

Федеральное государственное автономное  
образовательное учреждение  
высшего образования  
«СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Политехнический институт  
Кафедра Материаловедение и технологии обработки материалов

УТВЕРЖДАЮ  
Заведующий кафедрой  
\_\_\_\_\_ В.И. Темных  
(подпись)  
« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2017 г.

## БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА

**Направление 22.03.01 Материаловедение и технологии материалов  
Профиль 22.03.01.07 Материаловедение и технологии материалов  
в машиностроении**

**Материалы, технология изготовления и поверхностная закалка  
тяжелонагруженных зубчатых колёс**

Научный руководитель

\_\_\_\_\_  
(подпись, дата)

А.М. Токмин

Выпускник

\_\_\_\_\_  
(подпись, дата)

П.Н. Шестернев

Нормоконтролер

\_\_\_\_\_  
(подпись, дата)

Л.А. Свечникова

Красноярск 2017

## СОДЕРЖАНИЕ

Введение.....	3
1 Анализ литературы по проблеме .....	5
1.1   Общие сведения о зубчатых колёсах.....	5
1.2   Чертёж изделия и напряжения в зубе .....	10
1.3   Требования к изделию и анализ условий эксплуатации. ....	13
1.4   Технология изготовления зубчатых колес .....	17
1.5   Анализ видов термообработки зубчатых колес .....	23
1.6 Анализ материалов, применяемых для изготовления зубчатых колес. ....	26
2 Методики исследования зубьев зубчатых колёс.....	34
2.1 Методика поверхностной закалки токами высокой частоты (ТВЧ).....	34
2.2 Методика приготовления шлифов .....	35
2.3 Выявление микроструктуры образца .....	35
2.4 Традиционный метод измерения твёрдости образца. ....	36
2.5 Измерение микротвёрдости образца.....	37
2.6 Методика проведения макроанализа. ....	38
2.7 Методика проведения микроанализа .....	39
3 Результаты исследования тяжелонагруженных зубчатых колёс .....	40
3.1 Анализ дефектов реальных зубчатых колёс.....	40
3.2. Основные сведения о поверхностной индукционной закалки.....	49
3.3 Индукционная закалка модели зубчатого венца .....	61
Заключение .....	68
Список используемых источников.....	69

## ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время в машиностроении повышение технико-экономических показателей зубчатых передач связано с комплексным решением сложной задачи, включающей в себя анализ условий эксплуатации, основных причин разрушений и выработка на основе этих данных требований к зубчатым колёсам. Исходя из этих требований, производится выбор оптимальных материалов, технологий изготовления и упрочнения.

Зубчатое колесо – основная деталь, применяемая в механизмах зубчатых передач. Основной её функцией является передача вращательных движений между валами в виду зацепления с зубьями соседней шестерни.

Впервые простейшие зубчатые колёса были изготовлены и приведены в действие около 3000 лет назад. В Древней Греции использовались деревянные и металлические шестерни с клинообразными зубьями. Позже, в Римской Империи, деревянные шестерни стали применять в работе зерновых мельниц, а металлические шестерни – во многих примитивных механизмах.

В эпоху Средневековья в водяных мельницах повсеместно применялись деревянные, и только в Швеции, каменные шестерни. Водяные мельницы являлись движущей силой в промышленности и в 18–19 веках.

Деревянные зубчатые передачи масштабно были распространены в 18 веке и применялись во всем мире на различных производствах (например, на ткацких фабриках, сталелитейных заводах и др.). Во второй половине 19-го века, в эпоху активного развития электроэнергетики, железнодорожных путей и производств, широкое использование электрических моторов и паровых двигателей привело к увеличению спроса на качественные металлические шестерни.

В начальной половине 20-го века появились быстро вращающиеся турбины. Для них были необходимы более надежные зубчатые передачи, чем те, что применялись для медленно вращающихся паровых турбин поршневого

типа. Однако наибольший спрос на шестерни возник, когда в начале 20-го века активно стали производиться автомобили и грузовики с моторами.

В наше время шестерни производят под автоматизированным и компьютерным контролем, используется автоматизированная система числового программного управления (ЧПУ). Производительность существенно увеличилась, выросло и качество продукции. А развитие технологий в отношении состава используемых материалов, методов изготовления и видов упрочняющих термических обработок дало возможность повысить износостойкость и достигнуть увеличения срока службы.

Целью данной работы является оптимально правильный подбор материала, метода изготовления и влияние упрочняющей термической обработки, в частности закалки ТВЧ на структуру и свойства тяжелонагруженного зубчатого колеса. Были поставлены следующие задачи:

1 Провести анализ условий эксплуатации изделия, выбора материала и технологий получения изделия.

2 Провести анализ причин разрушения зубчатых колёс в реальных условиях эксплуатации.

3 Разработать рекомендации по выбору материала и технологии упрочнения зубчатых колёс, с целью получения оптимального сочетания заданных эксплуатационных характеристик.

4 Изучить кинетику индукционного нагрева зубчатых колёс с целью разработки оптимальной технологии упрочнения.

# **1 Анализ литературы по проблеме**

## **1.1 Общие сведения о зубчатых колёсах**

Зубчатое колесо – основная деталь зубчатой передачи, представляющая собой диск с зубьями, входящий в зацепление с зубьями другого колеса. Зубчатые колеса служат для передачи вращательного движения между валами, которые параллельны или перекрещиваются друг с другом. Зубчатые колеса используют как для передачи больших крутящих моментов с заданным изменением частоты вращения валов (силовые передачи), так и для точного взаимного ориентирования валов (кинематические передачи).

Для зубчатых колес, находящихся в кинематических передачах, основным требованием является высокая геометрическая точность при сложной форме рабочих поверхностей, для силовых же зубчатых колес (тяжелонагруженных) передач – высокая прочность, обеспечивающая передаче возможность производить передачу больших крутящих моментов при малых конструктивных размерах детали.

Классификация зубчатых колёс происходит следующим образом.

По виду зацепления зубьев зубчатые колёса бывают:

- внешнее зацепление – используются для преобразования вращательного движения с изменением его направления;
- внутреннее зацепление – применяется в тех случаях, когда требуется преобразовывать вращательное движение, но при этом сохранить его направления. По сравнению с внешним зацеплением передача имеет меньшие габаритные размеры, больший коэффициент перекрытия и повышенную прочность, но гораздо сложнее в изготовлении [1];
- реечное зацепление – используется для преобразования вращательного движения в поступательное, и наоборот.

Данные виды зубчатых передач представлены на рисунке 1.

