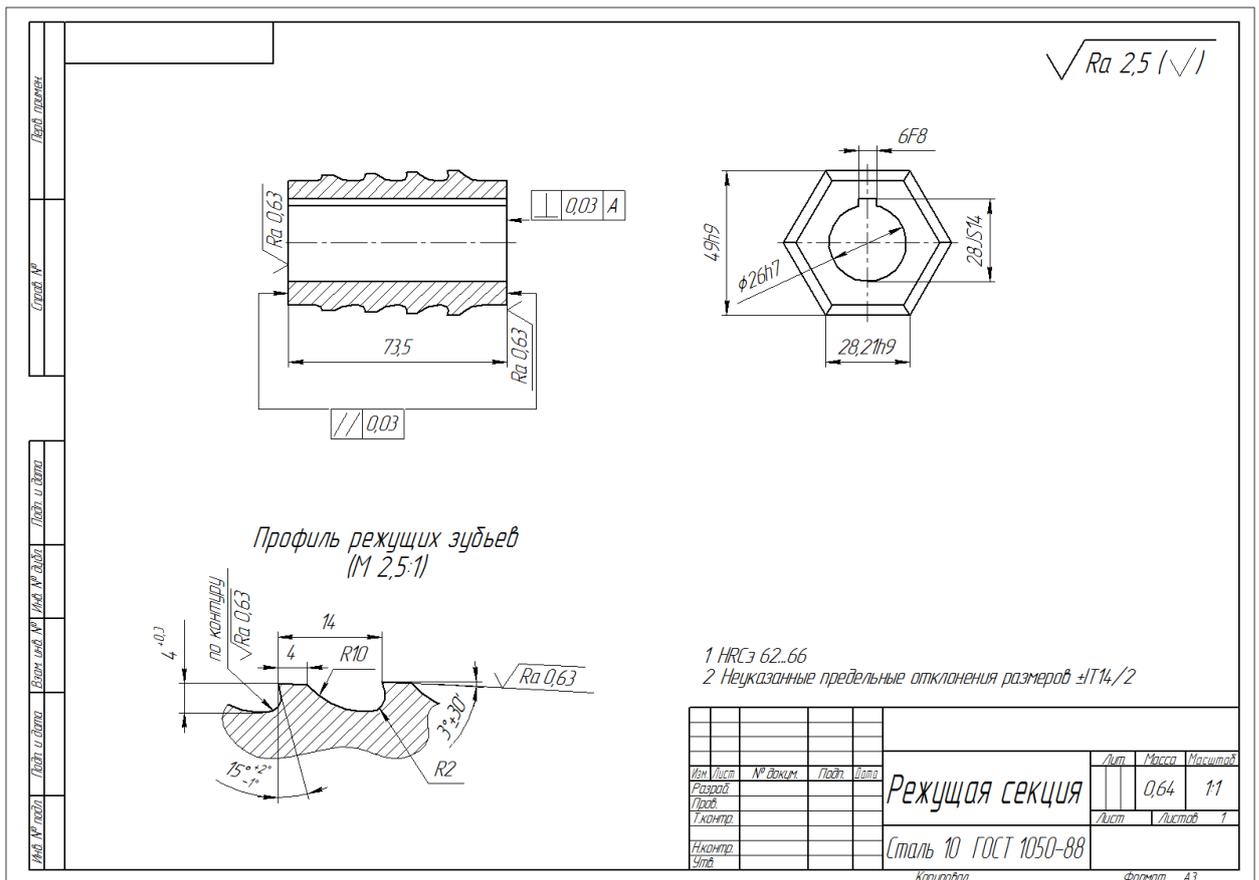


Рисунок 10 – Чертёж секции шестигранной протяжки

2.2 Проведение анализа

Для того, чтобы приступить к анализу, нужно определить ещё несколько величин, определяющих влияние на инструмент в процессе его работы.

В литературе по проектированию внутренних протяжек [24], [26] приводится следующая формула для расчёта силы, приходящейся на 1 мм обрабатываемого контура

$$p_z = C_p \sigma_B a_z^{0,85} K_\gamma = C_p \sigma_B \left(\frac{D_o}{k} \left(\frac{1}{2} - \frac{1}{\sqrt{6}} \right) \right)^{0,85} K_\gamma = C_1 k^{-0,85}, \text{ Н/мм. (24)}$$

В ней величина $C_1 = C_p \sigma_B K_\gamma D_o^{0,85} \left(\frac{1}{2} - \frac{1}{\sqrt{6}} \right)^{0,85} = 0,13 C_p \sigma_B K_\gamma D_o^{0,85}$ является константой для данного обрабатываемого материала (материал определяет значения C_p , σ_B и K_γ) и диаметра отверстия под протягивание.

Сила протягивания на миллиметр контура в данном случае составила

$$p_z = 3,3 \cdot 430 \cdot 1,148^{0,85} \cdot 1 = 625,689 \text{ Н/мм.}$$

Для расчёта усилия протягивания для шестигранного инструмента используется несколько другая формула, чем (6). Она представляет собой следующее выражение

$$P_T = \pi \cdot p_z \cdot D \cdot l \quad (25)$$

и составляет

$$P_T = \pi \cdot 625,689 \cdot 50,062 \cdot 28,868 = 226975 \text{ Н.}$$

Теперь стоит чуть более подробно описать конструкцию второй модели, а именно отверстия под протягивание. Она представляет собой цилиндрическую деталь типа вал. В центре выполнено сквозное отверстие диаметром отверстия под протягивание, аналогичного диаметру, заданному в начале работы – 50 мм. Со стороны обработки в отверстии выполнены прорези, представляющие собой отпечаток режущих зубьев с определёнными значениями глубины и расстояния между зубьями. Эти прорези отображают момент, когда в процессе протягивания одновременно участвуют 4 режущих зуба. Модель отверстия представлена на рисунке 11.

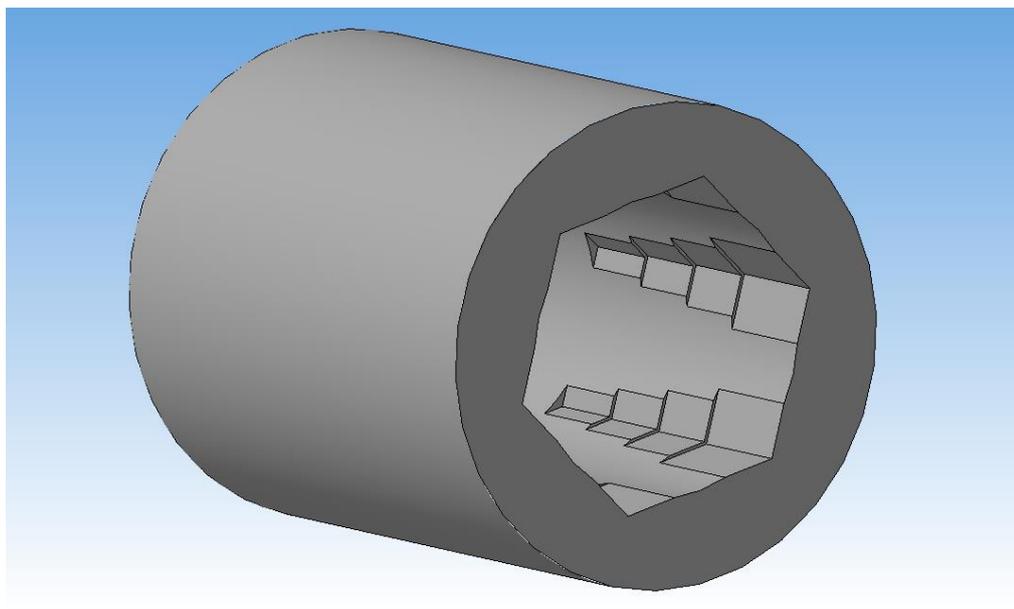


Рисунок 11 – Модель отверстия под протягивание шестигранной секции

Далее, можно перейти непосредственно к проведению прочностного анализа. В первую очередь, нужно указать материалы двух деталей. Для секции протяжки достаточно указать конструкционную сталь, поскольку Р6М5, в сущности, так же является сплавом железа с углеродом, а иные химические элементы, входящие в её состав, не оказывают значительного влияния при расчёте на прочность [30].

Поскольку обрабатываемый материал – конструкционная сталь 10Г2, соответственно, для модели отверстия также была указана конструкционная сталь. Окно для указания материала показано на рисунке 12.

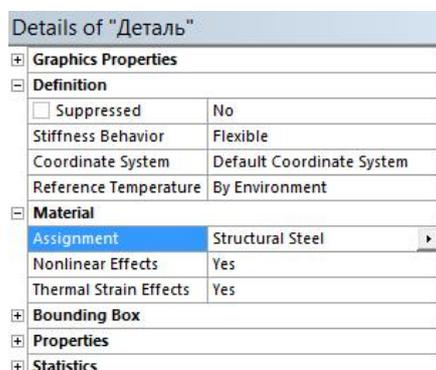


Рисунок 12 – Указание материала детали

Затем, после указания материалов была построена сетка конечных элементов для обеих деталей. Суть построения сетки заключается в разбивке деталей на множество простейших элементов, для каждого из которых в отдельности программа считает нагрузки. Для того, чтобы сделать результат точнее, меняют форму сетки, либо уменьшают её размер. Если же на определённом участке детали полученные значения не столь важны, размер сетки можно увеличить для ускорения процесса вычисления. Результат построения показан на рисунках 13 и 14.

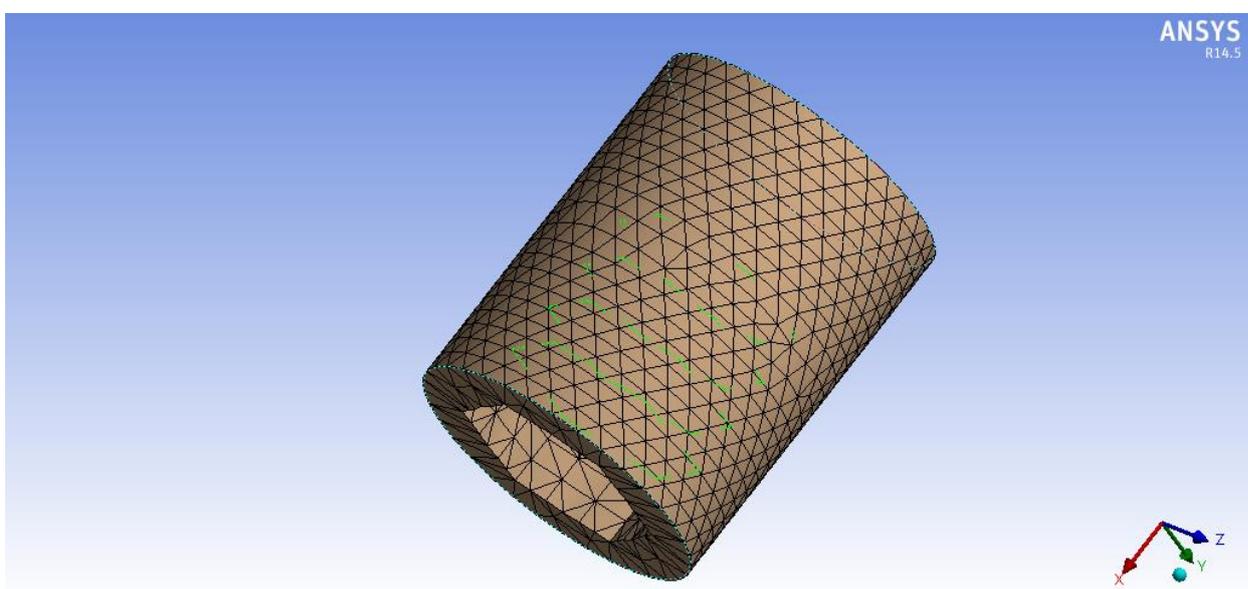


Рисунок 13 – Построение сетки конечных элементов для модели отверстия

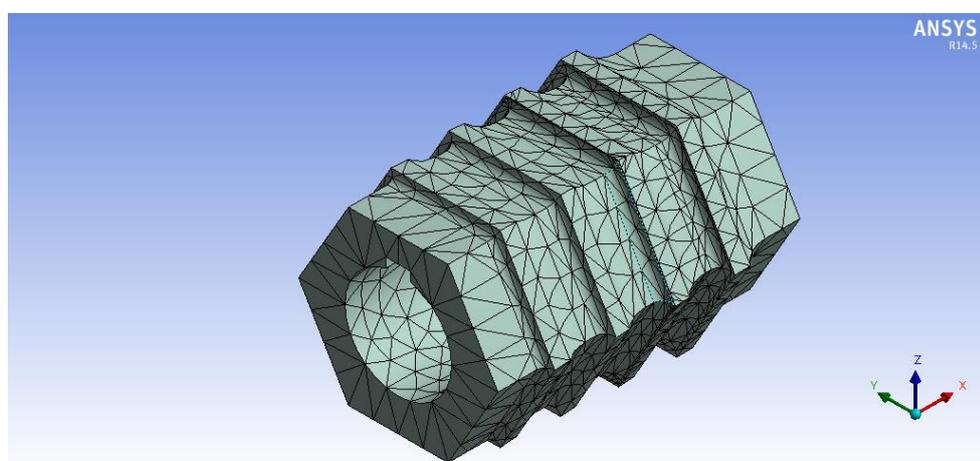


Рисунок 14 – Построение сетки конечных элементов для модели секции

В качестве заделки выбрана задняя стенка протяжки, как показано на рисунке 15 – в данном случае будет симитировано явление, обратное протягиванию – заготовка движется относительно неподвижного инструмента. Это делается для того, чтобы внутренний отпечаток зубьев оказал правильное воздействие на протяжку, поскольку в случае, если указывать инструмент движущимся, могут возникнуть проблемы связанные с верным приложением силы, так как режущая грань представляет собой тонкую полосу, толщина которой стремится к нулю. Отпечаток же, напротив, по своей форме представляет собой набор плоскостей, что упрощает симуляцию.

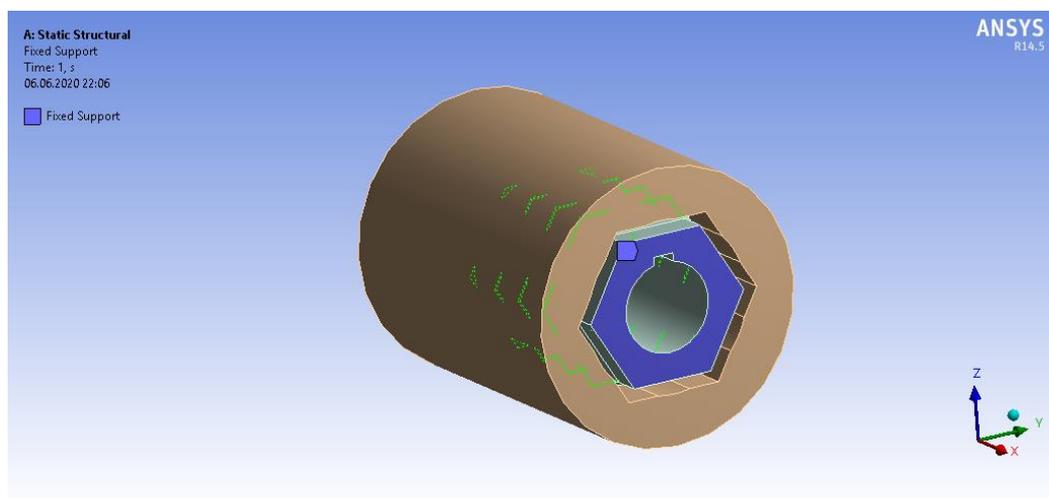


Рисунок 15 – Выбор поверхности, использующейся в качестве заделки

После указания поверхности заделки перейдём к назначению сил, как показано на рисунке 16. Согласно приведённому выше расчёту, усилие протягивания для данного случая составляет 226975 Н. Поскольку симуляция представляет собой отзеркаленное протягивание, векторы сил нужно приложить к отпечаткам режущих зубьев на модели заготовки. Выбираем все имеющиеся отпечатки, это важно для получения корректного результата, поскольку, выбрав отпечаток только с одной из сторон, нагрузка не приложится по оставшимся пяти граням сама по себе. Направление приложение силы – в сторону заделки. Результат показан на рисунке 17.

Details of "Force"	
<input type="checkbox"/> Scope	
Scoping Method	Geometry Selection
Geometry	1 Face
<input type="checkbox"/> Definition	
Type	Force
Define By	Components
Coordinate System	Global Coordinate System
<input checked="" type="checkbox"/> X Component	-2,2698e+005 N (ramped)
<input type="checkbox"/> Y Component	0, N (ramped)
<input type="checkbox"/> Z Component	0, N (ramped)
Suppressed	No

Рисунок 16 – Указание вектора приложения силы

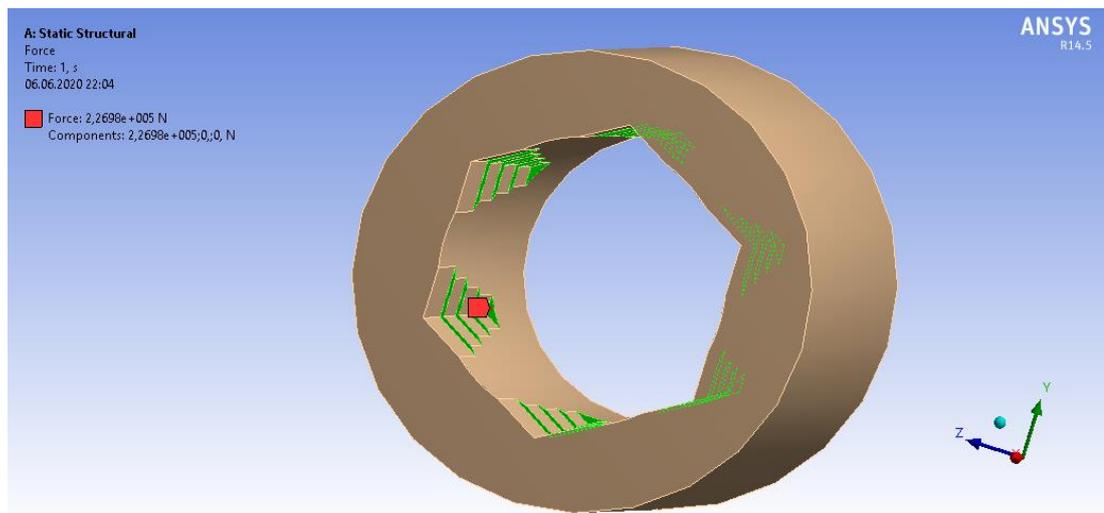


Рисунок 17 – Результат указания вектора

2.3 Результаты анализа

В результате анализа получаем следующую картину. На рисунках 18 и 19 представлены общие виды секции протяжки под воздействием нагрузки, на рисунке 20 – точка с максимальным значением напряжения, а на рисунке 21 – картина напряжений на стыке режущих граней зуба.

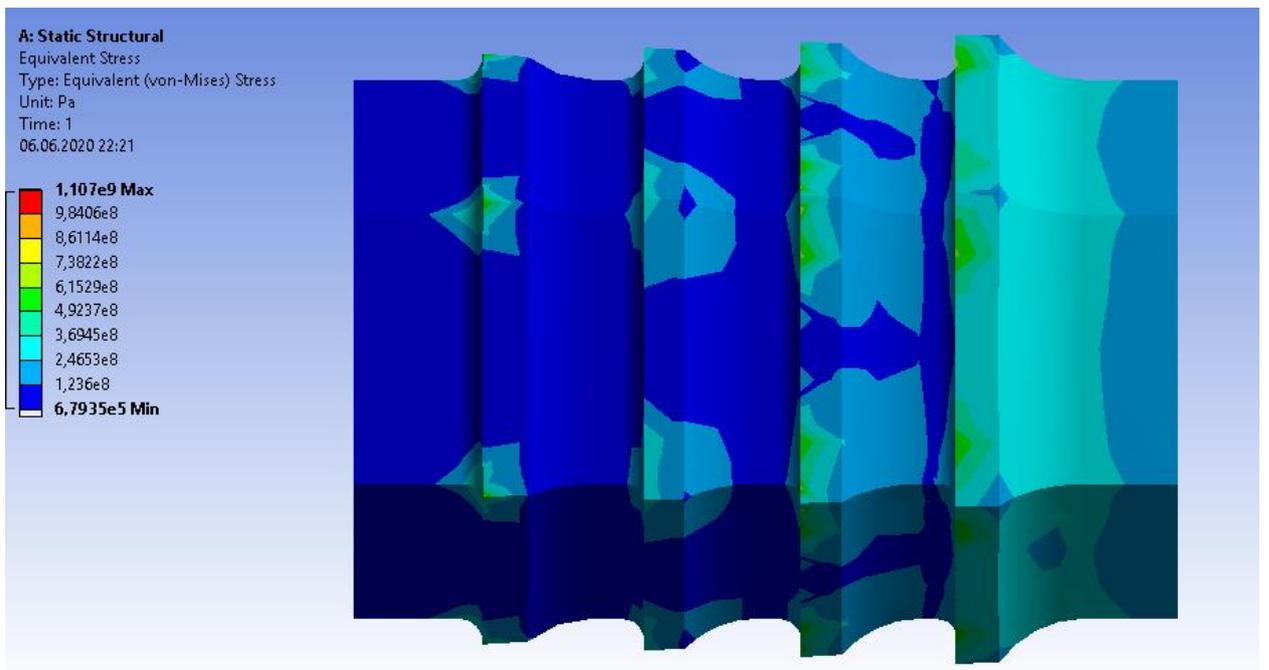


Рисунок 18 – Эквивалентные напряжения на режущих зубьях

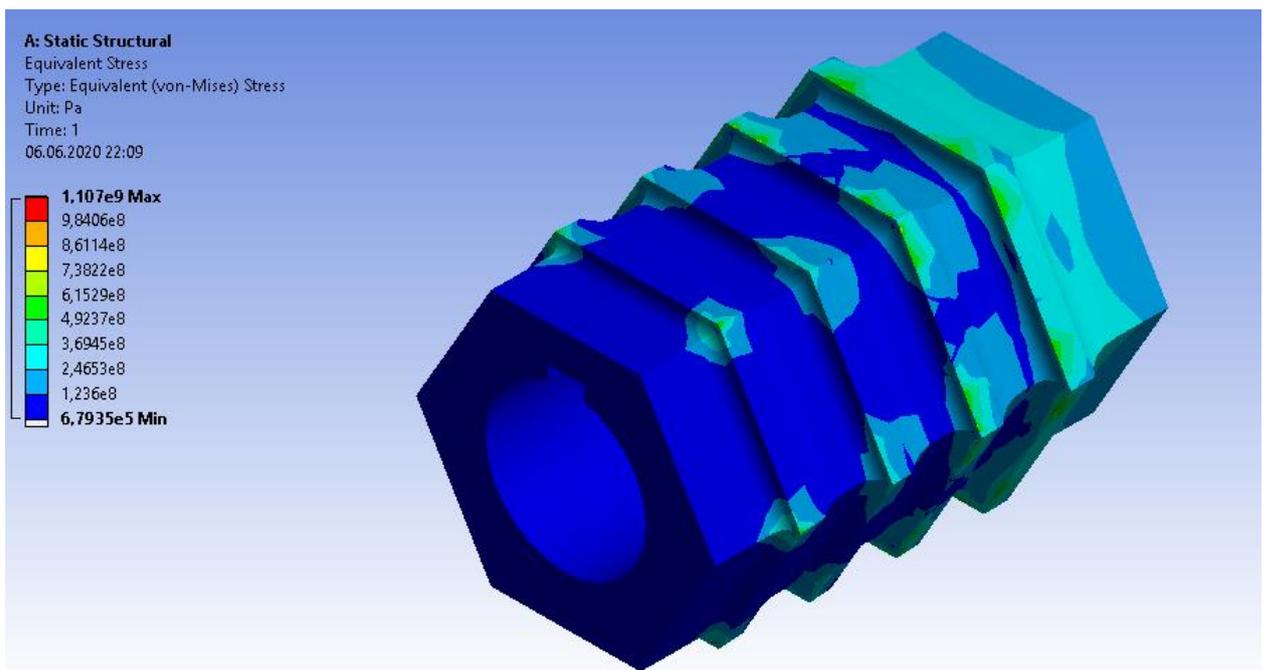


Рисунок 19 – Общая картина эквивалентных напряжений

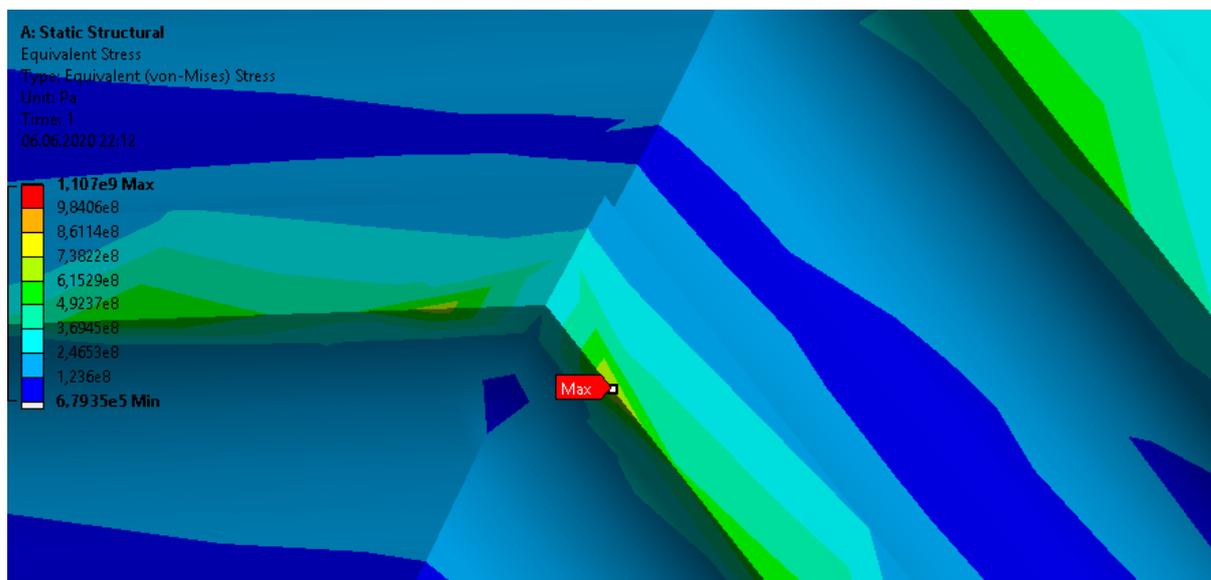


Рисунок 20 – Точка с максимальным значением эквивалентного напряжения

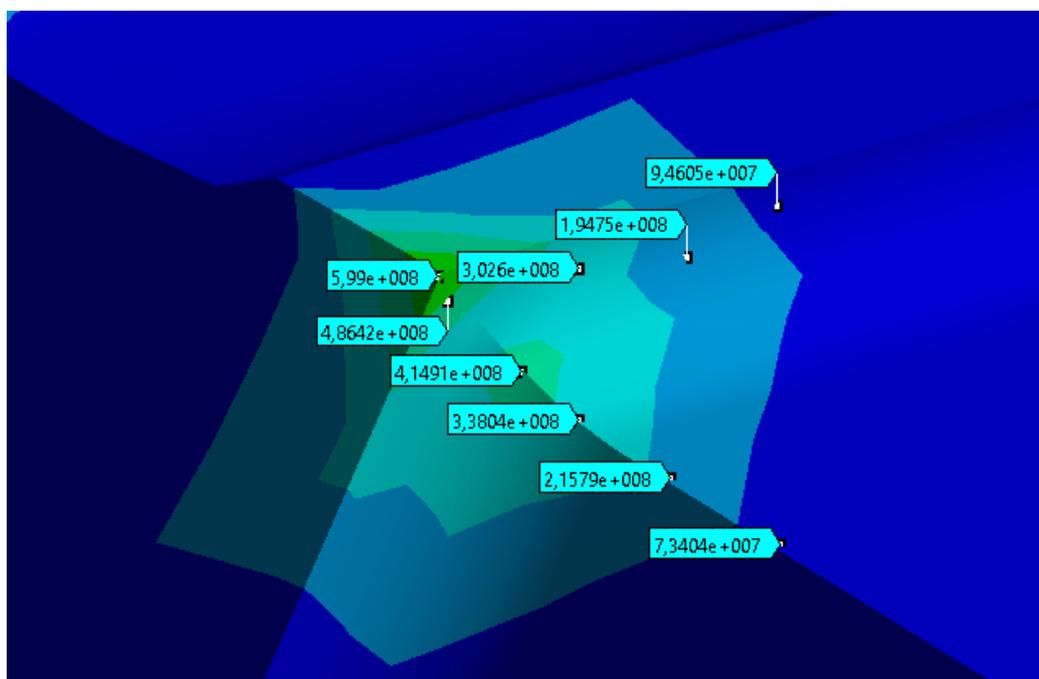


Рисунок 21 – Картина напряжений на стыке режущих граней

В результате видно, что наибольшие напряжения возникают на стыках режущих граней зубьев. При этом наибольшее значение составляет свыше 900 МПа, что при значениях допускаемого напряжения на изгиб конструкционной стали в 450 МПа (указана именно она, поскольку стержни сборных протяжек, как правило, выполняются из стали) недопустимо. Инструмент такой конструкции в данных условиях обладает плохими

условиями резания и невысокой надёжностью. Необходима модернизация конструкции. В первую очередь, нужно проработать вариант изменения формы зубьев. Кроме того, потребуется более подробно рассмотреть способ назначения количества одновременно работающих зубьев.

3 Разработка рекомендаций по изменению формы зуба

3.1 Выбор схемы снятия припуска

3.1.1 Профильная схема снятия припуска

Обработка шестигранных отверстий в металлических изделиях представляет собой весьма сложный процесс. Для того, чтобы протяжной инструмент соответствовал требованиям качества и производительности [25], важно быть уверенным, что схема снятия припуска обеспечивает необходимую стойкость, а геометрия зуба способствует наиболее эффективной обработке.

В первую очередь необходимо рассмотреть различные схемы снятия припуска при протягивании, поскольку от выбора схемы резания во многом зависит форма и количество зубьев. В технической литературе [27] различают четыре вида схем: профильную (так же известную как одинарную), групповую (в некоторых источниках [15]-[17] она именуется прогрессивной), генераторную и комбинированную схемы резания.

Геометрическая форма зубьев инструмента при профильной схеме обладает формой профиля уже обработанного изделия, как представлено на

рисунке 22. Эта схема применяется довольно редко, поскольку профильные протяжки весьма сложно производить. Поэтому для изготовления отверстий, обладающих сравнительно простыми геометрическими формами, разрабатывают протяжки по профильной схеме.

У протяжки, сделанной по профильной схеме, каждый зуб снимает припуск по всему периметру обработки, при этом толщины припуска одинаковы. Это обеспечивается тем, что каждый последующий зуб больше предыдущего на величину, определяемую как $2s_z$, где s_z – подача или подъём на зуб, в зависимости от формы отверстия.

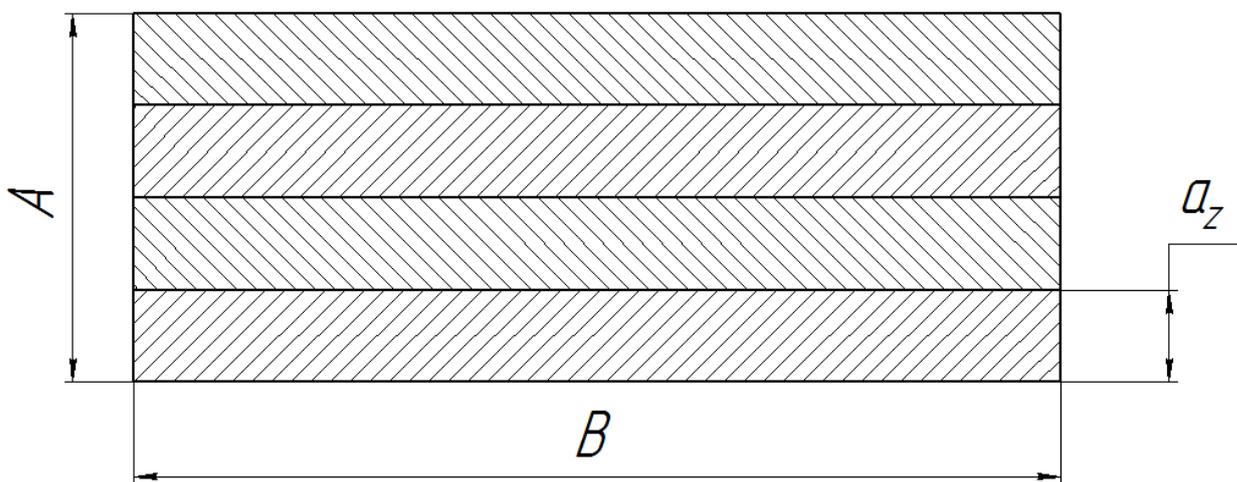


Рисунок 22 – Профильная схема срезания припуска

Чтобы во время обработки не возникала сливная стружка, на режущих кромках выполняют канавки для разделения стружки. Их изготавливают в виде паза V-образной формы. Канавки располагают в шахматном порядке согласно рисунку 23 по всем режущим зубьям, для обеспечения равномерных условий резания. Рекомендуемые значения параметров располагаются в диапазонах $\varepsilon = 60...90^\circ$; $m = 0,6...1$ мм; $R_c = 0,3...0,5$ мм.

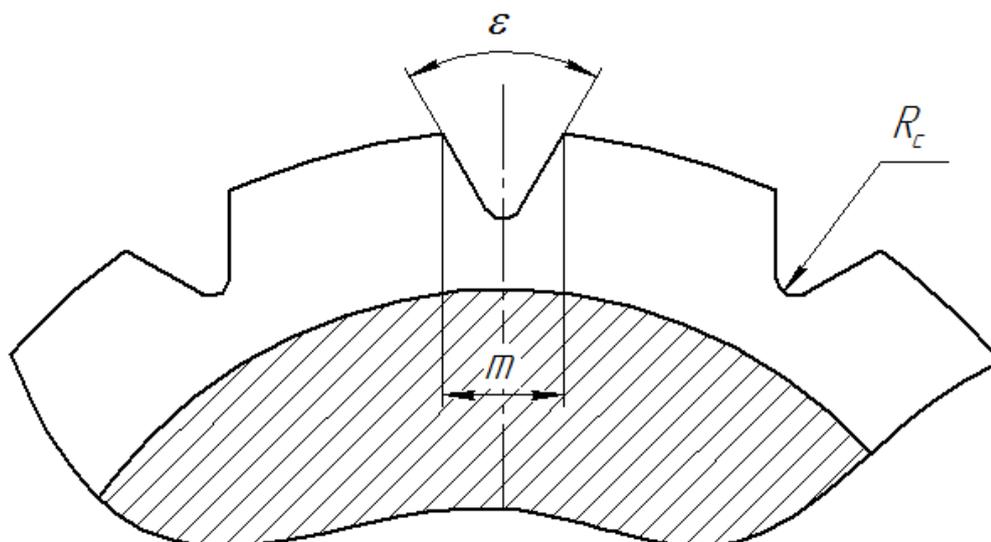


Рисунок 23 – Параметры стружечных канавок

Каждый зуб при такой схеме будет снимать кусковую стружку, обладающую двойной толщиной ребра жёсткости. Это происходит из-за того, что канавки расположены через одну в шахматном порядке, соответственно толщина стружки увеличивается вдвое. Ребро жёсткости, само по себе, мешает стружке свёртываться в канавки, которые располагают между зубьями. Это явление требует снижать подачу на зуб, что замедляет снятие припуска. Для протяжек цилиндрического типа рекомендуют следующие значения подачи на зуб: 0,02 – 0,06 мм / зуб для сталей; 0,03 – 0,08 мм / зуб при обработке чугуна; 0,02 – 0,05 мм / зуб для алюминия; 0,05 – 0,12 мм / зуб при обработке латуни и бронзы. При больших значениях подачи стружка становится слишком жёсткой, что препятствует её завиванию в канавке между зубьями. Это приводит к тому, что стружка застревает во дне впадины. Накопление стружки в канавке может привести к заклиниванию и поломке протяжки.

3.1.2 Групповая схема снятия припуска

По сравнению с профильной схемой, где каждый зуб обладает определённым строго для него размером, в групповой схеме режущие зубья не имеют подъёма относительно друг друга [7]. Групповая схема представлена на рисунке 24.

Такая схема снятия припуска означает, что зубья делятся на группы, либо секции. В каждой группе определённый зуб будет снимать материал только с некоторой части профиля заготовки, дальнейший снимет припуск с другой части профиля, и так до тех пор, пока профиль не будет обработан на слой, равный величине подъёма на зуб a_z . После чего в обработку вступает следующая секция и так далее, пока процесс обработки не будет завершён. При этом, важно отметить, что на секции или группы делятся только черновые зубья, тогда как чистовые подобным образом делить нельзя при любой схеме обработки [9].