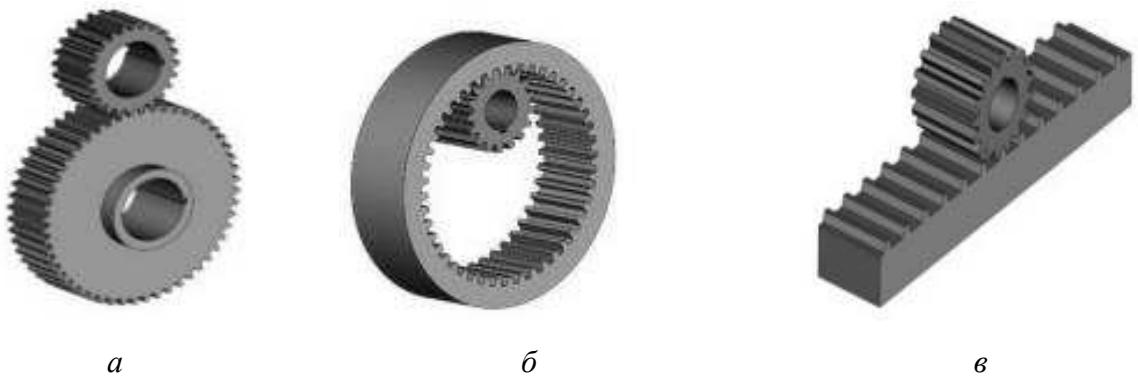


Рисунок 1 – Зубчатые колёса по виду зацепления: *а* – внешнее; *б* – внутреннее; *в* – реечное

По взаимному расположению осей валов:

- цилиндрические передачи с параллельными осями валов;
- конические передачи с пересекающимися осями;
- передачи со скрещивающимися осями.

Данные виды зубчатых передач представлены на рисунке 2.

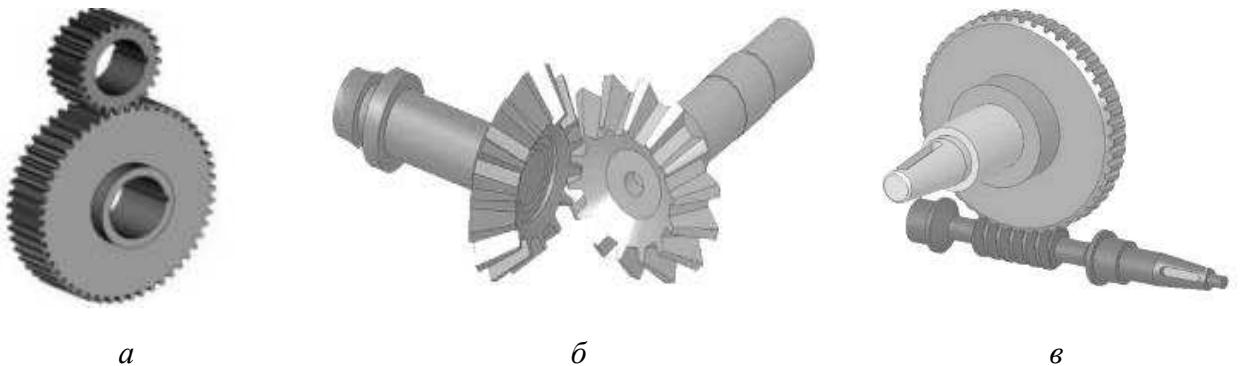


Рисунок 2 – Зубчатые колёса по расположению осей валов: *а* – с параллельными осями; *б* – с пересекающимися осями; *в* – со скрещивающимися осями

По расположению зубьев относительно образующей обода колеса:

**Прямозубые шестерни** – наиболее широко задействованный тип зубчатых колёс (рис. 3). Зубья расположены в радиальных плоскостях, линия контакта зубьев пары данных колес параллельна оси вращения, как и оси обеих зубчатых колес (шестеренок) располагаются строго параллельно. Они находят

широкое использование во многих отраслях машиностроения, в частности в металлообрабатывающих станках, автомобилях, тракторах, сельскохозяйственных машинах, в приборостроении, часовой промышленности и др. Их применяют для передачи мощностей от долей до десятков тысяч киловатт при окружных скоростях достигающих 150 м/с и передаточных числах до нескольких сотен и даже тысяч, с диаметром колёс от долей миллиметра до 6 м и более.



Рисунок 3 – Прямозубая шестерня

**Косозубые шестерни** – это модифицированная версия прямозубых зубчатых колёс (рис. 4). Зубья, в данном случае, расположены под углом к оси вращения. Зацепление их происходит тише и мягче, чем у прямозубых. Они используются как в малошумных передачах, так и в тех которые требуют передачи большого крутящего момента на высоких скоростях.



Рисунок 4 – Косозубая шестерня

Недостатком косозубой шестерни является возникающая в зацеплении дополнительная осевая сила, отсутствующая у прямозубых колёс [1].

Так же к недостаткам данного типа шестерен можно отнести: увеличенную площадь соприкосновения зубьев, что вызывает большее трение и

нагрев детали, а в следствии: потерю мощностей и дополнительное использование смазочных материалов.

Оевые механические силы обеих половин шевронного колеса взаимно компенсируются, в связи с чем, нет необходимости использовать упорные подшипники для установки валов. Шевронная передача является самоустанавливающейся в осевом направлении, в результате чего, в редукторах с шевронными колесами один из валов устанавливают на подшипниках с короткими цилиндрическими роликами – плавающих опорах. На рисунке 5 представлена шевронная шестерня.



Рисунок 5 – Шевронная шестерня

**Винтовые шестерни** – имеют форму цилиндра, зубья которого расположены по винтовой линии. Эти шестерни применяются на валах, не имеющих пересечений, и расположенных перпендикулярно друг друга, угол между которыми  $90^\circ$ . На рисунке 6 показана винтова шестерня.



Рисунок 6 – Винтова шестерня

**Круговые шестерни** – имеют линию зубьев в виде окружности, за счет этого контакт в передаче осуществляется в одной точке на линии зацепления, которая расположена параллельно осям шестерен (рис. 7). Передача с круговыми зубьями («Передача Новикова») значительно превосходит по ходовым качествам косозубую передачу: имеет высокую плавность хода, бесшумность, повышенную нагрузочную способность зацепления, но при одинаковых условиях их ресурс работы и КПД ниже. К прочему, производство этих шестерен значительно сложнее. В связи с этим использование данных колёс ограничено.



Рисунок 7 – Круговая шестерня

**Конические шестерни** – включают в себя различные виды, отличающиеся по форме линии зубьев: прямые, криволинейные, тангенциальные, а также с круговыми зубьями. Применяются данные передачи в механизмах, где требуется передать вращение с одного вала на другой, оси которых пересекаются. Примером могут служить автомобильный дифференциал, передача момента от двигателя к колесам. Ниже представлена коническая шестерня (рис.8).



Рисунок 8 – Коническая шестерня

Из всего списка вышеперечисленных зубчатых колёс для дальнейшего рассмотрения была выбрана цилиндрическая прямозубая зубчатая передаче.

## 1.2 Чертёж изделия и напряжения в зубе

Помимо множества различных форм, видов зацеплений и взаимных расположений зубчатых колёс, они так же отличаются по модулям и размерам.

Модуль зубчатого колеса  $m$  (измеряется в мм) представляет собой длину, приходящуюся по диаметру делительной окружности на один зуб колеса. Численно модуль равен:

где  $m$  – модуль зубчатого колеса;

$d$  – диаметр делительной окружности;

$z$  – количество зубьев;

*t* – шаг в мм.

В таблице 1 представлены различные модули зубчатых колёс.