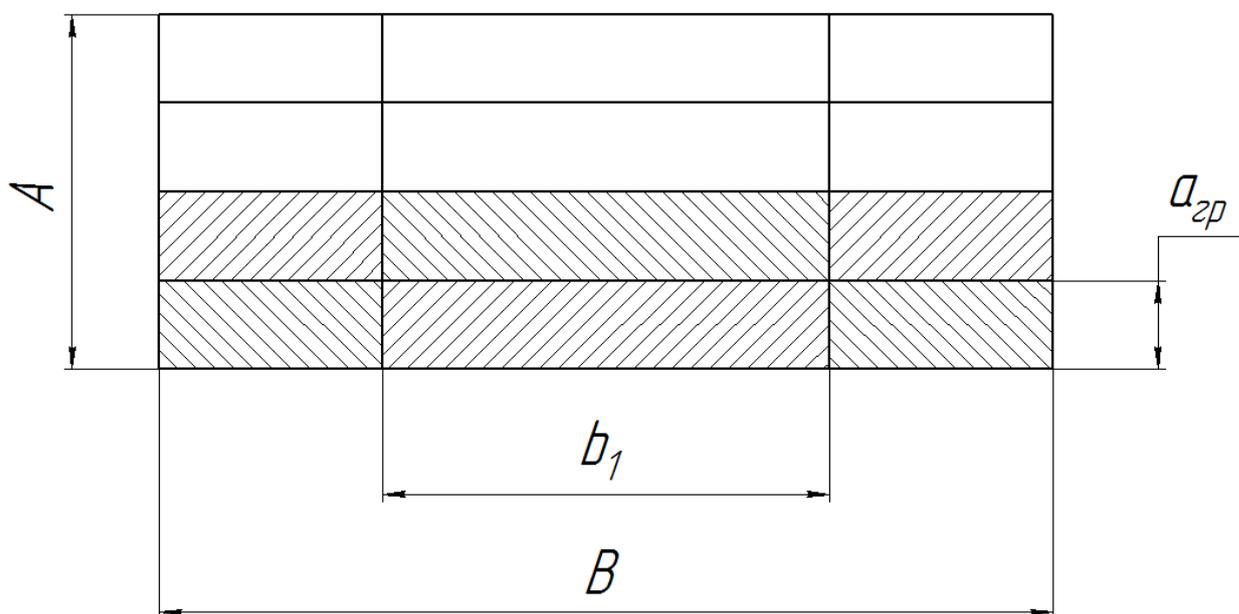


Рисунок 24 – Групповая схема срезания припуска

Распределение зубьев при групповой схеме происходит следующим образом. Весь профиль обработки делится на несколько частей. За каждым зубом секции закрепляется определённая часть профиля. Режущая часть зуба, соответствующая участку обработки, остаётся, а вот вся оставшаяся режущая часть удаляется. Для этого применяют особые элементы конструкции зуба. Ими являются лыски, фаски, выкружки и шлицы, расположенные по отдельности и в разных сочетаниях, к примеру в шахматном порядке. Групповые схемы резания разделяются по способу разбивки зубьев, и

бывают: шахматные, многогранные, шлицевые, схемы переменного резания и тому подобные. Все эти схемы групповые, так как съём припуска при их использовании выполняется отдельными группами зубьев.

Рассмотрим протяжку со схемой переменного резания. Её отличие состоит в том, что припуск по ширине разделяется между зубьями одной группы, а по толщине разбивка идёт между соседними группами. Причина этого – расположенные в шахматном порядке выкружки. Это значит, что зуб снимает припуск на всём профиле за исключением места выкружки. Выкружки весьма широки, что подразумевает отсутствие рёбер жесткости на стружке, что благоприятно влияет на её возможность скручивания в стружечных канавках между зубьями. Это позволяет значительно сократить длину режущей части протяжного инструмента.

Размещение широких выкружек на зубьях обеспечивает большой угол стыка выкружки с режущей кромкой. Этот угол местами превышает значение в 150° , что в сочетании с задним углом $\alpha = 4 - 6^\circ$ на вспомогательной режущей кромке позволяет повысить стойкость инструмента. Разница в наличии выкружек доходит до 2 – 3 раз по сравнению с классической одинарной схемой резания [11].

Проектируя инструмент, обладающий групповой схемой снятия припуска, очень важно помнить о том, что последний зуб группы всё равно имеет непрерывную режущую кромку на всём протяжении обработки. Так же выбор его диаметра обуславливается, номиналом диаметра группы приблизительно на 0,02 – 0,04 мм. Это условие позволяет избежать образования сливной стружки, образывающейся в случае упругого восстановления обработанной поверхности, уже после того, как по ней прошли режущие зубья. Отсюда следует, что последний зуб по факту срезает материал не у всего профиля обработки, а лишь только отдельные необработанные полосы, которые неизбежно остаются после прохождения предыдущих зубьев, поскольку таким образом поведения материала и погрешности изготовления протяжки.

Главным недостатком протяжек с групповой схемой снятия припуска является то, что их достаточно сложно изготовить, по сравнению с инструментом с одинарной схемой. Форму режущих кромок выбирают в соответствии со стандартными схемами формирования конкретных поверхностей.

3.1.3 Генераторная схема снятия припуска

Главная особенность генераторной схемы обработки поверхностей, представленной на рисунке 25, заключается в срезании припуска зубьями, которые имеют переменный профиль. Форма зубьев при такой схеме постепенно переходит от круглой или прямой к необходимой форме отверстия. Чаще всего генераторную схему применяют при проектировании протяжек для фасонных поверхностей [8].

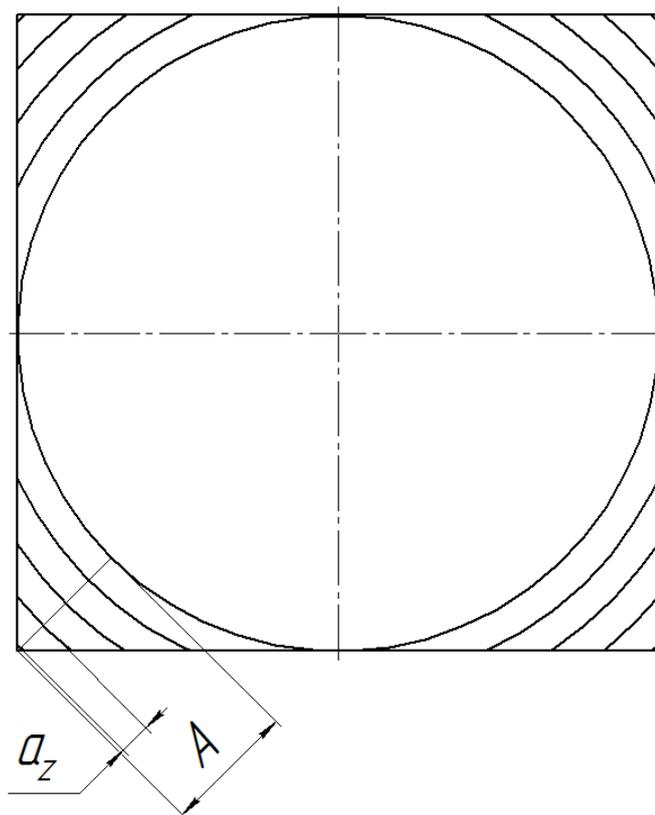


Рисунок 25 – Генераторная схема срезания припуска

Контур готового отверстия формируется благодаря вспомогательным кромкам на всех режущих зубьях. Что касается главных режущих кромок, то

они как правило, прямолинейны, либо имеют форму дуги коаксиальной окружности.

Чаще всего протяжной инструмент, обладающий генераторной схемой снятия припуска, изготовить намного проще, чем протяжку с профильной схемой. Например, протяжка, спроектированная для того, чтобы получать квадратный профиль, производит снятие припуска на конус, меняющий форму боковых сторон от цилиндрической до квадратной посредством плоского шлифования всех сторон.

Округлость формы зубьев, лежащая в основе стандартной протяжки генераторной схемы, обладает следующими свойствами – во-первых, она обеспечивает положительные передние углы на дуговых участках режущих зубьев. Во-вторых, подобная форма позволяет увеличить площадь поперечного сечения протяжки, что крайне положительно влияет на прочность инструмента. В-третьих, такая конструкция положительно влияет на толщину среза. Это происходит следующим образом. Зубья, которые имеют наименьшие режущие кромки, снимают припуск с наибольшей толщиной среза, что обеспечивает сокращение режущих зубьев. Соответственно, чем меньше зубьев у протяжки, тем она короче.

Однако, как и любая другая схема снятия припуска, генераторная обладает рядом недостатков. Так, например, особенности геометрии, образующие основное отличие от прочих схем, осложняют получение корректного значения заднего угла у вспомогательных режущих кромок. Кроме того, неизбежные погрешности формы и расположения зубьев, влияют значительно сильнее на точность изготовления поверхности готового продукта, чем подобное происходит во время обработки профильной схемой снятия припуска. Поэтому, если изделие должно обладать высокоточным профилем, необходимо и достаточно спроектировать последние зубья протяжки согласно профильной схеме.

3.1.4 Комбинированная схема снятия припуска

Комбинированная схема обработки протяжками представляет собой общее понятие, представляющее собой сочетание нескольких вышеописанных схем в одном инструменте. Пример протяжки с комбинированной схемой представлен на рисунке 26.



Рисунок 26 – Протяжка с комбинированной схемой срезания припуска

Так, например, комбинированную схему часто используют при высоких требованиях к шероховатости готового изделия. В таком варианте почти все режущие зубья работают по генераторной схеме, за исключением последних и блока калибрующих зубьев, которые проектируются по профильной схеме снятия припуска.

3.1.5 Анализ рассмотренных схем снятия припуска

Для проектирования протяжного инструмента заданы следующие параметры:

- а) диаметр заранее заготовленного отверстия: 50 мм;
- б) длина протягивания: 100 мм;
- в) точность готового отверстия: согласно IT9, посадка Н9;
- г) обрабатываемый материал: сталь 10Г2;
- д) годовая программа выпуска: 10000 изделий в год;

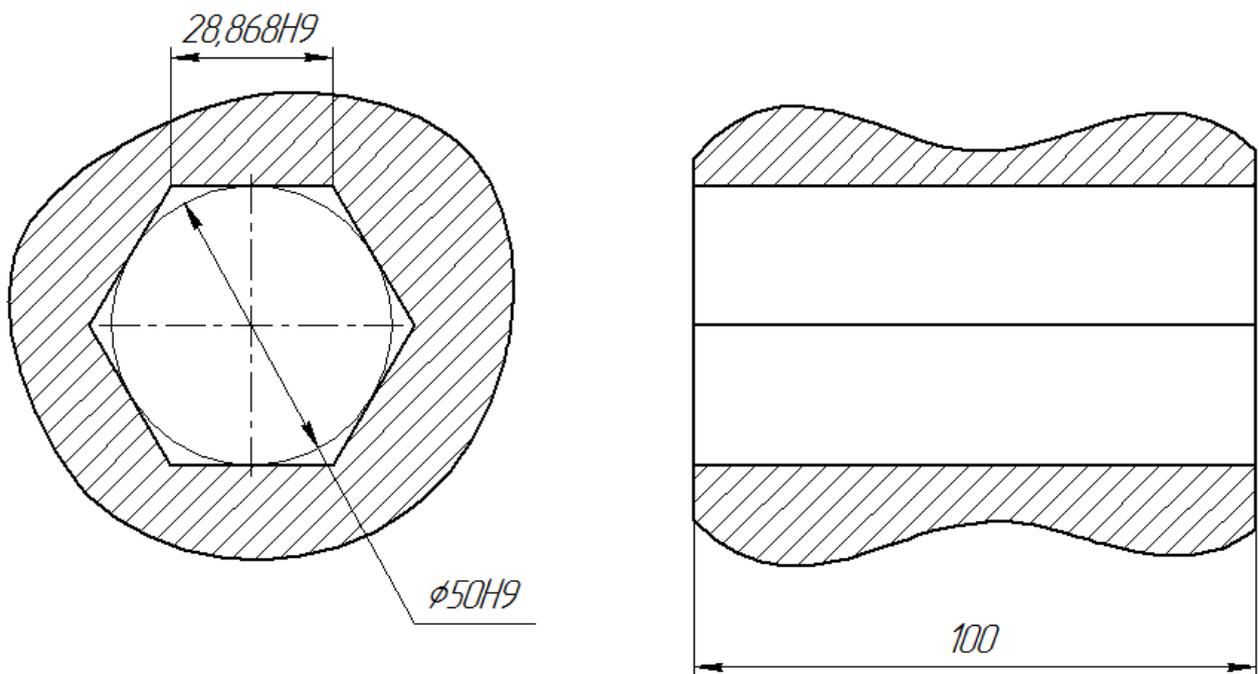


Рисунок 27 – Исходные данные для протягивания

Из этих данных следует, что готовое отверстие обладает весьма сложной геометрией, при этом его необходимо производить в больших объёмах. Для изготовления такого изделия наилучшим образом подойдёт групповая схема снятия припуска, поскольку спроектированный в соответствии с ней инструмент будет способен производить отверстие сложной формы, при этом будет обладать высокой стойкостью. Отсюда следует, что изначальная схема съёма припуска, указанная в теме настоящей магистерской диссертации, была выбрана верно.

3.2 Рассмотрение недостатков формы зубьев

Обработка шестигранных отверстий в металлических изделиях представляет собой весьма сложный процесс. Здесь возникает целый ряд проблем, описанных в [1], [2], [3], [4] и связанных с формой зубьев инструмента, возникающих на всех этапах – сперва с ними сталкиваются конструктора ещё в период разработки изделия, затем технологи, в период этапа подготовки производства, и наконец непосредственно

производственники, в течение всего периода жизненного цикла изделия, начиная с производства опытных партий.

Одной из первых проблем, которую приходится решать всем работникам, участвующим в цепочке производства изделий, является геометрическая форма готовой поверхности. Она не позволяет добиться применения инструмента простой формы, поскольку грани отверстия расположены не параллельно и не перпендикулярно относительно друг друга. В силу упрощения конструкции и стандартизации, в большинстве случаев за основу принимается правильный шестиугольник, угол между гранями в котором составляет 60° .

Второй проблемой является сложность изготовления многогранного инструмента. Для обеспечения корректного съема припуска по всей поверхности отверстия, необходимо изготовить такую многогранную протяжку, которая будет правильно вырезать не только сами грани, но и углы отверстия, что требует получения плавного перехода между кривыми поверхностями стружечных канавок режущих зубьев, а также правильной заточки режущих граней в местах их стыка. Для этого требуется инструмент со сложным профилем и станок, обеспечивающий выполнение требований по взаимному расположению режущих поверхностей друг относительно друга.

В случае, если же требования к изготовлению режущей части протяжки, в частности требования к геометрической форме зубьев и параметрам стружечной канавки не будут выполнены, это может отразиться на прочности инструмента. При поломке всего лишь одного зуба, представленного на рисунке 28, инструмент больше не может выполнять операцию протягивания [28]. Требуется ремонт, даже после которого протяжка не сможет проработать положенный срок эксплуатации, поскольку восстановить исходные прочностные характеристики не представляется возможным. В случае, когда произошла поломка нескольких зубьев или же инструмент ранее уже подвергался ремонту, протяжку как правило, утилизируют. Требуется закупка либо изготовление нового инструмента.

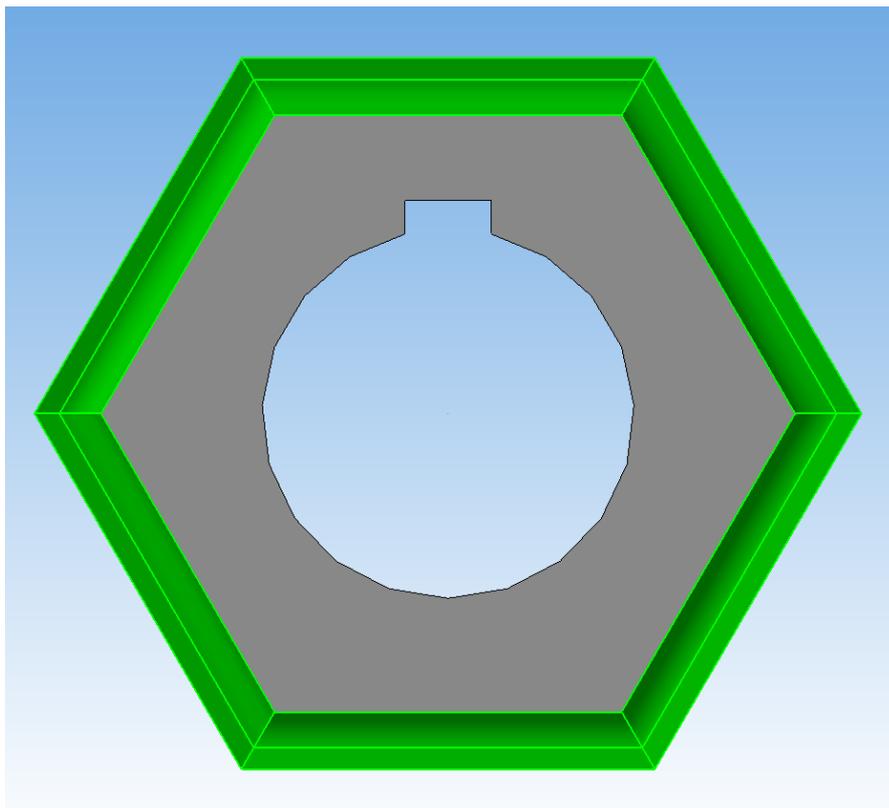


Рисунок 28 – Геометрическая форма шестигранного зуба

Из проблем геометрической сложности и сложности изготовления протяжки прямо вытекает следующая проблема – плохие условия резания на рёбрах режущих зубьев. Даже при условии, что плавный переход между стружечными канавками будет выдержан, и режущие грани будут правильно заточены, само наличие этого стыка между частями зуба будет мешать изготовлению отверстия, соответствующего исходному чертежу. Поскольку между кривыми канавок выполнен переход, в первую очередь это приводит к уменьшению переднего угла γ , показанного на рисунке 29.

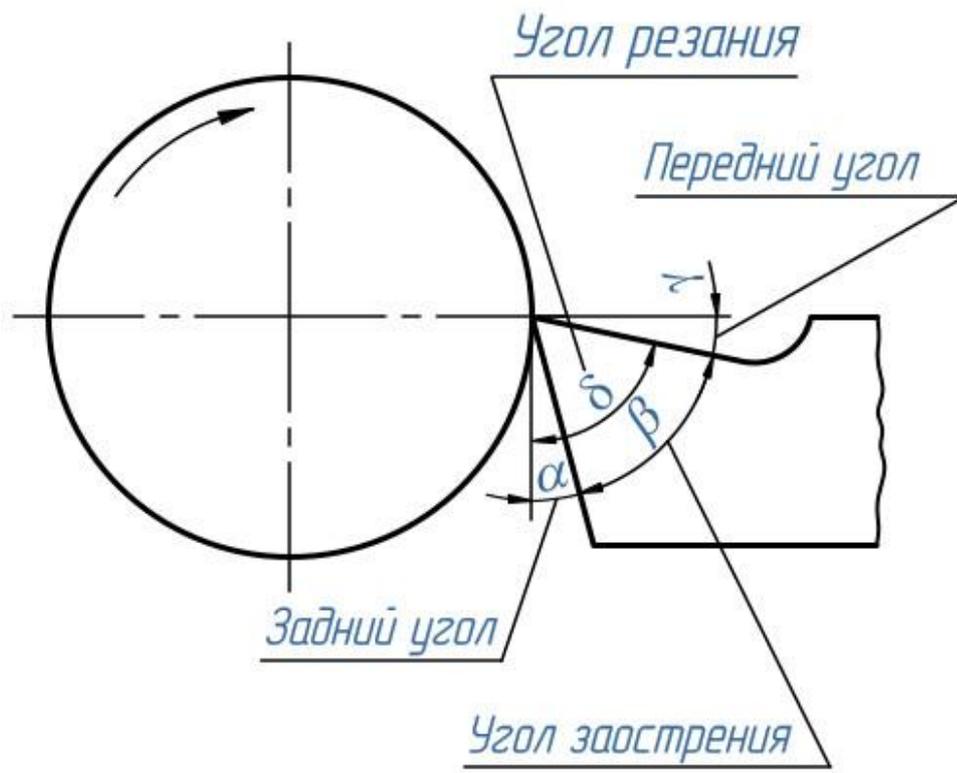


Рисунок 29 – Углы инструмента при резании

Это означает, что увеличивается работа резания и трения, что повышает температуру резания и снижает стойкость инструмента, как показано на рисунке 30.

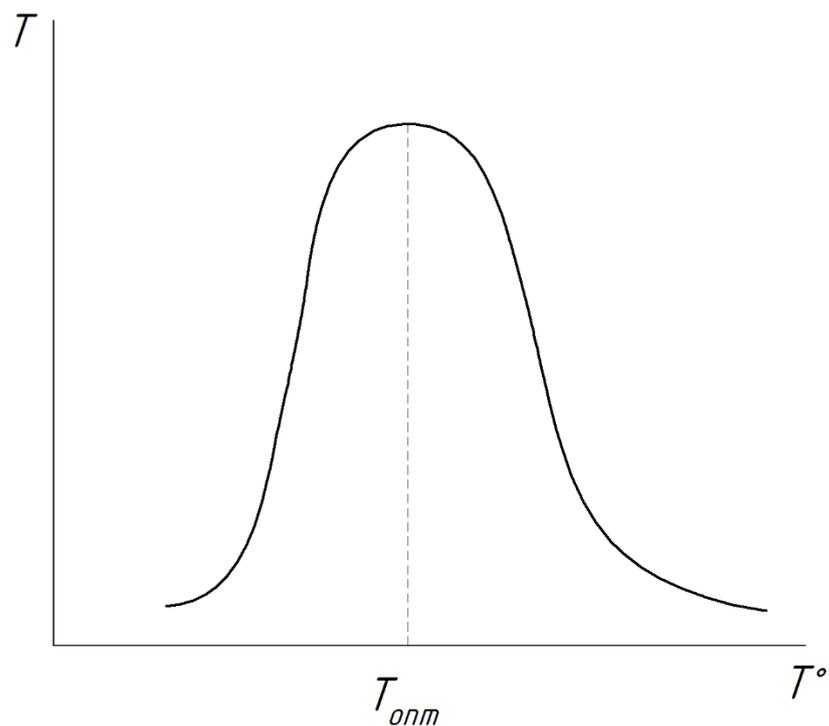
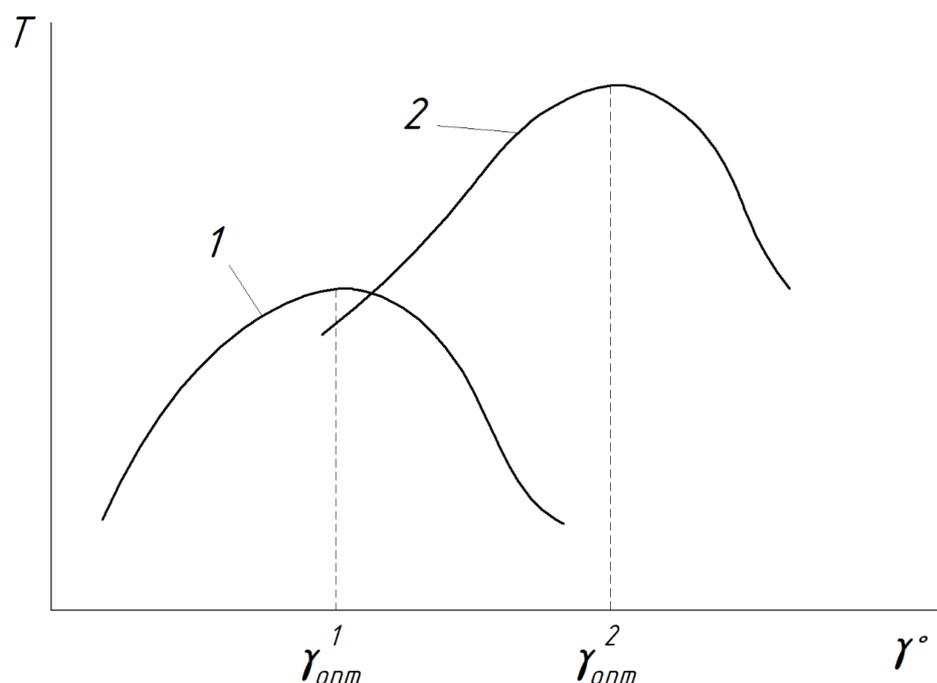


Рисунок 30 – Зависимость периода стойкости инструмента от температуры резания

Повышение температуры резания приводит к необходимости использовать большее количество СОЖ, что увеличивает нагрузку на модули станка, отвечающие за подвод охлаждающей жидкости, ухудшает пропускную способность системы подвода СОЖ по территории цеха и станций очистки. Наконец, повышенный расход охлаждающей жидкости требует больших расходов на её последующую утилизацию, так как они представляют собой нефтяные масла, утилизация которых через обычную систему сточных вод опасна для здоровья людей и вредна для экологии.

Снижение стойкости инструмента, показанное на рисунке 31, означает его меньшую способность выполнять заданные размеры с нужным качеством. В зависимости от типа инструмента и количества циклов работы, после окончания периода работы он отправляется на переточку либо утилизируется. В первом случае увеличивается объём работ на заточных участках цехов, что может потребовать закупки дополнительного оборудования и привлечение новых сотрудников для выполнения сверхнормативных работ. Во втором увеличиваются расходы на утилизацию и неизбежная покупка либо изготовление нового инструмента для обеспечения нужд производства. Оба этих варианта означают более частую замену инструмента, что влечёт за собой увеличение времени на обслуживание оборудования, а значит снижение такта выпуска готовых изделий.



Графики: 1 – зависимость при обработке твёрдых материалов; 2 – зависимость при обработке мягких материалов

Рисунок 31 – Зависимость периода стойкости инструмента от величины переднего угла

Другой составляющей плохих условий резания на участке углового стыка поверхностей является уменьшение объёма стружечной канавки, что приводит к ухудшению отвода стружки. Так как параметры стружечной канавки выбираются на этапе проектирования протяжки, её объём рассчитан на отведение определённого объёма стружки. Поскольку из-за появления стыка объём канавки уменьшается, часть стружки распределяется по соседним канавкам, что негативно влияет на стружкоотведение. Повышенное накопление стружки приводит к её попаданию в зону резания, смещению инструмента и ухудшению качества поверхности.

Всё это прямо или косвенно влияет на экономические затраты и с учётом годовых программ по выпуску новых изделий, превращается во

вполне осязаемые значения тонн СОЖ, тысяч новых инструментов и миллионов евро на закупку нового оборудования.

3.3 Рекомендации по изменению формы зуба

В качестве решения целого комплекса описанных выше проблем, предлагается упростить форму зуба. Предлагается применить последовательную схему, при которой одна секция протяжки будет обрабатывать по две стороны будущего отверстия за проход. Для полноценной обработки всего отверстия протяжка будет состоять из трёх подобных секций, расположенных друг за другом.

Вместо изготовления сложного профиля, включающего в себя расположение стружечных канавок и зубьев с режущими кромками на всех шести гранях, достаточно будет оставить только две режущие грани с двух противоположных частей инструмента. Это избавит от всех проблем, связанных с наличием стыка на шестигранном инструменте, в частности позволит сохранить правильный объём стружечных канавок и необходимый передний угол режущего зуба. В конечном счёте это улучшит качество изготовления отверстия.

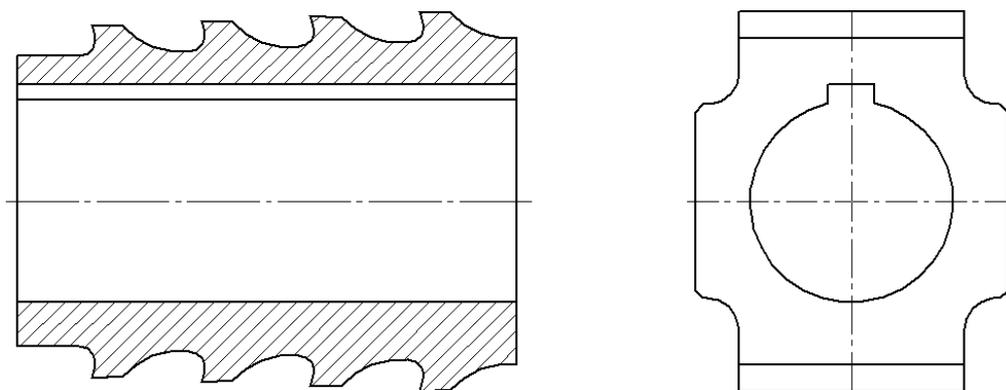


Рисунок 32 – Схема расположения режущих зубьев по новой схеме

Также, применение подобной схемы позволяет использовать менее затратное оборудование для изготовления протяжки. Такая конструкция

зубьев требует лишь соблюдения обычных требований к расположению поверхностей – параллельности зубьев между собой, параллельности торцевых плоскостей, перпендикулярности торцевых плоскостей к режущим плоскостям. Кроме того, предлагаемая компоновка уменьшает цикл изготовления протяжки, так как требуется меньше времени на её производство.

Это позволяет, при необходимости, нарастить объёмы выпуска инструмента, что делает его экономически эффективным.

В дальнейшем, при проектировании инструмента по методике [23] подтвердилась правильность выбора подобной конструкции. В ходе теоретического расчёта соблюдались все условия, обеспечивающие прочность конструкции, в частности значение напряжения в канавке перед первым зубом изделия и напряжение в месте наименьшего сечения хвостовика.

Кроме того, в ходе анализа напряжённого состояния протяжки в программной системе ANSYS подтвердились значения, рассчитанные в теоретической части проектирования. О результатах анализа будет сказано позднее в соответствующей главе.

Отсюда следует, что приведённые выше рекомендации верны и могут иметь практическое применение при изготовлении протяжного инструмента.

4 Разработка рекомендаций по выбору оптимального числа режущих зубьев

Производительность процессов механической обработки деталей напрямую связана с их эффективностью. Низкопроизводительный инструмент увеличивает время изготовления детали, а значит снижает объёмы выпуска готовой продукции. Тем самым увеличивается стоимость конечного продукта, что негативно сказывается на выручке предприятия. Поэтому крайне важно использовать наиболее производительный инструмент из доступных, учитывая, разумеется, возможности производственных цехов для размещения оборудования, станочного парка

для задания нужных режимов резания и оптимальное количество сотрудников, обеспечивающих загрузку и разгрузку (в ручном режиме), либо обслуживание станков.

Протяжка представляет собой высокопроизводительный инструмент. Она применяется для быстрой обработки отверстий сложной формы с высокой точностью. Это значит, что протяжка должны быть эффективнее любого другого режущего инструмента в заданных условиях, иначе нет смысла в высоких затратах в виде отдельного протяжного станка, не говоря уже о затратах на проектирование и изготовление протяжного инструмента. Кроме того, на протяжном станке должен работать оператор, специально обученный тонкостям обработки, так как протяжной станок в работе значительно сложнее обрабатывающего центра с ЧПУ, к настоящему времени не требующего особых навыков для работы, поскольку всю обработку за оператора выполняет программа. А достичь вышеупомянутой эффективности можно только уделив особое внимание такому этапу размерного расчёта протяжки, как выбор числа режущих зубьев.

В первую очередь, стоит определить величину подъёма на зуб. Формула для определения этого числа будет означать, какую долю припуска будет снимать один зуб протяжки во время обработки. От этого будет зависеть, какое усилие протягивания будет приходиться на каждый конкретный зуб. Не стоит забывать и о том, что, если усилие протягивания будет слишком велико, это будет приводить к постоянным поломкам инструмента.

Для начала нужно найти объём снимаемого припуска. Воспользуемся рисунком 33.

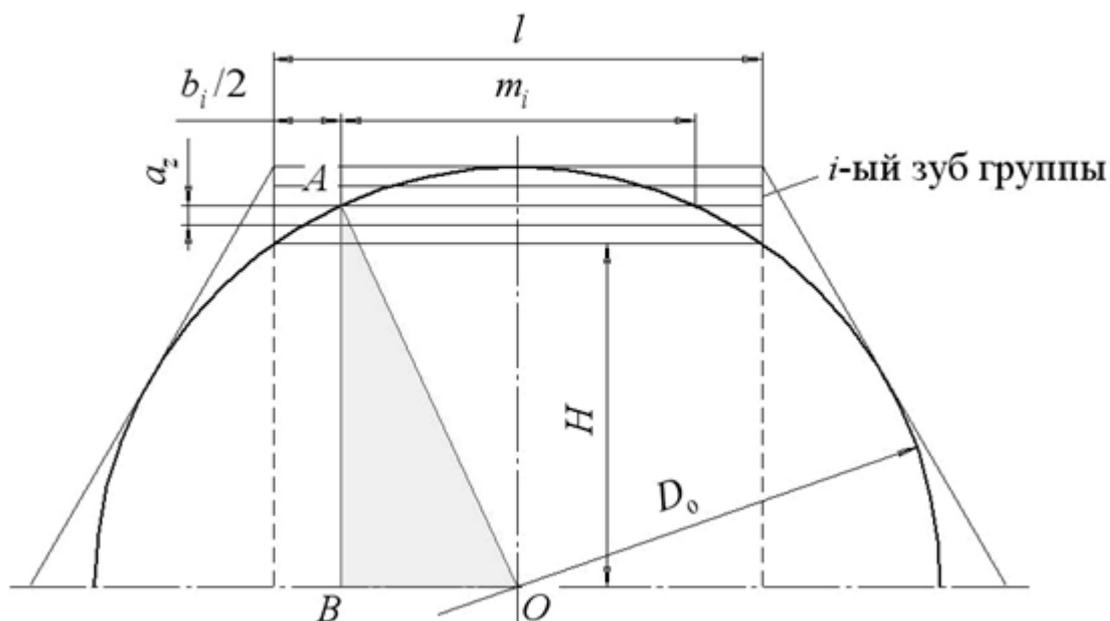


Рисунок 33 – Геометрические параметры процесса обработки

Длина грани будущего отверстия или попросту длина стороны шестиугольника l определяется по формуле

$$l = \frac{D_0}{\sqrt{3}}, \text{ мм}, \quad (26)$$

где D_0 – диаметр окружности исходного отверстия под протягивание.

В силу форм исходного и готового отверстий ширина среза начнёт увеличиваться от некоего сравнительного небольшого значения. Она будет стремиться к длине грани шестиугольника, но не будет равна ей.

Из рисунка 33 следует, что ширина среза равна

$$b_i = l - m_i = \frac{D_0}{\sqrt{3}} - m_i, \quad (27)$$

где m_i – длина стороны шестиугольника, не подвергаемая обработке.

Также из этого рисунка следует, что

$$H = \frac{1}{2} \sqrt{D_0^2 - l^2} = \frac{1}{2} D_0 \sqrt{1 - \frac{1}{3}} = \frac{D_0}{\sqrt{6}}, \quad (28)$$

где H – высота первого зуба протяжки.

Из треугольника AOB , вписанного в окружность, следует, что длина части, не подвергаемой обработке, равна

$$m_i = 2\sqrt{\frac{D_o^2}{4} - (H + i \cdot a_z)^2} = 2\sqrt{\frac{D_o^2}{4} - \left(\frac{D_o}{\sqrt{6}} + i \cdot a_z\right)^2} = D_o \sqrt{1 - 4\left(\frac{1}{\sqrt{6}} + \frac{i \cdot a_z}{D_o}\right)^2} \quad (29)$$

Тогда в зависимости от количества режущих зубьев, ширина среза будет равна

$$b_i = D_o \left(\frac{1}{\sqrt{3}} - \sqrt{1 - 4\left(\frac{1}{\sqrt{6}} + \frac{i \cdot a_z}{D_o}\right)^2} \right), \quad (30)$$

где $i = 1, 2, \dots, k$ – количество зубьев протяжки, а a_z – величина подъёма на зуб.