Таблица 1 – Модули цилиндрических и конических зубчатых колёс

1-й ряд	2-й ряд	1-й ряд	2-й ряд
0,05	0,055	2,5	2,75
0,06	0,07	3	3,5
0,08	0,09	4	4,5
0,1	0,11	5	5,5
0,12	0,14	6	7
0,15	0,18	8	9
0,2	0,22	10	11
0,25	0,28	12	14
0,3	0,35	16	18
0,4	0,45	20	22
0,5	0,55	25	28

0,6	0,7	32	36
-----	-----	----	----

Продолжение таблицы 1

0,8	0,9	40	45
1	1,125	50	55
1,25	1,375	60	70
1,5	1,75	80	90

Размеры зубчатых колёс могут быть самыми разнообразными – от миллиметров, применяемых в часах и точных приборах, до крупных колёс, размерами в несколько метров, применяемых в машиностроении, судостроении, и так далее.

Любое зубчатое колесо имеет, как правило, 3 основные части: зубчатый венец, обод и ступица. На рисунке 9 представлены конструктивные элементы, и основные параметры цилиндрического зубчатого колеса.

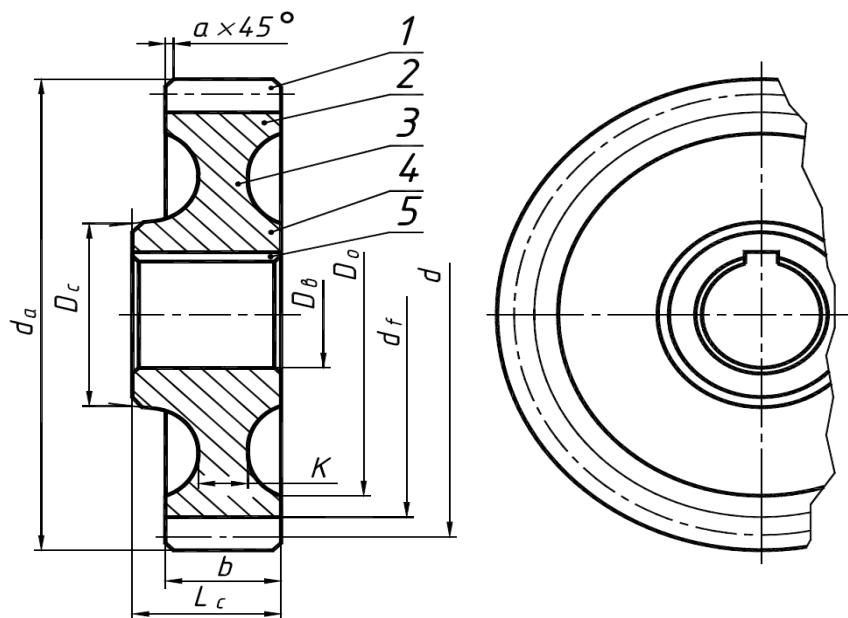


Рисунок 9 – Конструктивные элементы зубчатого колеса: 1 – зубчатый венец; 2 – обод; 3 – диск; 4 – ступица; 5 – шпоночный паз;  $da$  – наружный диаметр;  $d$  – делительный диаметр;  $df$  – диаметр впадин;  $Do$  – диаметр обода;  $Dc$  – диаметр ступицы;  $Dv$  – диаметр вала;  $K$  – толщина диска;  $b$  – ширина зубчатого венца;  $Lc$  – длина ступицы;  $a$  – фаски зубьев

Под действием внешних сил в зубе появляются  $\sigma_{из}$  (напряжения изгиба),  $\sigma_{сж}$  (напряжения сжатия), и  $\sigma_h$  (напряжения контактные). Эти напряжения не постоянны, а цикличны. Они изменяются во времени по определенному прерывистому отнулевому циклу. Время действия  $\sigma_{из}$  за один оборот колеса равно продолжительности зацепления одного зуба. Напряжения  $\sigma_h$  продолжаются ещё меньше. Это время равняется продолжительности нахождения в зацеплении данной точки поверхности зуба, с учётом зоны распространения контактных напряжений (рис. 10).

Переменные напряжения являются основной причиной усталостного разрушения зубьев: поломки зубьев от напряжений изгиба или выкрашивание контактной поверхности напряжений. С контактными напряжениями и трением в зацеплении связаны также износ, заедание и другие виды повреждения поверхностей зубьев.

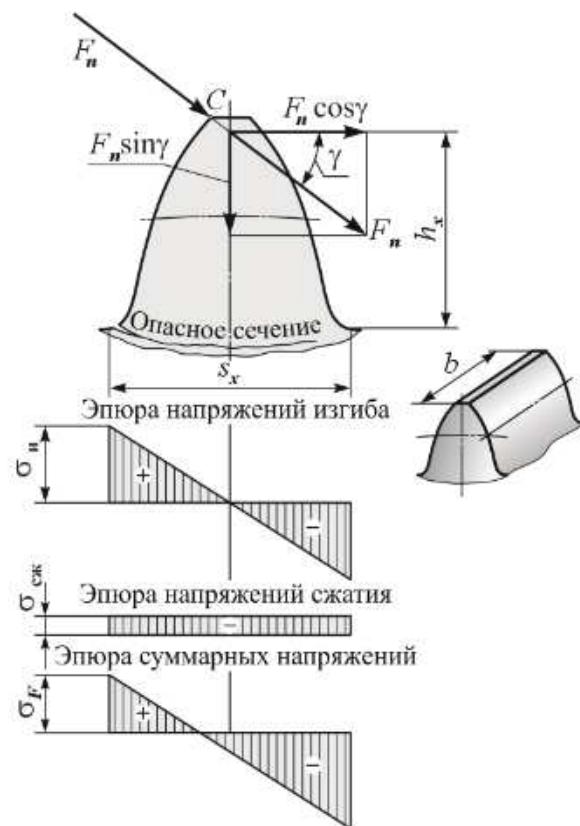


Рисунок 10 – Схема напряжений в зубе при зацеплении

### **1.3 Требования к изделию и анализ условий эксплуатации**

В основном зубчатые колёса применяются в многопарных зубчатых передачах. Данные передачи устанавливают в разного рода редукторах, двигателях, лебёдках, и иных механизмах, где требуется передача больших крутящих моментов с заданным изменением частоты вращения валов.

В процессе изучения требований к изделию будут рассмотрены тяжелонагруженные детали, работающие в тяжелонагруженных передачах.

Тяжелонагруженная деталь - особая группа деталей, испытывающих высокие нагрузки циклического и знакопеременного характера, приближенным к значениям предела текучести материала.

Такого рода детали, работая в различных условиях, подвергаются внешним воздействиям, которые, чаще всего, негативно влияют на работу передачи.

Так например, редуктора могут работать при больших перепадах температур ( от + 100 до – 50 ° С), по этому зубчатое колесо, в данном случае, должно обладать низким порогом хладноломкости.

Так же зачастую в машиностроении встречается такой вредный фактор как коррозия. По этому, при выборе материала для изготовления зубчатого колеса нужно обратить особое внимание на то, чтобы деталь не подвергалась коррозии.