Составим условие, из которого следует, что

$$k = \left(\frac{D_o}{2} - H\right) / a_z = \left(\frac{D_o}{2} - \frac{D_o}{\sqrt{6}}\right) / a_z = \frac{D_o}{a_z} \left(\frac{1}{2} - \frac{1}{\sqrt{6}}\right); \quad (31)$$

и найдём из него, что

$$\frac{a_z}{D_o} = \frac{1}{k} \left(\frac{1}{2} - \frac{1}{\sqrt{6}}\right). \quad (32)$$

Подставляя полученное соотношение в формулу для расчета b_i , наконец получаем что

$$\begin{aligned} b_i &= D_o \left(\frac{1}{\sqrt{3}} - \sqrt{1 - 4\left(\frac{1}{\sqrt{6}} + \frac{i}{k} \left(\frac{1}{2} - \frac{1}{\sqrt{6}}\right)\right)^2} \right) = \\ &= D_o \left(\frac{1}{\sqrt{3}} - \sqrt{1 - \left(\frac{2}{\sqrt{6}} \left(1 + \left(\frac{\sqrt{6}}{2} - 1\right) \frac{i}{k}\right)\right)^2} \right), \text{ мм.} \end{aligned} \quad (33)$$

Эта формула показывает, что k и величина подъёма на зуб a_z имеют обратную зависимость, чем меньше коэффициент, тем больше становится величина подъёма. Это обеспечивает высокую производительность протягивания как процесса. Кроме того, чем больше подъём на зуб, тем меньше зубьев нужно для обработки, поскольку весь припуск будет снят значительно быстрее. А чем меньше зубьев, тем меньше длина всего инструмента. В целом, уменьшенная длина протяжки, само по себе, вполне

положительное явление, ведь оно означает что инструмент становится проще в изготовлении и прочнее за счёт уменьшения отношения длины к диаметру протяжки. Пример подобного инструмента представлен на рисунке 34.



Рисунок 34 – Протяжка с малым отношением длины к диаметру

Тем не менее, это влечёт за собой и отрицательные последствия. Сокращение количества режущих зубьев означает, что усилие резания при протягивании распределится на оставшиеся зубья и каждый из них будет вынужден выдерживать намного большую нагрузку. При условии, что в итоговом варианте будет применена сборная протяжка, внутренний стержень будет выполнен из конструкционной стали, которая имеет довольно-таки невысокий предел прочности на растяжение, в пределах $\sigma_c = 300...350$ МПа. Этот момент может способствовать поломке инструмента. Поэтому, при проектировании инструмента необходимо уделить внимание условиям, отвечающим за прочность внутреннего стержня инструмента.

Распределение нагрузки по частям протяжного инструмента происходит неравномерно. Наибольшее усилие протягивание приходится на передние

зубья протяжки, поскольку они первыми начинают пробивать в материале необходимую форму готового изделия. Потому, зачастую, именно в начале режущей части происходят поломки зубьев.

В разделе 2 была рассмотрена формула (24), которая используется для расчёта силы, приходящейся на 1 мм обрабатываемого контура.

При этом усилие протягивания на одном отдельном зубе определяется как

$$P_{zi} = 2b_i p_z, \text{ Н.} \quad (34)$$

Что касается суммарного усилия протягивания, то оно напрямую зависит от числа одновременно работающих зубьев. Как правило, в литературе [5], [6], [14], [23] число одновременно работающих зубьев выбирается в диапазоне $z_i = 3 \dots 8$. В большинстве случаев, нет смысла выполнять обработку отверстия при $z_i < 3$, поскольку протяжка превращается в низкопроизводительный однолезвийный инструмент. Исключением может являться обработка очень коротких отверстий, где оправдано применение всего лишь двух зубьев. Однако и такой вариант применяется очень редко.

Чтобы не брать значения, находящиеся на грани целесообразности использования протяжного инструмента, примем z_i равным 4. При таком варианте максимальное суммарное усилие протягивания будет возникать при условии одновременной работы трёх последних зубьев секции (при условии размещения на одной секции четырёх зубьев). Они будут иметь условные номера $i = k, k - 1, k - 2$ и $k - 3$. Для упрощения вывода нужной формулы перейдем к безразмерной ширине среза. Обозначим её как $\beta_i = b_i / D_0$. Тогда для упомянутых зубьев получим

$$\beta_k = \frac{1}{\sqrt{3}}; \quad (35)$$

$$\beta_{k-1} = \frac{1}{\sqrt{3}} - \sqrt{1 - \left(\frac{2}{\sqrt{6}} \left(1 + \left(\frac{\sqrt{6}}{2} - 1 \right) \frac{k-1}{k} \right) \right)^2}; \quad (36)$$

$$\beta_{k-2} = \frac{1}{\sqrt{3}} - \sqrt{1 - \left(\frac{2}{\sqrt{6}} \left(1 + \left(\frac{\sqrt{6}}{2} - 1 \right) \frac{k-2}{k} \right) \right)^2}; \quad (37)$$

$$\beta_{k-3} = \frac{1}{\sqrt{3}} - \sqrt{1 - \left(\frac{2}{\sqrt{6}} \left(1 + \left(\frac{\sqrt{6}}{2} - 1 \right) \frac{k-3}{k} \right) \right)^2}. \quad (38)$$

Тогда суммарное усилие протягивания можно представить в виде формулы

$$P_{\tau\Sigma} = C_2 k^{-0,85} (\beta_k + \beta_{k-1} + \beta_{k-2} + \beta_{k-3}), \text{ Н}, \quad (39)$$

где коэффициент $C_2 = 0,26 \cdot C_p \sigma_B K_\gamma D_o^{1,85}$.

Теперь необходимо учесть, что суммарное усилие протягивания никак не должно разрушать инструмент. Одно должно быть меньше предела прочности на растяжение даже в самой узкой части протяжки. Так как ранее уже приведено объяснение, что самой хрупкой частью инструмента может являться внутренний стержень (ввиду используемого материала), составим формулу

$$\frac{P_{\tau\Sigma}}{F_c} \leq \sigma_c, \quad (40)$$

где F_c (мм²) – площадь поперечного сечения внутреннего стержня сборной протяжки.

В результате преобразования получается трансцендентное уравнение

$$k^{-0,85} (\beta_k + \beta_{k-1} + \beta_{k-2} + \beta_{k-3}) \leq \frac{\sigma_c F_c}{C_2}. \quad (41)$$

Решая данное уравнение относительно k , можно получить его целесообразное значение, учитывая прочность протяжки. Таким образом, величина подъёма на зуб, соответствующая условиям прочности и

количества зубьев относительно диаметра предварительно заготовленного отверстия, находится по формуле

$$a_z = \frac{D_0}{k} \left(\frac{1}{2} - \frac{1}{\sqrt{6}} \right). \quad (42)$$

Переводя из условных величин в обычные, получаем что в качестве k нужно подставить значение одновременно работающих зубьев. Теперь для получения величины подъёма на зуб нужно знать лишь диаметр отверстия до обработки, а количество одновременно работающих зубьев подбирается, исходя из заданных условий.

5 Разработка конструкции внутренней многогранной протяжки

5.1 Выбор конструктивных решений

Перед данной главой стоит задача собрать воедино всю информацию, озвученную в предыдущих разделах этой работы. Она представляет собой некий предварительный итог, возможность оценить, насколько реально применить отдельные рекомендации, касающихся разных параметров вместе в одном инструменте. Это касается как физической формы, так и режимов работы протяжки.

Прежде чем начать непосредственно проектирование, необходимо рассмотреть ещё несколько аспектов, касающихся конструкции инструмента в целом.

С точки зрения целостности конструкции, протяжки делятся на цельные и сборные.

Цельные протяжки представляют собой монолитный неразборный инструмент. Одним из их заметных преимуществ является прочность, поскольку отсутствие разъёмных соединений в протяжном инструменте означает меньшую вероятность неправильного соединения частей или поломку всего инструмента из-за некачественного изготовления одной из составляющих. Монолитность является и главным недостатком подобного типа протяжек. Дело в том, что поломки режущих зубьев так или иначе неизбежны. Этому способствуют как ошибки в проектировании и низкое качество изготовления инструмента, так и неправильные режимы резания и естественный износ, описанные в [10], [22]. В случае с цельной протяжкой подобная поломка ставит под угрозу весь инструмент – как минимум потребуется ремонт, а в случае, если один и тот же зуб обламывается не в первый раз или характер повреждения серьезнее и затронуты другие элементы инструмента, то утилизация неизбежна. При варианте ремонта в любом случае пострадает точность изготовления готового отверстия, что при

наличии высоких требований к его точности и шероховатости, делает инструмент опять же непригодным для дальнейшей эксплуатации. Так или иначе в скором времени появится необходимость покупки или изготовления нового инструмента, что выливается в простой оборудования и финансовые потери.

Сборные протяжки, как можно догадаться из названия, состоят из нескольких частей. В них, как правило, разделяют на разные детали основание, режущие и калибрующие зубья, хвостовик, переднюю и заднюю направляющие. Разумеется, они, как и любой инструмент обладают своими недостатками, связанными, в основном, с непрочным соединением частей между собой, и как следствием, низким качеством получаемой поверхности или даже поломкой протяжки. Однако, это легко предотвратить, если заранее просчитать нагрузки, которые испытывает инструмент во время работы, и в соответствии с ними разработать адекватную схему закрепления. Что касается преимуществ такого вида протяжек, то они намного более значительны, чем недостатки. Во-первых, упрощается процесс изготовления инструмента в виду того, что большинство сложных профилей протяжки разбивается на гораздо более простые. Это позволяет использовать менее дорогостоящее оборудование для изготовления, что благоприятно сказывается на экономической составляющей процесса. Во-вторых, поломка зуба на такой протяжке не приводит к катастрофическим последствиям. Достаточно разобрать инструмент и снять секцию, на которой размещается повреждённый зуб. Не потребуется даже ремонт секции, ведь секции просты в изготовлении. Можно сразу установить новую секцию и собрав инструмент заново, вернуть его в строй. При наличии некоторого количества запасных секций значительно сокращается время простоя оборудования – на операцию замены элемента протяжки уходит всего несколько минут, тогда как ремонт цельной протяжки займёт несколько часов, что повлечёт за собой снижение количества выпущенной продукции.

Таким образом, сборные протяжки к настоящему времени представляют собой наиболее прогрессивный вид конструкции протяжного инструмента. Их применение значительно экономит время и средства любого металлообрабатывающего производства.

В разделе 3 была рекомендована схема снятия припуска, при которой за раз будут обрабатываться только две грани отверстия. Совместив это решение с разделением протяжки на несколько деталей, получим, что каждая съёмная режущая секция будет обрабатывать свою пару граней. Поскольку отверстие шестигранное, режущая часть будет состоять из трёх элементов. Это позволит упростить процесс ремонта инструмента при условии поломки режущих зубьев, в сравнении с конструкциями, где каждый зуб закреплён отдельно на основании протяжки. Кроме того, уменьшится количество деталей в протяжке, что повысит точность её работы.

На основании рекомендаций из раздела 4, выбрано количество одновременно работающих зубьев. Их число составило четыре, как наименьшее и достаточное для эффективной обработки и соответствующее условиям прочности инструмента. Поэтому на каждой секции будет размещено по четыре режущих зуба. Поскольку выбрана групповая схема срезания припуска, необходимо предусмотреть несколько режущих зубьев, имеющих полный профиль готового изделия на конце протяжки. Наиболее логично расположить их в отдельной, четвёртой по счёту секции. Там же будут размещены и калибрующие зубья. Несмотря на то, что изготовление такой режущей секции сложнее, чем предыдущих, без подобного решения обойтись нельзя. Отсутствие режущих зубьев с полным профилем приведёт к неизбежной потере качества готового отверстия. А в случае, если попытаться развести и калибрующие зубья на разные части, то кроме ухудшения качества это приведёт к нецелесообразному увеличению длины инструмента, что негативно скажется на его прочности [26]. Кроме того, изготовление одной сложной детали вместо четырёх всё равно значительно упрощает

технологический процесс изготовления протяжки. Поэтому важно оставить четвёртую секцию инструмента многогранной.

В основе конструкции протяжки будет лежать стержень, представленный на рисунке 35. Он будет выполнять поддерживающую и ориентирующую функцию для остальных деталей. Стержень будет представлять собой вал диаметром 26 миллиметров со шпоночным пазом для закрепления съёмных частей инструмента. Передняя часть стержня, на которой шпонка установлена не будет, выполнена резьбовой для крепления иных частей протяжки. Задняя часть стержня будет объединена с задней направляющей частью протяжки. Задняя направляющая в данном случае представляет собой шестигранный блок с длиной стороны, равной длине калибрующих зубьев. Он предназначен для поддержания заготовки, в момент, когда она сходит с последних калибрующих зубьев протяжного инструмента.

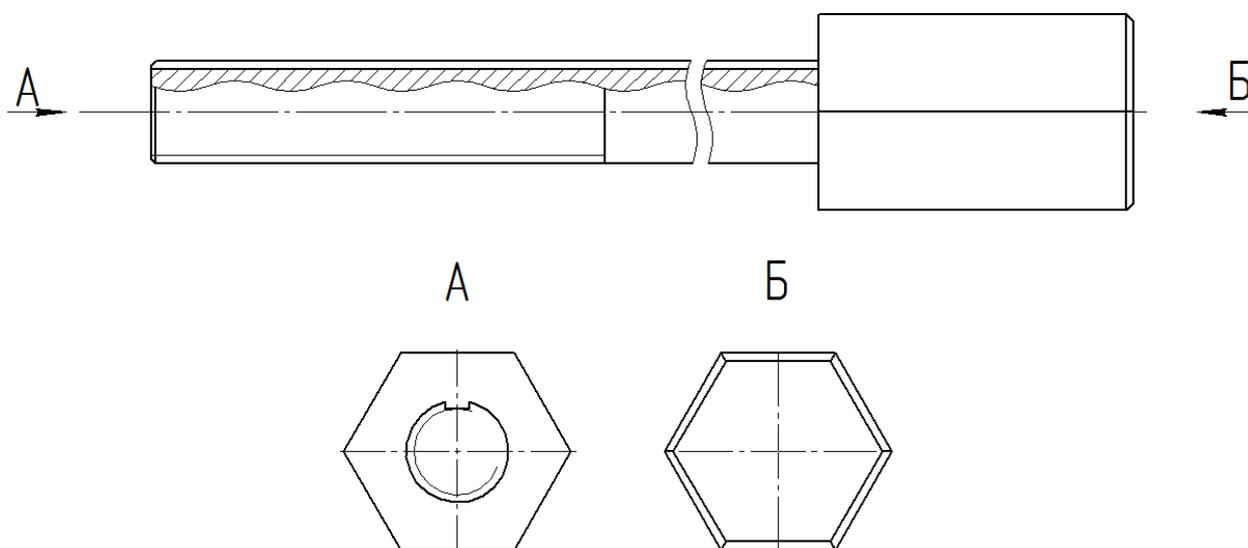


Рисунок 35 – Эскиз стержня

Стандартная [29] шпонка, показанная на рисунке 36, будет устанавливаться в шпоночный паз стержня. Она предназначена для ориентирования и фиксирования съёмных деталей протяжки.

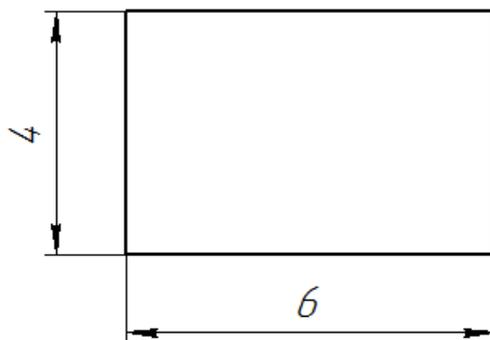


Рисунок 36 – Эскиз шпонки

На шпонку со стержнем будут надеваться режущие секции. Они будут иметь сквозные цилиндрические отверстия со шпоночным пазом. Секции с номерами 1, 2 и 3 будут иметь две режущие грани. Первая секция будет располагаться на стержне так, что режущие грани будут находиться горизонтально. Две другие секции будут располагаться под углами 60° и -60° относительно горизонтали. Для их правильного ориентирования шпоночные пазы будут размещены в разных частях цилиндрического отверстия. Эскиз режущих секций представлен на рисунке 37.

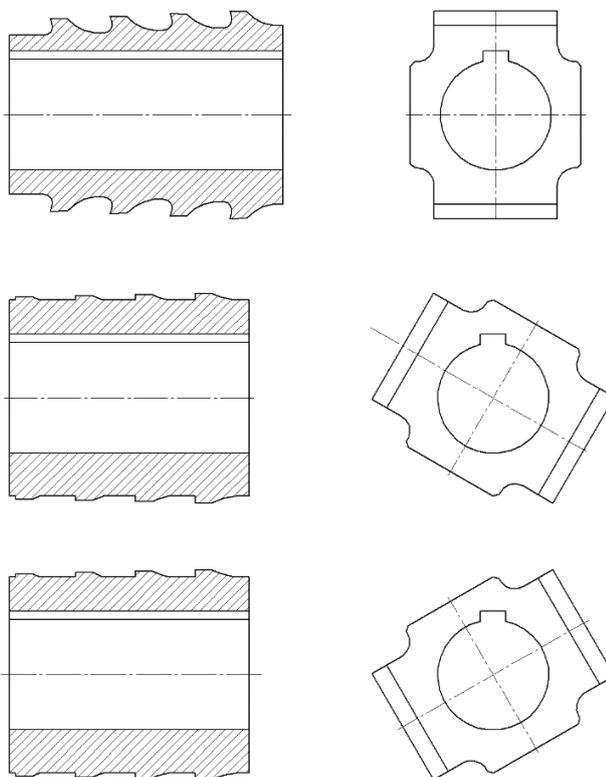


Рисунок 37 – Эскиз режущих секций 1-3

Секция номер 4, показанная на рисунке 38, будет располагаться непосредственно перед задней направляющей. Она будет иметь шесть режущих граней, и внутреннюю конструкцию аналогичную другим секциям.

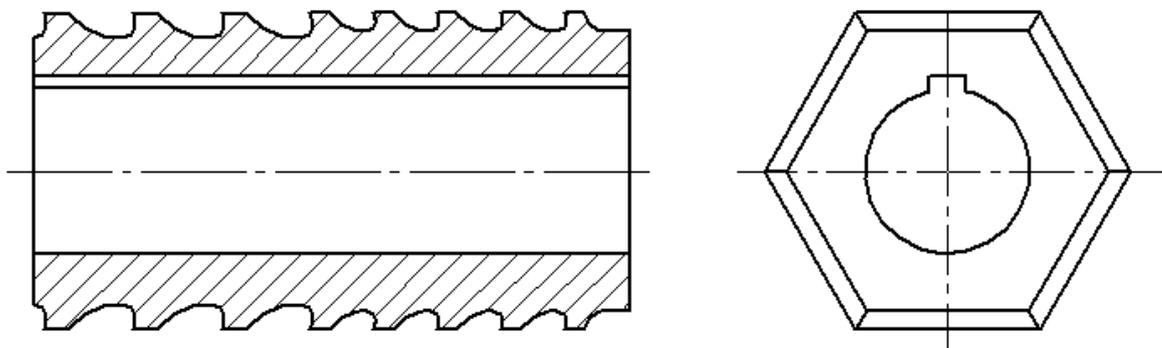


Рисунок 38 – Эскиз режущей секции 4

После режущих секций, на стержне будет располагаться передняя направляющая, показанная на рисунке 39. Она служит для ориентирования заготовки относительно режущих зубьев протяжного инструмента, поэтому к ней предъявляются высокие требования в части точности расположения и диаметра наружной поверхности. Направляющая представляет собой цилиндрическую деталь типа вал со сквозным отверстием. Во внутреннем отверстии, по аналогии с режущими секциями, выполнен шпоночный паз для закрепления детали на основании протяжки.

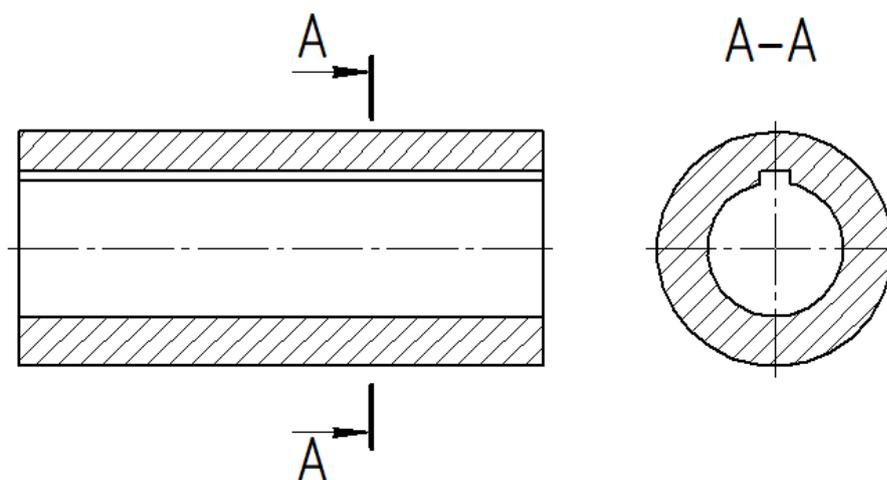


Рисунок 39 – Эскиз передней направляющей

Режущие секции будут закрепляться, помимо шпонки, с помощью гайки и аналогичной ей конtringящей гайки. Их внутренняя поверхность выполнена в виде сквозного отверстия с резьбой, а внешняя поверхность – цилиндрическая, диаметром равная хвостовику. Это сделано для того, чтобы протяжка могла гарантированно проходить через предварительно заготовленное отверстие вплоть до касания его режущими зубьями. Эскиз гайки показан на рисунке 40.

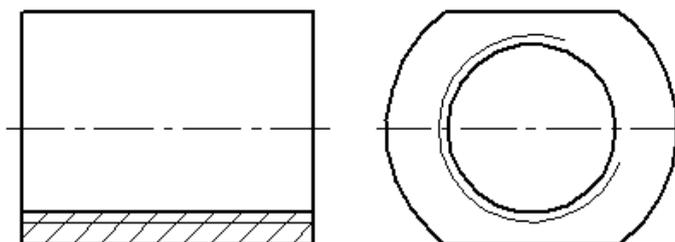


Рисунок 40 – Эскиз гайки

Хвостовик, показанный на рисунке 41, представляет собой цилиндрическую деталь, состоящую из нескольких шеек различных диаметров и конусных частей. Он предназначен в первую очередь для закрепления протяжки в протяжном станке, а также для того, чтобы передавать ей тяговое усилие. В заднем торце хвостовика предусмотрено глухое цилиндрическое отверстие с резьбой для крепления на стержень.

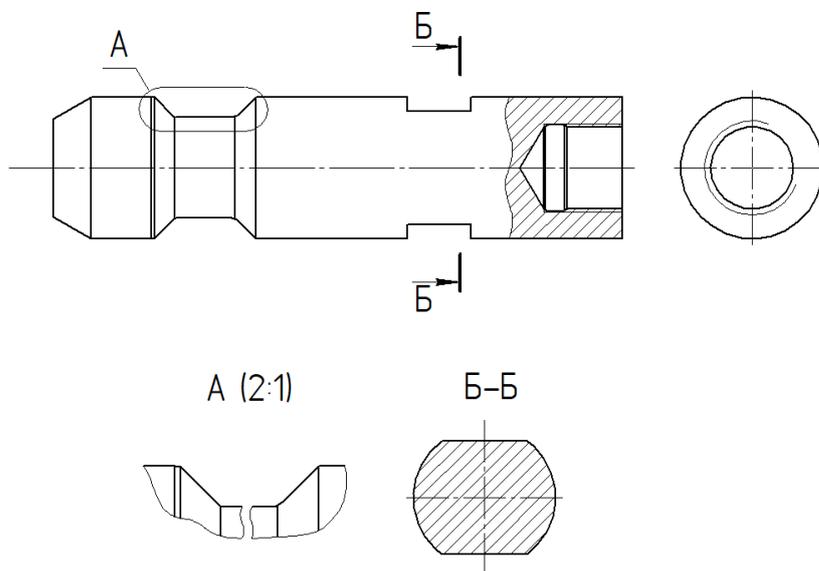


Рисунок 41 – Эскиз хвостовика

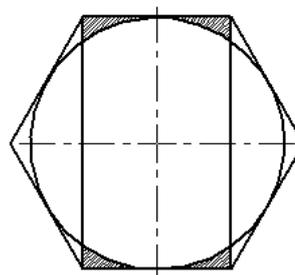
Теперь, когда намечена эскизная планировка инструмента, можно приступить к подробному расчёту сборной многогранной протяжки.

5.2 Анализ геометрии снимаемого припуска

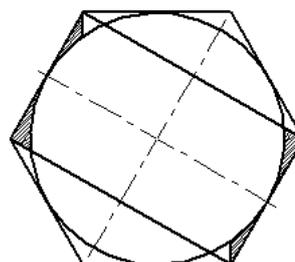
Получение шестигранного отверстия данной протяжкой имеет свои особенности. Снятие основного припуска осуществляется с помощью зубьев, обрабатывающих за раз только две грани из шести. В связи с этим, припуск снимается не равномерно, а по неким зависимостям, которые предстоит определить.

То, как распределяется припуск между режущими секциями, показано на рисунке 42.

Секция 1: 42,055%



Секция 2: 33,3%



Секция 3: 24,611%

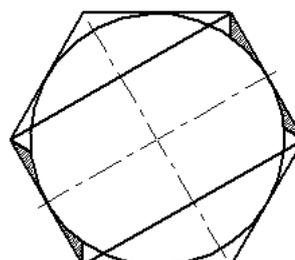


Рисунок 42 – Распределение припуска по секциям

На рисунке можно проследить, что наибольшую часть припуска (почти половину от всего объёма) снимает первая секция. Этот факт дополнительно подтверждает изложенное в предыдущем разделе утверждение о том, что наибольшие нагрузки приходятся именно на первые зубья протяжек. Причина такого явления, в геометрическом смысле, заключается в том, что пересекаются площади припуска, снимаемые разными режущими гранями. Казалось бы, это означает, что для экономии ресурсов необходимо перестроить зубья протяжки так, чтобы каждый зуб снимал только свой собственный припуск. Однако на деле же зубья должны будут выглядеть так, как показано на рисунке 43.

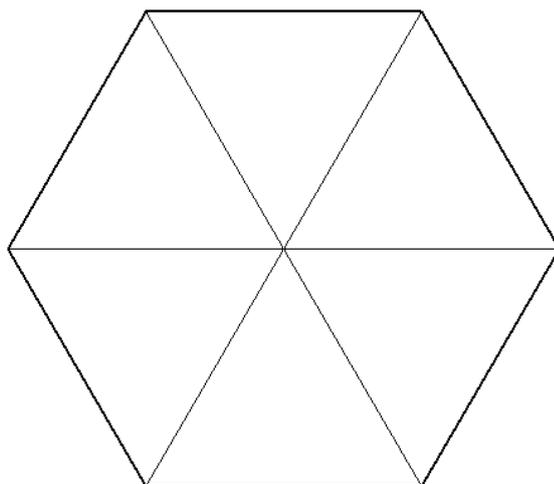


Рисунок 43 – Шестигранник, разделённый на шесть равных частей

Недостатки такой схемы следующие. Во-первых, есть вероятность, что в силу неточности изготовления зубьев неизбежно появятся зазоры и протяжка будет оставлять части припуска, которые создадут дополнительную нагрузку для последнего зуба, имеющего полный профиль изделия. Во-вторых, изготовление треугольных зубьев сложнее, чем обычных прямоугольных в силу того, что для правильной сходимости граней в точке соединения со стержнем нужно будет назначить дополнительные допуски формы поверхности, что потребует больших вложений в

оборудование. Разница в угле наклона боковой поверхности приведёт к появлению разницы в условиях резания протяжки, неравномерному износу инструмента и потере качества готового изделия, причиной которой является третий недостаток – слишком маленькая площадь стружечной канавки. При такой схеме она будет стремиться к минимуму, кроме того, внутренний уклон боковых стенок будет приводить к тому, что по краям режущих граней стружка будет просто неконтролируемо падать в свободное пространство, усложняя прохождение инструмента и нанося царапины на стенки готового отверстия. Эти недостатки в общей сумме перекрывают преимущества от подобного расположения секций, поэтому решено оставить исходную схему снятия припуска.

Кроме того, установлено соотношение площади припуска с диаметром предварительно заготовленного отверстия. Оно является ничем иным, как параболической зависимостью. Чтобы результаты были более читабельны, они размещены в таблице 2.

Таблица 2 – Зависимость площади припуска от диаметра отверстия

Диаметр отверстия, мм	Площадь припуска, мм ²
10	8,063
20	32,251
30	72,565
40	129,004
50	201,568

Также выведены формулы, которые позволяют рассчитать площадь припуска, который будет снимать каждая секция с двумя режущими гранями при обработке шестигранного отверстия. Для вычисления значения с малой погрешностью требуется задать наибольшую высоту припуска (здесь она будет обозначена как c) и ширину режущих зубьев l .

Величина c при этом составит

$$c = R - \sqrt{R^2 - \left(\frac{l}{2}\right)^2}, \text{ мм}, \quad (43)$$

где R – радиус предварительно заготовленного отверстия.

Первая секция сборной протяжки снимет припуск площадью

$$S_1 = \frac{4 \cdot l \cdot c}{\pi}, \text{ мм}^2. \quad (44)$$

Следующая секция инструмента снимет припуск площадью, равной

$$S_2 = \frac{4 \cdot l \cdot c}{\pi} - c \cdot \left(\frac{\sqrt{3} \cdot c}{2} + \frac{1}{\pi} \right), \text{ мм}^2. \quad (45)$$

Третья секция протяжки снимет наименьший припуск площадью

$$S_3 = 4 \cdot c \cdot \left(\frac{l}{\pi} - \frac{\sqrt{3} \cdot c}{4} + \frac{1}{2\pi} \right), \text{ мм}^2. \quad (46)$$

Теперь, после дополнительного анализа, касающегося анализа припуска и выведения дополнительных форм, можно наконец приступить к расчётной части настоящей работы.

5.3 Расчёт параметров протяжного инструмента

На основе всей информации, собранной выше, а также методики, рассмотренной в главе 1 и описанной [23], приступим к проектированию сборной протяжки. Следует учесть, что она должна удовлетворять стандартам [12], [13].

Материалом режущих секций выбрана классическая для протяжного инструмента быстрорежущая сталь Р6М5, все остальные детали будут изготовлены из конструкционной стали марки 40Х. Нет необходимости увеличивать стоимость протяжки за счёт применения более дорогой стали для менее ответственных её частей, поскольку свойств стали 40Х вполне достаточно для обеспечения корректной работы инструмента.

Выбраны величины углов режущих зубьев – задний составил $\alpha = 3^\circ$, передний $\gamma = 15^\circ$.

Согласно формулам (26) и (43), ширина режущих зубьев и наибольшая толщина припуска составят

$$l = \frac{50}{\sqrt{3}} = 28,868 \text{ мм};$$

$$c = 50 - \sqrt{50^2 - \left(\frac{28,868}{2}\right)^2} = 9,175 \text{ мм}.$$

Первая секция будет снимать припуск, по площади равный

$$S_1 = \frac{4 \cdot 28,868 \cdot 9,175}{\pi} = 84,769 \text{ мм}^2;$$

площадь припуска, снятого второй секцией равна

$$S_2 = \frac{4 \cdot 28,868 \cdot 9,175}{\pi} - 9,175 \cdot \left(\frac{\sqrt{3} \cdot 9,175}{2} + \frac{1}{\pi} \right) = 67,183 \text{ мм}^2;$$

наконец, третья секция снимет припуск площадью

$$S_3 = 4 \cdot 9,175 \cdot \left(\frac{28,868}{\pi} - \frac{\sqrt{3} \cdot 9,175}{4} + \frac{1}{2\pi} \right) = 49,608 \text{ мм}^2.$$

На основе рекомендаций, изложенных в разделе 4, выбрано количество одновременно работающих зубьев. Их число составило 4. Шаг между зубьями определяется по формуле

$$t = (1,25 \dots 1,5) \sqrt{L_0}, \quad (47)$$

где L_0 – длина протягивания. Получаем

$$t = 12,5 \dots 15 \text{ мм}.$$

Выбирается ближайшее стандартное значение, попадающее в рассчитанный диапазон. Принят шаг между зубьями в 14 мм. Размеры стружечных канавок назначены согласно [23, с. 4]. Величина подъёма на зуб согласно формуле 42 составит

$$a_z = \frac{50}{4} \left(\frac{1}{2} - \frac{1}{\sqrt{6}} \right) = 1,148 \text{ мм}.$$

Для расчёта силы, приходящейся на миллиметр обрабатываемого контура, применяется формула (34). В данном случае она равна

$$p_z = 3,3 \cdot 430 \cdot 1,148^{0,85} \cdot 1 = 625,689 \text{ Н/мм.}$$

Для расчёта усилия протягивания используется формула (25). Оно составит

$$P_T = \pi \cdot 625,689 \cdot 50,062 \cdot 28,868 = 226975 \text{ Н.}$$

Напряжения в канавке перед первым зубом определяются по формуле (7) и составляют:

$$\sigma_1 = \frac{4 \cdot 226975}{3,14 \cdot (50 - 2 \cdot 4)^2} = 163,829 \text{ МПа.}$$

При этом должно соблюдаться условие $\sigma_1 \leq [\sigma_{\text{н}}] = 450 \text{ МПа}$, поскольку именно такому значению в МПа равно допускаемое напряжение на изгиб конструкционной стали. В данном случае условие принимает вид $163,829 \leq 450 \text{ МПа}$, стало быть, не выполняется.

Наименьшая площадь сечения хвостовика назначается согласно указаниям [13], [23, с. 6]. Она составит $907,9 \text{ мм}^2$.

Далее рассчитано напряжение, которое возникает под действием силы протягивания согласно формуле (8). Оно равно

$$\sigma_x = \frac{226975}{907,9} = 249 \text{ МПа.}$$

Нужно, чтобы сходилось условие $\sigma_x \leq [\sigma_x] = 249 \text{ МПа}$. Поскольку $249 < 250 \text{ МПа}$, условие выполняется.

Теперь найдём суммарное усилие протягивания на всех одновременно работающих зубьях протяжки по формулам (35) – (39):

$$\beta_4 = \frac{1}{\sqrt{3}} = 0,577;$$

$$\beta_{4-1} = \frac{1}{\sqrt{3}} - \sqrt{1 - \left(\frac{2}{\sqrt{6}} \left(1 + \left(\frac{\sqrt{6}}{2} - 1 \right) \frac{4-1}{4} \right) \right)^2} = 0,278;$$

$$\beta_{4-2} = \frac{1}{\sqrt{3}} - \sqrt{1 - \left(\frac{2}{\sqrt{6}} \left(1 + \left(\frac{\sqrt{6}}{2} - 1 \right) \frac{4-2}{4} \right) \right)^2} = 0,159;$$

$$\beta_{4-3} = \frac{1}{\sqrt{3}} - \sqrt{1 - \left(\frac{2}{\sqrt{6}} \left(1 + \left(\frac{\sqrt{6}}{2} - 1 \right) \frac{4-3}{4} \right) \right)^2} = 0,071;$$

$$C_2 = 0,26 \cdot 3,3 \cdot 430 \cdot 1 \cdot 50^{1,85} = 512921;$$

$$P_{\Sigma} = 512921 \cdot 4^{-0,85} \cdot (0,577 + 0,278 + 0,159 + 0,071) = 171334 \text{ Н.}$$

Далее, необходимо проверить выведенные ранее условия (40) и (41), сравнивающие суммарное усилие протягивания с пределом прочности инструмента на растяжение. Их значения составляют

$$\frac{171334}{530,93} = 322,705 \leq 350 \text{ МПа ,}$$

где F_c (мм²) – является площадью поперечного сечения стержня. Он принят равным 530,93 мм²;

$$4^{-0,85} \cdot (0,577 + 0,278 + 0,159 + 0,071) \leq \frac{350 \cdot 530,93}{512921},$$

$$0,334 < 0,362.$$

Таким образом, оба условия выполняются. Это значит, что силовой расчёт протяжного инструмента выполнен верно.

Теперь нужно рассчитать число режущих зубьев, используя формулу

$$z = \left[\frac{A}{a_z} \right] + 1, \quad (48)$$

где: A – припуск под протягивание. В результате получилось:

$$z = \left[\frac{4,593}{1,148} \right] + 1 = 5.$$

Затем была определена толщина стружки, которая снимается одним чистовым зубом:

$$A' = A - a_z \cdot (z - 1). \quad (49)$$

Она составляет

$$A' = 4,593 - 1,148 \cdot (5 - 1) = 0,919 \text{ мм.}$$

Для корректной работы одного зуба нужно, чтобы выполнялось условие $A' \leq a'_z$, где $a'_z \leq 0,5 a_z$. Приняв за толщину значение $a'_z = 1,148$, получаем результат $0,919 > 0,574$, условие не выполняется. Это значит, что в конструкции инструмента нужно применить два чистовых зуба.

На основании расчётов выше получается, что на обработку каждого отверстия должно приходиться пять черновых и два чистовых режущих зуба. Как изначально и планировалось, на каждой режущей секции будет размещено лишь по четыре режущих зуба на каждой секции. Пятым зубом для всех трёх секций будет единый зуб с полным профилем, размещённый на последней секции с зубьями. Кроме того, такое решение удовлетворяет выбранной схеме срезания припуска, где последний режущий зуб не должен иметь пропусков в форме и полностью совпадать по периметру с готовым отверстием.