При работе механизмов в машиностроении, в особенности массивных тяжелонагруженных узлов, не избежать воздействия ударных и знакопеременных нагрузок.

При учёте всех вышеперечисленных факторов основными требованиями к тяжелонагруженному зубчатому колесу являются:

- высокий предел прочности;
- высокий предел текучести;
- высокая ударная вязкость сердцевины;

- высокий предел выносливости;
- износостойкость контактных поверхностей;
- высокая твёрдость поверхности зуба;
- низкая хладноломкость;
- сохранение формы и размеров контактных поверхностей детали;
- коррозионная стойкость материала.

**Виды разрушения зуба.** При анализе условий работы зубчатых колёс стоит упомянуть о такой проблеме как их выход из строя. Частой причиной выхода из строя зубчатой передачи является разрушение зубьев. Определяют 4 основные вида разрушения:

- разрушение по основанию (в виду усталостного разрушения);
- усталостное выкрашивание рабочей поверхности зуба, образование питтингов (контактная усталость);
- абразивный износ зубьев;
- задир зубьев .

**Разрушение по основанию и поломка зуба.** Наиболее серьёзный вид разрушения (рис. 11).

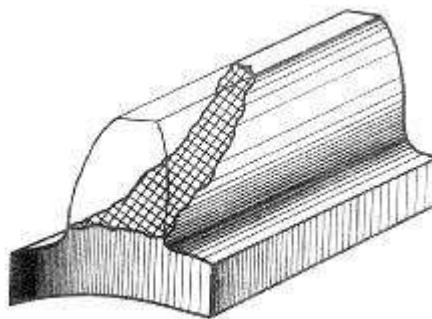


Рисунок 11 – Схема разрушения по основанию зуба

Оно возникает в зубе при деформации изгиба, благодаря переменным напряжениям. Поломка зубьев может происходить в результате больших перегрузок ударного и статического характера, а также усталостного разрушения от действия переменчивых нагрузок в течение долгого времени.

Усталостные трещины образуются у основания зуба ввиду неучтённых расчётами перегрузок. Перенапряжение зубьев способно вызывать концентрацию нагрузок по длине зуба ввиду неправильного монтажа (непараллельности валов), а также вследствие грубой обработки поверхности впадин зубьев, заклинивания зубьев при нагреве передачи и недостаточных боковых зазорах. Как правило, наблюдаются отколы углов зубьев, связанные с концентрацией нагрузки.

**Усталостное выкрашивание рабочей поверхности зуба.** Является наиболее серьёзным и распространённым дефектом поверхности зубьев даже для закрытых передач (рис.12).

На рабочих поверхностях появляются небольшие углубления, которые затем превращаются в раковины. Выкрашивание носит усталостный характер и вызвано контактными напряжениями, которые изменяются по отнулевому пульсирующему циклу. Выкрашивание приводит к повышению контактного давления и нарушению работы передачи.

Для предупреждения выкрашивания необходимо повышать твёрдость материала термообработкой, либо повышать точность передачи [2].

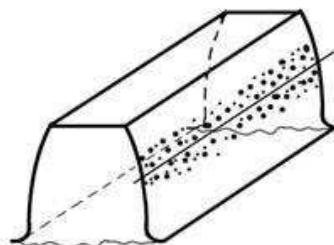


Рисунок 12 – Схема усталостного выкрашивания рабочей поверхности зуба

**Абразивный износ.** Является основной причиной выхода из строя передач при плохой смазке (рис. 13). К таким передачам относятся, прежде всего, открытые передачи, а так же закрытые, но недостаточно защищенные от загрязнения абразивными частицами. У изношенной передачи увеличиваются

зазоры в зацеплении, появляется шум (удары), возрастают динамические нагрузки. В то же время прочность изношенного зуба понижается вследствие уменьшения его поперечного сечения.

Основные меры предупреждения износа – повышение твёрдости поверхности зубьев, защита от загрязнений, применение масел с повышенной вязкостью [3].

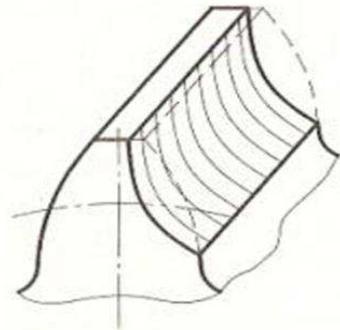


Рисунок 13 – Схема абразивного износа зуба

**Задир зубьев.** Появляется при нарушении сплошности масляной плёнки, входе появления металлического контакта между рабочими поверхностями зубьев, сопровождается нагревом металла вплоть до сваривания микрообъёмов металла (рис.14).



Рисунок 14 Схема задира зуба

Данный дефект приводит к появлению борозд, расположенных на рабочей поверхности зубьев, перпендикулярно оси колеса. При загрязнённой

смазке твёрдые абразивные частицы, попадающие в зону контакта сопряжённых поверхностей, под давлением внедряются в тело зубьев, что вызывает дополнительное истирание поверхности.

#### **1.4 Технология изготовления зубчатых колес**

Выбор метода изготовления заготовки зависит от формы и размеров детали, её материала и назначения, объёмов производства и т.д. Лучшим методом является тот, при котором заготовки получаются более дешёвыми, включая стоимость последующей механической обработки, и имеют требуемое качество. Важнейшим фактором при выборе метода изготовления заготовок является экономия металла. Значительное сокращение расхода металла достигается при использовании технологических процессов малоотходного производства заготовок, размеры которых максимально приближаются к размерам деталей [4].

В массовом производстве заготовки диаметром до 175 мм изготавливают на горизонтально – ковочных машинах в разъемных штампах; данный способ особенно выгоден, когда контур заготовки имеет сложный профиль или выемку между венцами.

Стальные нагруженные зубчатые колёса диаметром не более 50 мм изготавливаются из колибрированных прутков. Заготовки червяков диаметром более 50 мм получают штампованием, а заготовки червячных колес – литьем.

Припуски на заготовках: на ковочных молотах – 5мм; штамповочных молотах – 3–4 мм; на горизонтально – ковочных машинах – 2–3 мм на сторону [5].

В крупносерийном и массовом производстве к числу основных методов изготовления заготовок зубчатых колёс относятся: литьё, поперечно – клиновая прокатка ступенчатых валов, горячая высадка на многопозиционных автоматах,

холодная штамповка, порошковая металлургия, горячее накатывание и горячая штамповка заготовок с зубьями, вырубка [4].

Остановимся подробнее на каждой из операций.

#### 1.4.1 Литьё

Литьё является традиционным методом изготовления зубчатых колёс без снятия стружки. Точность таких колёс в большинстве случаев была недостаточной. Чтобы максимально приблизить форму и размеры заготовки к форме и размерам готовой детали, разработаны более совершенные и производительные методы литья заготовок.

Литьё в кокиль применяют для изготовления заготовок прямозубых цилиндрических колёс, зубчатых секторов, конических колёс с прямыми зубьями и др. отливки получают путём разливания жидкого металла в кокили, изготовленные из стали или графита. В качестве литейного материала используют преимущественно чугун с шаровидным и пластинчатым графитом, а так же мед и медные сплавы. Зубчатые колёса, полученные литьём в кокиль без дополнительной обработки зубьев, применяют в механизмах и приводах, работающих при низких окружных скоростях.

Литьё под давлением применяют для изготовления зубчатых колёс из цветных металлов. В этом случае жидкий металл под высоким давлением и при высокой скорости заливается в закаленные стальные формы. Этим методом можно изготавливать зубчатые колёса с внешним и внутренним зацеплением. Для точных зубчатых колёс, отлитых под давлением из тяжёлых металлов, в большинстве случаев не требуется дополнительная обработка зубьев. А для деталей из лёгких металлов – дополнительная обработка зубьев необходима, для чего на боковых поверхностях зубьев оставляют припуск.

Литьё по выплавляемым моделям применяют для изготовления заготовок и зубчатых колёс сложной формы из стали и цветных металлов. Литьё выполняют по высокоточным керамическим моделям, которые точно

соответствуют контуру обрабатываемой заготовки. Этот метод изготовления обеспечивает высокую точность поверхности [4].

### 1.4.2 Прокатка, высадка, штамповка и вырубка.

**Поперечно – клиновая прокатка** круглыми роликами или плоскими плашками (рис.15) применяется для изготовления заготовок валов ступенчатой формы. В процессе обработки заготовка 2 автоматически вращается между двумя круглыми роликами 1,3, установленными на параллельных осях. На поверхности роликов установлены клиновые копиры 4, которые во время вращения постепенно внедряются в заготовку и формируют требуемую форму заготовки. За один оборот роликов заготовка полностью обрабатывается. Производительность прокатных станов составляет 360–900 шт/ч [4].

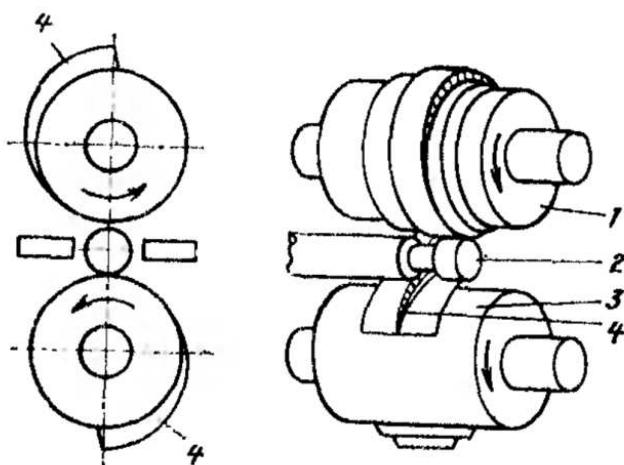


Рисунок 15 – Схема поперечно – клиновой прокатки заготовок круглыми роликами

**Горячая высадка** на многопозиционных автоматах применяется для изготовления заготовок дисков, подшипниковых колец, зубчатых колёс и др. Технологический процесс высадки полностью автоматизирован. В качестве исходного материала применяют горячекатаный пруток.

Прутки автоматически подаются со стеллажа в индуктор, где они нагреваются до температуры ковки. Ролики механизма подачи подают нагретые прутки в горизонтальный горячештамповый автомат. На позиции отрезки от прутка отрезается мерная заготовка и подаётся к матрицам.

На первой позиции производится осадка заготовки для получения хорошего распределения материала и удаления окалины, на второй – производится предварительное, а на третьей – окончательное формообразование. Четвёртая позиция обычно используется для прошивки отверстия. Формообразование производится в закрытых штампах, поэтому заготовки не имеют заусенцев и штамповочных уклонов, они имеют чистую поверхность, хорошие механические свойства, высокую точность и припуски на механическую обработку [4].

*Холодная объёмная штамповка* применяется в машиностроении для изготовлении крепежных, а так же более сложных и крупных деталей. Основные преимущества метода: высокая производительность, высокий коэффициент использования металла (близок к единице), малая трудоёмкость механической обработки. Этим методом получают заготовки зубчатых колёс, а так же конических и цилиндрических с прямыми зубьями.

Холодным выдавливанием рекомендуется изготавливать детали из стали с содержанием углерода 0,15–0,40 %, при содержании углерода в сталях выше 0,45 % повышается прочность материала и снижается период стойкости инструмента, такие стали выдавливают с подогревом.

Точная вырубка используется для окончательного изготовления плоских деталей типа шайб, рычагов, крышек, зубчатых колёс, зубчатых секторов, которые нашли применение в автомобилях, самолётах, тракторах, и других видах техники. Этот высокопроизводительный метод позволяет за один рабочий цикл изготовить несколько деталей сложной геометрической формы высокого качества без дополнительной механической обработки.

Основным материалом для точной вырубки служит сталь, также применяют медь, алюминий и их сплавы. Материал должен иметь низкий предел

прочности на разрыв и предел текучести, а также высокие относительное удлинение и относительное сжатие при разрыве [4].

### **1.4.3. Порошковая металлургия**

Этот метод предназначен для производства разнообразных симметричных заготовок конических зубчатых колёс, цилиндрических зубчатых колёс для насосов, предохранительных муфт и др. Материалом обычно служат железные порошки с добавлением порошков легирующих элементов – никеля, хрома, молибдена и так далее. Порошковая смесь тщательно смешивается, точно взвешивается, затем прессуется в холодном состоянии в закрытом штампе под давлением. После чего данная заготовка подвергается спеканию в печах, при температурах близких к плавлению основного металла. Затем формованная заготовка подвергается горячему прессованию в закрытом штампе. Охлаждение же детали происходит в защитном газе. В зависимости от назначения зубчатые колёса подвергаются дополнительной механической и термической обработке.

Из всех вышеперечисленных технологий изготовления тяжелонагруженных колёс, преимущественно используется следующий маршрут изготовления колеса: первой операцией является отрезка от полуфабриката болванок нужных размеров. Затем, для улучшения структуры материала нашу болванку осаживают. Эта операция помогает нам из вытянутых вдоль всей болванки волокон сделать их более скруглёнными в местах деформации заготовки, что позволяет увеличить прочность в тех зонах которые были деформированы. После чего идёт накатка зубьев шестерни, и далее механическая, а затем и термическая обработка. К механической обработке ,в данном случае, могут относиться нарезание зубьев модульными фрезами, долбяками , удаление различных заусенцев и неровностей [4].

#### 1.4.4. Горячая накатка зубчатых колёс

Накатывание зубчатых поверхностей имеет большие преимущества перед способами обработки резанием: повышает производительность в 5–30 раз; увеличивает износостойкость и прочность зубьев; значительно уменьшает отходы металла и др. Различают горячее и холодное накатывание. Горячее накатывание применяют для профилей с модулем больше 2 мм; холодное накатывание рекомендуется для мелкомодульных колес с модулем до 1,5...2 мм.

Может применяться и комбинированное накатывание для средних и крупных модулей (основная пластическая деформация проводится в горячем состоянии, а окончательное профилирование – в холодном).

Горячее накатывание производится с радиальной и с продольной подачей. Схема накатки с продольной подачей аналогична холодному накатыванию [6].