Согласно заданным требованиям по точности готового отверстия, на протяжке необходимо разместить пять калибрующих зубьев. Их форма будет аналогична форме чистовых режущих зубьев. Такое решение упростит форму конкретной секции, кроме того, не потребуются изготовление целых трёх отдельных калибрующих секций, что значительно усложнило бы конструкцию, стоимость и прочность изделия. Также, калибрующие зубья значительно меньше изнашиваются вследствие условий работы, а значит не требуют модернизации конструкции, которая была проделана с режущими зубьями.

Далее нужно определить высоты режущих зубьев. Расчёт начинается с определения высоты первого зуба, значение которого находится как разница диаметра готового отверстия с максимальным допуском и припуска на обработку:

$$H_1 = 50,062 - 4,592 = 45,470 \text{ мм.}$$

Высоты всех остальных черновых зубьев определяются с помощью формулы

$$H_i = D_0 + 2 \cdot a_z \cdot (i - 1), \text{ мм} \quad (50)$$

Они будут равны:

$$H_2 = 45,470 + 1,144 = 46,614;$$

$$H_3 = 46,614 + 2,288 = 47,758;$$

$$H_4 = 47,758 + 3,432 = 48,902;$$

$$H_5 = 48,902 + 4,576 = 50,046.$$

Далее, нужно рассчитать высоты уже чистовых режущих зубьев. Для этого используется несколько другая формула

$$H_{чj} = H_z + 2 \cdot a'_z j, \text{ мм} , \quad (51)$$

где: j – это количество чистовых режущих зубьев; а H_z – высота последнего черного зуба. Получаем:

$$H_{ч1} = 50,046 + 0,008 = 50,054;$$

$$H_{ч2} = 50,054 + 0,008 = 50,062.$$

Высота последнего зуба $H_{ч2}$ равна максимально допустимому диаметру готового отверстия D_{\max} , а это значит, что высоты рассчитаны верно.

Длина режущей части, а значит длина всех трёх секций и двух зубьев из четвертой находится по формуле

$$l_p = t \cdot (z + z'). \quad (52)$$

Получаем

$$l_p = 14 \cdot (13 + 2) = 210 \text{ мм}.$$

Шаг калибрующих зубьев приблизительно равен

$$t_k \approx \frac{2}{3} t, \quad (53)$$

следовательно, в нашем случае, он составляет

$$t_k \approx \frac{2}{3} \cdot 14 = 9,333 \text{ мм}.$$

Принимаем ближайшее стандартное значение в 10 мм согласно методике [23, с. 4].

Длина калибрующей части протяжки (здесь это часть четвертой секции) определяется по формуле

$$l_k = t_k \cdot z_k \quad (54)$$

и равна

$$l_k = 5 \cdot 10 = 50 \text{ мм.}$$

Длину передней направляющей протяжки $l_{\text{пн}}$ выбирают исходя из диапазона $(0,8...1,0)L_0$. Поскольку $L_0 = 100$ мм, итоговое значение должно быть в пределах 80-100 мм. Принимаем $l_{\text{пн}} = 100$ мм.

Длина задней направляющей назначается аналогично, но в пределах $l_{\text{зн}} = (0,6...0,8)L_0$. Так как была выбрана максимально допустимая длина передней направляющей, задняя направляющая будет аналогично максимальной возможной. Примем $l_{\text{зн}} = 100$ мм.

Расстояние до первого зуба сборной протяжки находится по формуле

$$L_1 = 280 + l_{\text{пн}}. \quad (55)$$

Получается:

$$L_1 = 280 + 100 = 380 \text{ мм.}$$

Таким образом, общая длина инструмента находится как сумма длин расстояния до первого зуба, режущей, калибрующей части и задней направляющей:

$$L = L_1 + l_p + l_k + l_{\text{зн}}. \quad (56)$$

Получаем:

$$L = 380 + 210 + 50 + 80 = 720 \text{ мм.}$$

Для того, чтобы протяжка имела необходимую жёсткость, должно выполняться геометрическое условие $L \leq 40D$. Поскольку диаметр предварительно заготовленного отверстия, а значит и вписанной окружности шестигранника равен 50 мм, условие будет принимать вид $720 \leq 2000$ мм. Отсюда следует, что оно выполняется.

5.4 Выводы по разработке конструкции многогранной протяжки

При выполнении этого раздела магистерской диссертации была подтверждена правильность выбора схемы работы сборной протяжки.

Произведено эскизное проектирование протяжного инструмента. Был проведён анализ припуска, и в результате выведены формулы, которые позволяют упростить оптимизацию и расчёт инструмента, в частности, определить величину припуска, пропорционально снимаемого каждой режущей секцией. Установлено, что площадь снимаемого припуска к диаметру предварительно заготовленного отверстия имеет гиперболическую зависимость. На основе всей информации, изложенной выше, произведён расчёт сборной многогранной протяжки.

6 Анализ напряжённого состояния зуба разработанной протяжки

6.1 Подготовка исходных данных для анализа

Для того, чтобы убедиться в том, что новая протяжка рассчитана верно, а выведенные рекомендации и формулы имеют право на существование, необходимо провести ещё один анализ напряжённого состояния – теперь испытанию будет подвергаться новая конструкция.

По аналогии с предыдущим разом расчёт будет проводиться в модуле Static Structural программы конечно-элементного анализа ANSYS V14.5.

Согласно формуле (24) сила протягивания на миллиметр контура составила

$$p_z = 3,3 \cdot 430 \cdot 1,148^{0,85} \cdot 1 = 625,689 \text{ Н/мм.}$$

Усилие протягивания определяется по формуле (25) и составляет

$$P_T = \pi \cdot 625,689 \cdot 50,062 \cdot 28,868 = 226975 \text{ Н.}$$

Теперь можно перейти к проведению прочностного анализа.

6.2 Проведение анализа

По аналогии с первым расчётом была создана модель заготовки в момент обработки. Точно так же она представляет собой цилиндр со сквозным отверстием, только отпечаток режущих зубьев в части формы, высоты и количества зубьев переработан с учётом новой конструкции режущей секции. Эта модель представлена на рисунке 44.

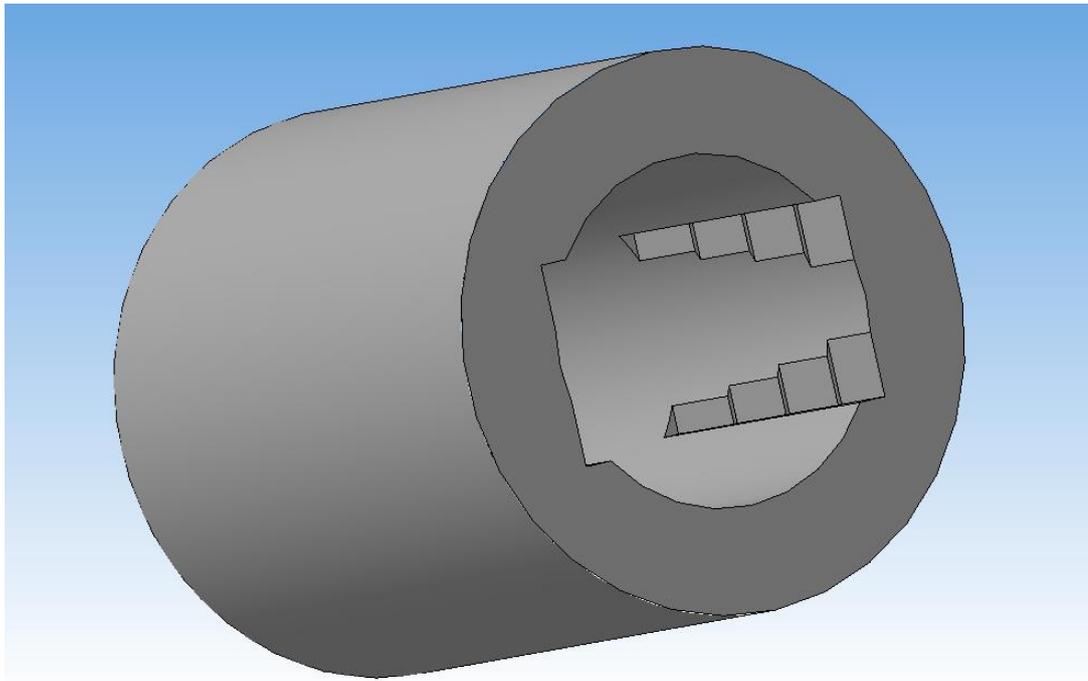


Рисунок 44 – Модель отверстия под протягивание в процессе обработки

Ситуация с назначением материала тоже аналогична первому анализу – для обоих тел выбирается конструкционная сталь, вследствие незначительных отличий стали Р6М5 для проведения расчёта. Указание материала детали представлено на рисунке 45.

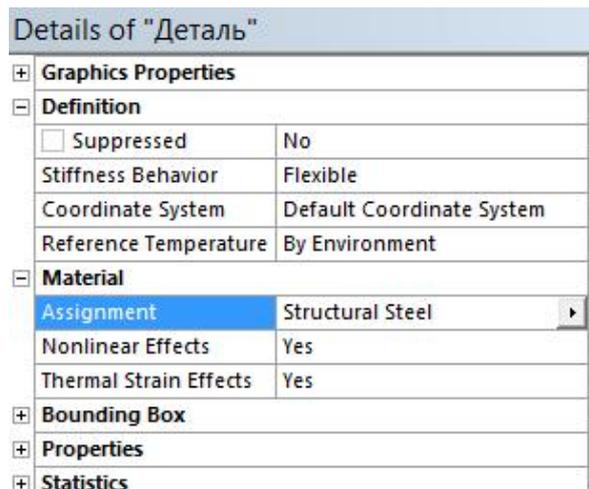


Рисунок 45 – Указание материала детали

Далее была построена сетка конечных элементов для модели отверстия и режущей секции. Результаты представлены на рисунках 46 и 47.

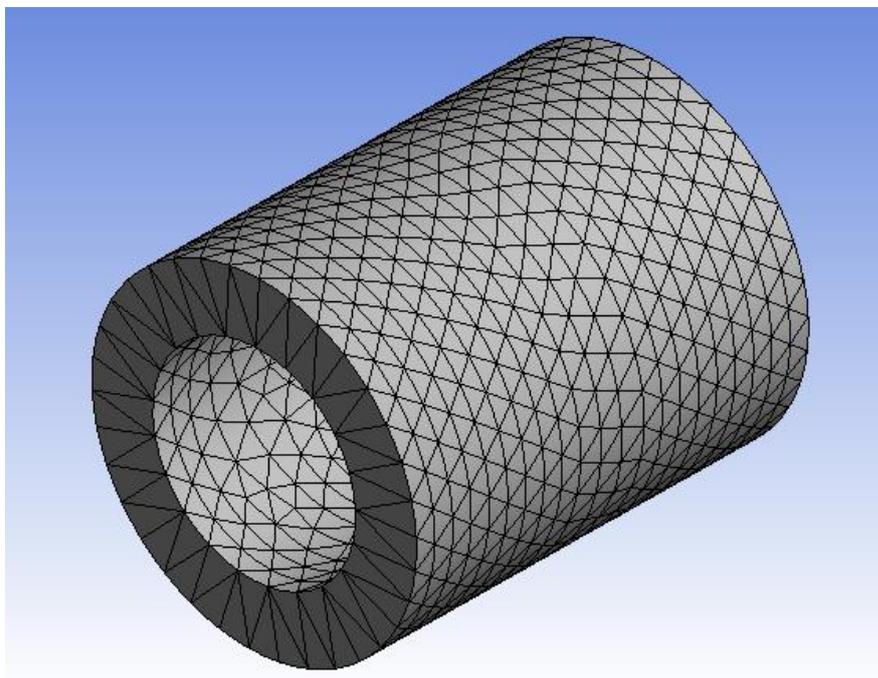


Рисунок 46 – Построение сетки конечных элементов для модели отверстия

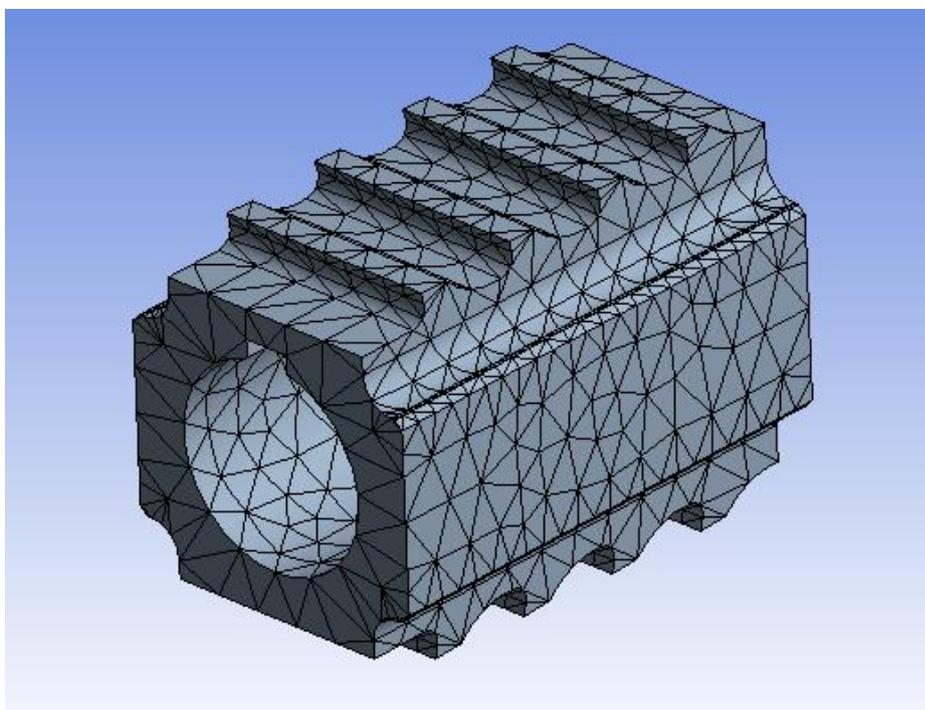


Рисунок 47 – Построение сетки конечных элементов для модели секции

В качестве заделки выбрана задняя стенка модели отверстия, как показано на рисунке 48 – во время обработки усилие протягивания будет пытаться тянуть деталь за собой, поэтому важно выбрать сторону закрепления, находящуюся как можно дальше от вектора приложения усилия. В данном случае, в отличие от раздела 2, выбрано моделирование непосредственно процесса протягивания, а не его зеркальной копии. Это связано с тем, что форма режущего зуба здесь значительно проще, что уменьшает вероятность появления ошибок в расчёте, связанных с геометрией изделия.

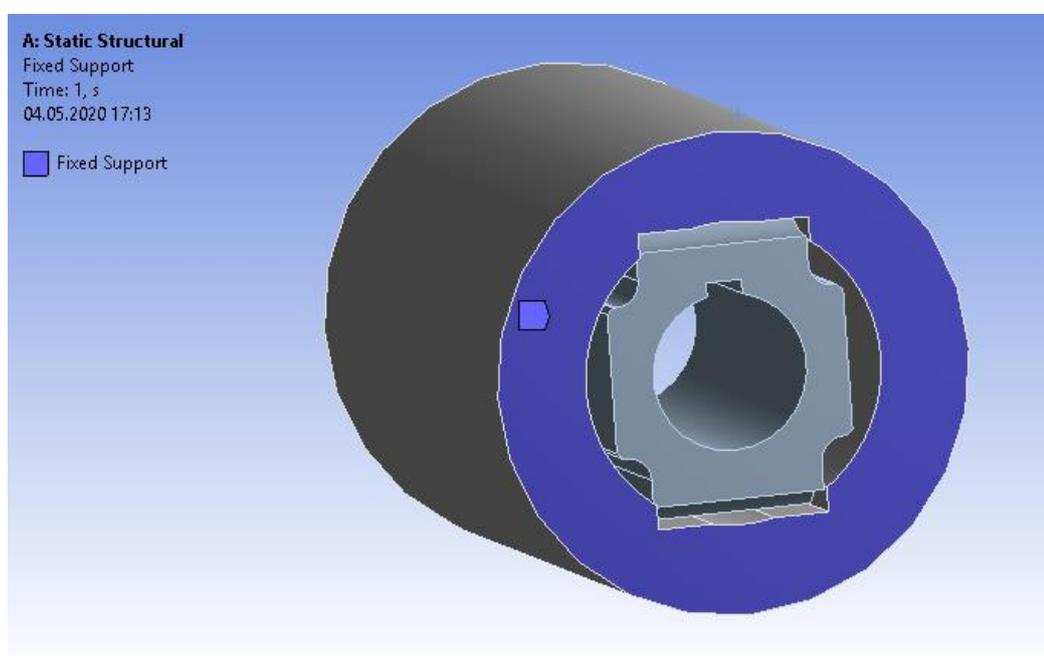


Рисунок 48 – Выбор поверхности, использующейся в качестве заделки

Затем был указан вектор усилия протягивания на передней торцевой плоскости протяжки. Направление вектора указано согласно схеме обработки – сонаправленно движению протяжки во время процесса резания. Результаты представлены на рисунках 49 и 50.