Схема накатывания с радиальным движением подачи приведена ниже на рисунке 16.

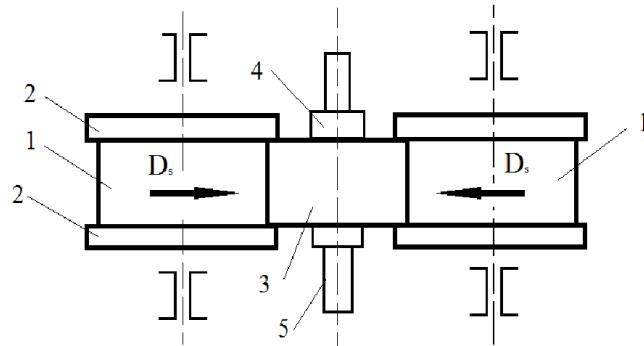


Рисунок 16 – Схема горячего накатывания зубчатых колёс: 1 – накатники; 2 – реборды; 3 – заготовка; 4 – переходная втулка; 5 – оправка

Перед накатыванием заготовку нагревают до 1000...1200 ° С за 20...30 с до накатывания, затем устанавливают на оправку специального станка и производят накатывание. Вращающимися накатниками. Штучное время накатывания зубьев на заготовках зубчатых колес составляет 30с ... 2 мин в зависимости от модуля (соответственно 2...5 мм).

Для тяжелонагруженных зубчатых колёс основными технологиями изготовления являются поперечно – клиновая прокатка ступенчатых валов, горячая высадка на многопозиционных автоматах, порошковая металлургия, горячее накатывание и горячая штамповка заготовок с зубьями.

В данной работе основным методом изготовления тяжелонагруженного зубчатого колеса является технология горячего накатывания.

## **1.5 Анализ видов термообработки зубчатых колес**

Основными видами упрочняющей обработки тяжелонагруженных зубчатых колёс – это объёмная термическая обработка, термомеханическая обработка и термическая или химико-термическая обработка для упрочнения поверхностного слоя детали.

***Объёмная термическая обработка*** – процесс, в основном состоящий из таких операций как закалка и соответствующий отпуск. Объемная закалка – наиболее простой способ получения высокой твердости зубьев. Она включает в себя нагрев колеса до температуры, обеспечивающей фазовое превращение, выдержку при этой температуре для процесса гомогенизации и ускоренное охлаждение. Данный вид термообработки применяют для углеродистых и легированных сталей с содержанием углерода 0,35...0,5 % (стали 45, 40Х, 40ХН и т. д.). Достигается твердость поверхности зuba 45...55 HRC. Зуб прокаливается по всему объему и не сохраняет вязкую сердцевину. Недостатками объемной закалки являются: значительное коробление зубьев и необходимость последующих отделочных операций; низкое сопротивление ударным нагрузкам. Применяют в основном для малоответственных передач.

***Термомеханическая обработка*** – это технологическая операция, совмещающая в себе пластическую деформацию сплава и его закалку в одном цикле нагрева и охлаждения. Пластическая деформация приводит к резкому увеличению количества физических дефектов кристаллического строения стали

(её наклёпу), что оказывает существенное влияние на формирующуюся структуру при его последующей закалке и отпуске. Существует несколько технологических вариантов термомеханической обработки, но все они объединяются тем, что в результате пластической деформации аустенит претерпевает изменения, которые в какой – то мере передаются мартенситу.

В результате термомеханической обработки и последующего низкого отпуска резко повышается прочность стали по сравнению с обычной термообработкой, при этом сохраняется высокая пластичность [10].

**Химико-термическая обработка** – это технологический процесс, заключающийся в поверхностном насыщении стали каким либо химическим элементом. Основными видами ХТО являются цементация, азотирование, нитроцементация, цианирование и т.д. Далее подробно рассмотрим некоторые из них.

**Цементация** – технологический процесс диффузионного насыщения поверхностного слоя углеродом. Обычно после цементации сталь подвергают закалке или низкому отпуску [11].

Обеспечивает поверхностную твердость зуба 56...62 HRC. Применяют для низкоуглеродистых сталей с содержанием углерода до 0,3 (Сталь 20, 20Х, 12ХНЗА, 20ХНМ). Глубина цементации составляет 0,1...0,15 от толщины зуба, но не более 1,5... 2 мм. Закалка после цементации приводит к короблению зуба, и потому требуются отделочные операции.

**Азотирование** – процесс диффузионного насыщения азотом поверхностной зоны деталей. Азотирование применяют для повышения износостойкости и предела выносливости деталей машин [11].

Обеспечивает особо высокую твердость (до 70 HRC). Зубья после азотирования не подвергают закалке, имеют незначительное искажение формы и не требуют дополнительных доводочных операций. Применяют для низкоуглеродистых сталей с содержанием углерода до 0,3 % (сталь 20, 20Х, 12ХНЗА, 20ХНМ). Для азотируемых колес применяют стали, легированные хромом, никелем, молибденом, алюминием, например, 38ХМЮА, 35ХЮА.

Основным недостатком азотируемых колес является малая толщина упрочненного слоя 0,2...0,6 мм, не позволяющая применять их при ударных нагрузках, высоких контактных напряжениях и при работе с абразивным изнашиванием, из-за опасности истирания упрочненного слоя и быстрого выхода передачи из строя.

**Нитроцементация** – одновременное насыщение поверхностного слоя углеродом и азотом с последующей закалкой. Обеспечивает поверхностную твердость зуба 58...64 HRC. Применяют для среднеуглеродистых сталей (например, 40Х, 25ХГТ). Толщина упрочненного слоя составляет 0,7 – 0,9 мм. Искажения зубьев существенно меньше, чем при цементации, не требуются дополнительные доводочные операции.

После нитроцементации поверхность стали приобретает синий, а иногда красноватый оттенок. Нитроцементацию выполняют после отпуска и шлифования или перед закалкой [12].

Так как тяжелонагруженная зубчатая передача должна обладать как высокими прочностными характеристиками, высокой твёрдостью поверхностей зубьев, так же она должна обладать вязкой сердцевиной. Для формирования таких характеристик наилучшим образом подходит индукционная закалка ТВЧ.

**Закалка токами высокой частоты (ТВЧ)** – вид поверхностного упрочнения деталей, основанный на генерировании индукционных токов в поверхностных слоях металла, которые впоследствии и вызывают его нагрев. Особенностью нагрева ТВЧ является то, что индукируемые в стали вихревые токи распределяются по сечению детали не равномерно, а оттесняются к поверхности. Неравномерное распределение вихревых токов приводит к неравномерному ее нагреву: поверхностные слои очень быстро нагреваются до высоких температур, а сердцевина или совсем не нагревается или нагревается незначительно благодаря теплопроводности стали.

Основное условие правильного и по возможности равномерного индукционного нагрева – создание для каждой детали индуктора

соответствующей формы и очертаний. Индуктор изготавливают в виде петли или втика из трубок красной меди [13].

Данный вид закалки применяется для деталей, которые должны обладать высокой поверхностной твёрдостью, износостойкостью и в то же время вязкой сердцевиной.

Преимущества метода закалки ТВЧ:

- большая экономичность, нет необходимости нагревать все изделие;
- более высокие механические свойства;
- отсутствие обезуглероживания и окисления поверхности детали;
- снижение брака по короблению и образованию закалочных трещин;
- возможность автоматизации процесса;
- использование закалки ТВЧ позволяет заменить легированные стали на более дешевые – углеродистые;
- позволяет проводить закалку отдельных участков детали.

Основные недостатки метода:

- высокая стоимость индукционных установок и индукторов;
- применение целесообразно лишь серийном и массовом производстве.

## **1.6 Анализ материалов, применяемых для изготовления зубчатых колес**

Выбор материала зубчатых колёс зависит от:

- назначения передачи;
- передаваемой мощности;
- окружной скорости;
- точности изготовления;
- среды эксплуатации.

Материал для изготовления зубчатых колёс определяется их условиями эксплуатации и требований.

В зависимости от служебного назначения зубчатые колёса изготавливают из углеродистых, легированных сталей, чугуна, пластических масс [7].

Относительно твердости рабочих поверхностей зубьев различают стальные зубчатые колеса:

- твердостью менее либо равной 350НВ . Чистовое нарезание зубьев производят после

термообработки (нормализации, улучшения). При этом получают довольно высокую точность изготовления зубьев без применения отделочных операций (шлифовки, притирки и др.). Стальные зубья твердостью менее либо равной 350НВ хорошо прирабатываются и воспринимают динамические нагрузки. Зубчатые колеса твердостью менее либо равной 350НВ применяют в мало- и средненагруженных передачах, а также в передачах с большими колесами, термическая обработка которых затруднена (в основном в мелкосерийном и единичном производстве). Их обычно изготавливают из качественных углеродистых сталей 35, 40, 45, 50 и легированных сталей 35Х, 40Х, 40ХН и др.

– твердостью более 350НВ (в этом случае используют шкалу Роквелла (HRC), 10НВ примерно равно 1HRC). Стальные зубья твердостью более 350НВ плохо прирабатываются и нуждаются в высокой точности изготовления.

Нарезание зубьев производят до термической обработки (вследствие высокой твердости заготовок после ТО (закалки ТВЧ, цементирования, азотирования, нитроцементации)). Причем некоторые виды термообработки вызывают коробление зубьев, поэтому для исправления формы зубьев применяют отделочные операции. При твердости колес не более 45HRC требуется обеспечивать разность твердости рабочих поверхностей зубьев шестерни и колеса. Зубчатые колеса твердостью более либо равной 350НВ применяют средне и тяжелонагруженных передачах при больших окружных скоростях (в основном в крупносерийном и массовом производстве). Их обычно изготавливают из средне- и малоуглеродистых легированных Сталей 40Х, 40ХН, 12ХН3А, 15Х, 18ХГТ, 38Х2МЮА и др.

Помимо сталей зубчатые колеса выполняют из чугунов и пластмасс.

**Чугуны.** Чугуны обладают хорошими литейными качествами и являются наиболее дешёвым материалом. Колёса, выполненные из чугуна, хорошо прирабатываются, поэтому шум, возникающий при работе передачи, меньше, чем у передач со стальными колёсами. Передачи с чугунными колёсами более надежны при недостаточной смазке, так как у них уменьшается вероятность возникновения заедания.

Для изготовления зубчатых колёс тихоходных, чаще всего открытых передач при спокойном режиме применяется серый чугун СЧ 18-36 и СЧ 21-40. Весьма перспективным является высокопрочный чугун марок ВЧ 45-5 и ВЧ 40-10 с шаровидным графитом [8].

Основные недостатки чугунов - малые допускаемые напряжения и низкая прочность при ударных нагрузках.

**Пластмассы.** Пластмассы (текстолит, капролон, нейлон и др.) применяют в быстроходных малонагруженных передачах, в приборах и небольших силовых установках (часто в паре с металлическими колесами).

Пластмассовые зубчатые колеса (по сравнению с металлическими) хорошо воспринимают переменные нагрузки (амортизируют удары, гасят механические вибрации) и, следовательно, обеспечивают бесшумность работы передачи, имеют более низкий износ зубьев.

На основании выполненного анализа условий эксплуатации и причин разрушений для тяжелонагруженных зубчатых колёс целесообразно применение легированных сталей. Элементы, специально вводимые в сталь в определенных концентрациях с целью изменения ее строения и свойств, называются легирующими элементами, а стали – легированными.

Основными легированными сталями являются:

1 Хромистые стали (40Х, 45Х, 50Х) относят к дешёвым конструкционным материалам. С увеличением содержания углерода возрастает прочность, но снижаются пластичность и вязкость, повышается порог хладноломкости этих сталей. Хромистые стали склонны к отпускной

хрупкости, устранение которой требует быстрого охлаждения от температуры высокого отпуска. Стали прокаливаются на глубину 15– 25 мм, их применяют для производства деталей небольшого сечения.

2 Хромокремнемарганцевые стали (30ХГСА, 35ХГСА) содержат по 1% Cr, Mn и Si и называют хромансилями. Это дешёвые стали, сочетающие хорошие технологические и механические свойства. Хромансили сваривают всеми видами сварки, хорошо штампуются, удовлетворительно обрабатываются резанием, прокаливаются в деталях сечением 30–40 мм. Их применяют в автомобилестроении (валы, сварные конструкции, детали рулевого управления).

3 Хромоникелевые стали (40ХН, 45ХН, 50ХН) обеспечивают высокий комплекс механических свойств в деталях сечением 40 – 50 мм. Из за присутствия никеля эти стали, в отличие от хромистых, имеют более высокий температурный запас вязкости и меньшую склонность к хрупкому разрушению.

4 Хромоникельмolibденовые (хромоникельвольфрамовые) стали (40ХН2МА, 38ХН3МА, 38ХН3МФА, 18Х2Н4М4) относятся к глубокопрокаливающимся сталям, предназначенным для деталей с поперечным сечением 100мм и более. Их комплексное легирование обусловлено тем, что применение чисто хромоникелевых сталей нецелесообразно, так как они имеют сильно выраженную склонность к отпускной хрупкости. Для её устранения в деталях небольшого сечения недостаточно быстрого охлаждения от температуры высокого отпуска. Поэтому хромоникелевые стали легируют молибденом (вольфрамом). Данные стали относятся к мартенситному классу, закаливаются на воздухе, обладают малой склонностью к хрупкому разрушению, хорошо работают при динамических нагрузках и в условиях пониженных температур. Недостатки этой группы сталей: высокая стоимость, пониженная обрабатываемость резанием, склонность к образованию флокенов. Они предназначены для деталей наиболее ответственного назначения (валы и роторы турбин, тяжелонагруженные детали компрессорных машин, редукторов) [9].

Выбор марок также будет определяться упрочняющей технологией.

Исходя из требований оптимальным материалом, для изготовления тяжелонагруженного зубчатого колеса, будет среднелегированная сталь с последующей закалкой ТВЧ.