Details of "Force"	
[-] Scope	
Scoping Method	Geometry Selection
Geometry	1 Face
[-] Definition	
Type	Force
Define By	Components
Coordinate System	Global Coordinate System
<input checked="" type="checkbox"/> X Component	-2,2698e+005 N (ramped)
<input type="checkbox"/> Y Component	0, N (ramped)
<input type="checkbox"/> Z Component	0, N (ramped)
Suppressed	No

Рисунок 49 – Указание вектора приложения усилия

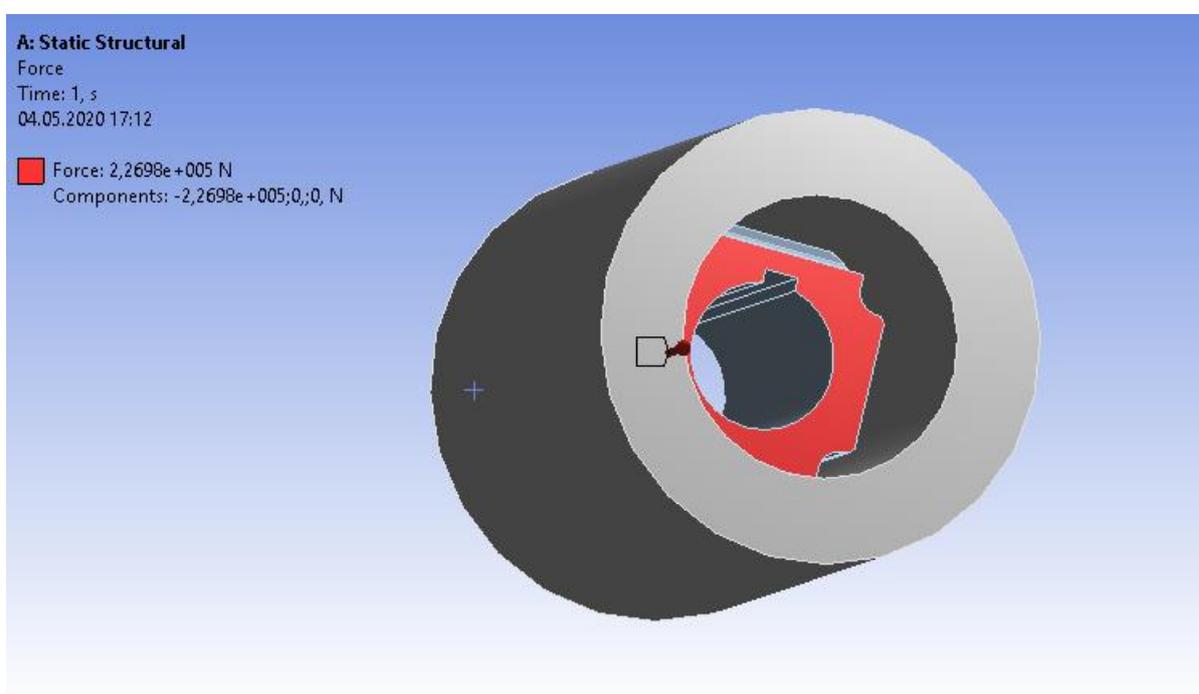


Рисунок 50 – Результат указания вектора

6.3 Результаты анализа

Полученные значения представлены ниже – на рисунке 51 – максимальное значение, которое принимают напряжения во время процесса протягивания; на рисунках 52 и 53 – эквивалентные напряжения на всех плоскостях инструмента.

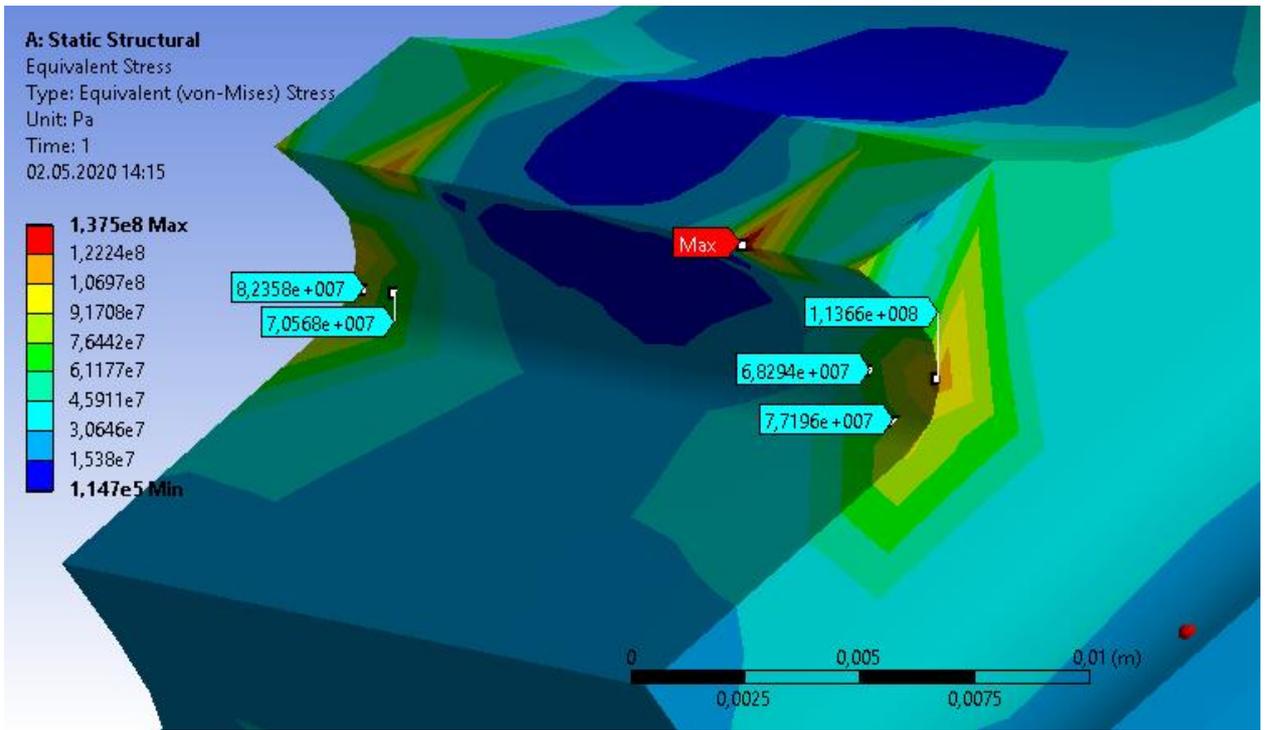


Рисунок 51 – Максимальное значение эквивалентных напряжений

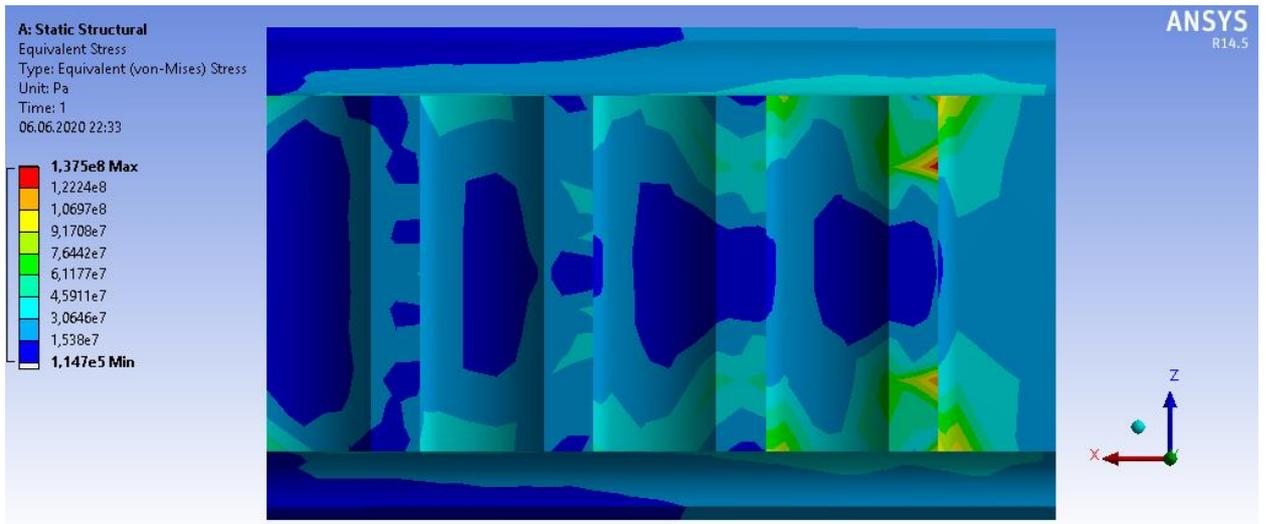


Рисунок 52 – Эквивалентные напряжения на режущих зубьях

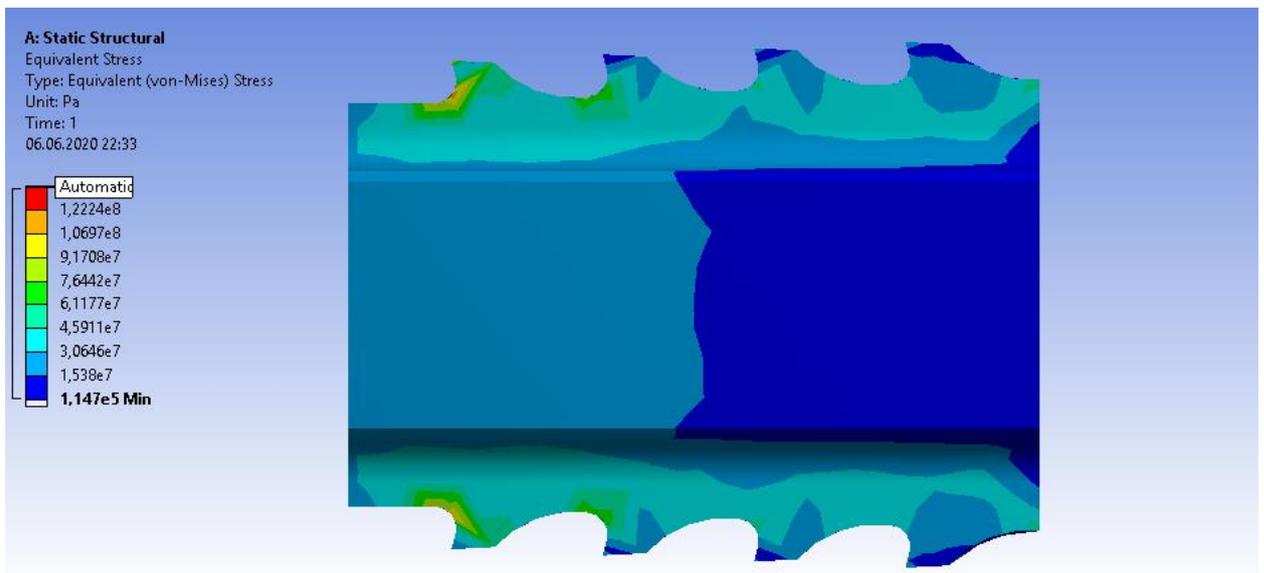


Рисунок 53 – Эквивалентные напряжения на боковых поверхностях

Из них следует, что эквивалентные напряжения на детали не превышают значений в 137 МПа, что является абсолютно некритичным значением. При этом максимальное значение напряжения в канавке перед первым зубом не превышает 113 МПа. В разделе, посвящённом проектированию инструмента было рассчитано условие, согласно которому значение напряжения в указанном месте для этой детали не должно превышать 163 МПа. Полученное значение соответствует условию.

Результаты, полученные в процессе анализа напряжённого состояния, свидетельствуют о том, что разработанная деталь спроектирована правильно и отличается от исходной протяжки в части условий резания на режущих зубьях, а значит, способна эффективно производить механическую обработку.

Заключение

В магистерской диссертации на тему «Исследование процесса обработки многогранных отверстий сборными протяжками с групповой схемой срезания припуска» было решено повысить работоспособность внутренних многогранных протяжек. Для этого был проведён целый комплекс работ различного рода.

Была проанализирована вся необходимая информация, дающая представление о состоянии вопроса на данный момент: собраны патенты на существующие конструкции, проведён анализ существующих на рынке САЕ-систем, наиболее подходящих для оценки напряжённого состояния математических моделей инструментов, рассмотрена типовая технология изготовления протяжки, рассмотрены методики проектирования инструмента.

С помощью выбранной программной системы конечно-элементного анализа ANSYS проведён анализ напряжённого состояния существующей типовой конструкции сборной шестигранной протяжки во время снятия припуска, в результате которого были определены основные недостатки подобной схемы обработки.

Для устранения недостатков шестигранной протяжки были рассмотрены различные схемы съёма припуска и разработаны рекомендации по изменению формы зуба, значительно упрощающие его форму и обеспечивающие эффективную работу инструмента. Кроме того, это решение позволит упростить технологию изготовления протяжек, поскольку уменьшается объём необходимого для заготовки металла, и поскольку в одной детали уменьшается количество сложных поверхностей, требующих для изготовления точного оборудования.

Также была разработана методика расчёта оптимального числа режущих зубьев и величине подъёма на зуб, соответствующая условиям

прочности и количества зубьев относительно диаметра предварительно заготовленного отверстия.

Были разработаны формулы для определения распределения объёма припуска между различными зубьями секции и расчёта его площади, в соответствии с выбранными конструктивными решениями разработан инструмент, отвечающий требованиям надёжности и эффективности.

С целью сравнения спроектированного инструмента с существующей шестигранной протяжкой был проведён анализ напряжённого состояния новой конструкции. Результаты показали, что новая протяжка значительно эффективнее старого изделия, и поскольку величина эквивалентных напряжений, возникающих на разработанном инструменте значительно меньше, чем на существующем, срок службы новой протяжки будет больше.

Таким образом, разработанная внутренняя протяжка обладает большей прочностью и работоспособностью, чем исходная, а также обходится дешевле в изготовлении, а значит цель магистерской диссертации достигнута.

Список используемых источников

1. Araghizad A. E., Özlü E., Budak E. Geometrical Optimization of Broaching Tools by Leveling the Cutting Forces [Text] / A. E. Araghizad, E. Özlü, E. Budak – 8th International Symposium on Machining, 2017. – PP 2-3.
2. Chryssolouris George Manufacturing Systems: Theory and Practice [Text] / George Chryssolouris – Patras: Publishing University of Patras, 2005. – 603 pages.
4. Smith Graham T. Cutting tool technology [Text] / T. Smith Graham – Southampton: Publishing Southampton Solent University, 2008. – 599 pages.
5. Tian W., Wells L. J., Camelio J. Broaching Tool Degradation Characterization Based on Functional Descriptors [Text] / W. Tian, L. J. Wells, J. Camelio – Proceedings of the 2016 Manufacturing Science and Engineering Conference MSEC2016, 2016. – PP 5-6.
6. Vogtel P., Klocke F., Lung D., Terzi S. Automatic Broaching Tool Design by Technological and Geometrical Optimization [Text] / P. Vogtel, F. Klocke, D. Lung, S. Terzi – 9th CIRP Conference on Intelligent Computation in Manufacturing Engineering - CIRP ICME '14, 2014. – PP 497-498.
7. Авраменко, В. Е. Технология машиностроения. Расчет припусков и межпереходных размеров: Учеб. пособие / В. Е. Авраменко, Красноярск: ПИ СФУ, 2007. – 88 с.
8. Анурьев В.И. Справочник конструктора-машиностроителя : в 3 т. / В.И. Анурьев ; под редакцией И.Н. Жестковой. – 10-е изд., стер. – М.: Инновац. машиностроение, 2015. – Т. 1. – 927 с.
9. Балабанов А.Н. Технологичность конструкций машин. – М.: Машиностроение, 1987. – 336 с.

10. Барановский Ю.В. Режимы резания металлов / Ю.В. Барановский. - М.: Машиностроение, 1972. – 409 с.
11. Бобров В.Ф. Основы теории резания металлов / В.Ф. Бобров. – М.: Машиностроение, 1975. – 343 с.
12. ГОСТ 28442-90. Протяжки для цилиндрических, шлицевых и гранных отверстий. Технические условия. – Введ. 1991-01-01. – М. : Изд-во стандартов, 1990. – 10 с.;
13. ГОСТ 4044-70. Хвостовики круглые для протяжек. – Введ. 1971-07-01. – М. : Изд-во стандартов, 1991. – 23 с.;
14. Дерли А.Н. Проектирование инструментов. Расчёт и проектирование круглых протяжек: учебное пособие для высшего профессионального образования / А.Н. Дерли, Н.Н. Самойлов, В.И. Сотников. – Орёл: ФГБОУ ВПО «Госуниверситет-УНПК», 2011. – 69 с.
15. Краткий справочник металлиста / Орлов П.Н. [и др.]. – М.: Машиностроение, 1969. – 961 с.
16. Марков, В.В. Расчёт режимов резания. Курсовое и дипломное проектирование по технологии машиностроения: учебное пособие / В.В. Марков, А.В. Сметанников, П.И. Кискеев, Л.И. Лебедева, Д.А. Ветчинников. - Орел. Орел-ГТУ, 2010. – 112 с.
17. Металлорежущий инструмент: учебное пособие / Б.В. Родионов. – Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2007. – 118 с.
18. Основы технологии машиностроения [Электронный ресурс]: учебник / В.В. Клепиков [и др.] - Москва: ИНФРА-М, 2017. – 295 с.
19. Пат. 1060357А Союз Советских Социалистических Республик, МПК В23D 43/02. Протяжка для чистовой обработки многогранных отверстий. [Текст] / Миронов Е.А.; заявитель и патентообладатель Миронов Е.А. – 3498123/25-08 ; заявл. 11.10.1982 ; опубл. 15.12.1983, Бюл. № 46. – 3 с.
20. Пат. 2550984 Российская Федерация, МПК В23D 43/02. Деформирующе-режущая протяжка [Текст] / Батинов И.В., Петрова Е.С.; заявитель и патентообладатель Федеральное государственное бюджетное

образовательное учреждение высшего профессионального образования "Ижевский государственный технический университет имени М.Т. Калашникова". – 2013145905/02 ; заявл. 14.10.2013 ; опубл. : 20.05.2015, Бюл. № 14. – 2 с.

21. Пичкур А.О. Модульная система сборных протяжек со сменными пластинами из твердого сплава для обработки сложных поверхностей: магистерская диссертация / А.О. Пичкур. – Санкт-Петербург: СПбПУ, 2017. – 81 с.

22. Режимы резания труднообрабатываемых материалов: справочник / Гуревич Я.Л. [и др.]. – М.: Машиностроение, 1986. 240 с.

23. Резников Л.А. Проектирование протяжек для обработки цилиндрических отверстий: метод. указания / Л.А. Резников. – Тольятти: ТГУ, 2016 – 10 с.

24. Резников Л.А. Проектирование сложнопрофильного режущего инструмента : уч. пособие / Л.А. Резников. – Тольятти : Изд-во ТГУ, 2016. – 208 с.

25. Родин П.Р. Металлорежущие инструменты / П.Р. Родин. – Издательское объединение Высшая школа, 1974. – 400 с.

26. Семенченко И.И. Проектирование металлорежущих инструментов / И.И. Семенченко, В.М. Матюшин, Г.Н. Сахаров. – Машгиз, 1963. – 952 с.

27. Справочник инструментальщика / Ординарцев И.А. [и др.]. – Л.: Машиностроение. Ленингр. отд-ние, 1987. – 846 с.

28. Справочник инструментальщика-конструктора / В.И. Климов [и др.]. – М.; Свердловск : Машгиз, 1958. – 610 с.

29. Справочник технолога-машиностроителя : в 2-х т. т. 2 / Под ред. А.Г. Косиловой и Р.К. Мещерякова. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1985. – 496 с.

30. Технология и свойства спечённых твёрдых сплавов и изделий из них; учебное пособие для вузов / Панов В.С., Чувилин А.М. – М.: МИСИС, 2001. – 428 с.