Основными примерами среднелегированных сталей являются Сталь 40Х, Сталь 40 ХН, Сталь 35 ХГСА, 40ХН2МА.

**Сталь 40Х** – это конструкционная легированная сталь , содержащая от 0,36% до 0,44% углерода и хрома в интервале от 0,8% до 1,1%.

Регламентируется ГОСТом 4543-71. Эквивалентами 40Х являются Стали: 45Х, 38ХА, 40ХН, 40ХС, 40ХФ, 40ХР

Поставляется сталь 40Х в основном: сортовым прокатом, в том числе фасонным ,трубами, поковками, толстыми листами, шлифованным прутком и серебрянкой, калиброванным прутком, полосой.

По свариваемости Сталь 40Х относится к 4 группе, это означает, что её довольно трудно сварить и после сваривания существует большая вероятность образования трещин на сварном шве. Сваривается тремя видами сварки: ручной дуговой сваркой (РДС), электрошлаковой сваркой (ЭШС) и контактно точечной сваркой (КТС).

Данная марка стали флокеночувствительна то есть в процессе изготовления стальных поковок и проката, при переходе стали из жидкого состояния в твердое выделяется водород из-за чего могут возникать полости и трещины (флокены). Чтобы предотвратить образование флокенов нужно вакуумировать сталь, дабы снизить процент содержания водорода в сплаве.

Температура ковки данной марки стали – начала 1250С, конца 800С. Сечения до 350 мм охлаждаются на воздухе.

Сталь 40Х склонна к отпускной хрупкости, при отпуске в определенном диапазоне температур у стали понижается вязкость, а также сопротивляемость хрупкому разрушению. Данная сталь закаливается при температуре 860° С, затем охлаждается в масле. Отпуск же осуществляется при температуре 500° С, охлаждающей средой при отпуске могут являться масляная и водная среды.

Из высказанного можно вывести несколько полезных свойств, которые несомненно играют роль в выборе данного материала:

- высокая механическая прочность;
- устойчивость к резким перепадам температур;
- пониженная чувствительность к коррозии.

**Сталь 40ХН** – это конструкционная легированная сталь , содержащая от 0,36 % до 0,44 % углерода , хрома в интервале от 0,45 % до 0,75 % и никеля в составе 1,00 – 1,40 %. Регламентируется ГОСТом 4543-71 .

Заменой Стали40ХН могут служить Стали: 45ХН, 50ХН, 38ХГН, 40Х, 35ХГФ, 40ХНР, 40ХНМ, 30ХГВТ.

Поставляется сталь 40ХН в основном: сортовым прокатом, в том числе фасонным, трубами, поковками, толстыми листами, шлифованным прутком и серебрянкой, калиброванным прутком, полосой.

Сварочный процесс данной стали затруднён, так как Сталь 40ХН относится к 4 группе, это означает, что её довольно трудно сварить и после сваривания существует большая вероятность образования в окколошовной зоне хрупких соединений. Сваривается тремя видами сварки: ручной дуговой сваркой (РДС), электрошлаковой сваркой (ЭШС) и автоматической дуговой сваркой (АДС) под флюсом.

Данная марка стали, так же как и Сталь 40Х, является флокеночувствительной, проявляет склонность к отпускной хрупкости.

Температура ковки данной марки стали – начала 1250° С, конца 830° С. Сечения до 50 мм охлаждаются на воздухе, 50–200 мм – в мульде, 201–300 мм – с печью.

Основная область применения Стали 40ХН – изготовление деталей, которые эксплуатируются в условиях повышенной динамической нагрузки, вибрации. Это такие детали, как оси, шатуны, валы, замки (ниппели и муфты) для нефтепроводов. Изготавливают из Стали 40ХН также зубчатые колеса, шпинNELи, болты, штоки гидроцилиндров, валки прокатных станов.

**Сталь 35ХГСА** – это конструкционная легированная сталь, содержащая около 0,32 % до 0,39 % углерода, хрома в интервале от 1,1 % до 1,4 %, кремния от 1,1 % до 1,4 % , и марганца от 0,8 до 1,1 %. Регламентируется ГОСТом 4543-71.

Эквивалентами 35ХГСА являются стали: 30ХГС, 30ХГСА, 30ХГТ, 35ХМ. Поставляется данная сталь в виде сортового проката или поковок.

Данная сталь обладает ограниченной свариваемостью. В этом случае применяются следующие виды сварки : ручная – дуговая (РД), ручная – аргонодуговая сварка (РАД), автоматическая сварка под флюсом (АФ).

Так же данная марка стали флокеночувствительна, и склонна к отпускной хрупкости.

Основной областью применения данной стали является изготовление фланцев, кулачков, пальцев, корпусов, лопаток компрессорных машин, работающих при температурах до 200 ° С, валиков, рычагов, оси, валов, скоб, тормозных лент, толкателей, вилок, деталей сварных конструкций и других деталей сложной конфигурации, работающих в условиях знакопеременных нагрузок, к которым предъявляются требования высокой или повышенной прочности и износостойкости.

**Сталь 40ХН2МА** – это высококачественная конструкционная высоколегированная хромоникельмolibденовая сталь. Она содержит порядка 0.37–0.44 % С, 1.25 – 1.65 % Ni 0.15 – 0.25 % Mo. Регламентируется ГОСТом 4543-71 .

Основными заменителями данной стали могут являться такие стали, как : Сталь 40ХГТ, Сталь 40ХГР, Сталь 30Х3МФ, Сталь 45ХН2МФА.

Сталь данной марки трудносвариваема, в основном сваривается путём ручной дуговой сварки (РДС). Является флокеночувствительной, но не склонна к отпускной хрупкости, что является плюсом.

Температура ковки начала – 1220 ° С, конца – 800 ° С. Сечения до 80 мм - рекомендован отжиг с перекристаллизацией, два переохлаждения, отпуск.

Сталь 40ХН2МА применяется для изготовления цельнокатанных колец, коленчатых валов, клапанов, шатунов, крышек шатунов, ответственных болтов и других крепежных деталей, специального крепежа, шестерней, кулачковых муфт, дисков и других тяжелонагруженных деталей, для производства валков для холодной прокатки металлов, для изготовления деталей трубопроводной арматуры, деталей авиастроения (валов ротора, коленчатых валов, валов редуктора, шатунов двигателя воздушного охлаждения, ответственных болтов, шпилек, деталей винта, массивных и силовых деталей РД), работающих при температуре до +500 ° С.

Ниже представлена таблица, показывающая полный химический состав вышеперечисленных сталей.

Таблица 2. – Химический состав сталей.

Марка стали \ Химический элемент	C	Si	Mn	Ni	S	P	Cr	Mo	Cu	Fe
40Х	0,36 – 0,44	0,17 – 0,37	0,5 – 0,8	до 0,3	до 0,035	до 0,035	0,8 – 1,1	–	до 0,3	~97
40ХН	0,36 – 0,44	0,17 – 0,37	0,5 – 0,8	1 – 1,4	до 0,035	до 0,035	0,45 – 0,75	–	до 0,3	~96
35ХГСА	0,32 – 0,39	1,1 – 1,4	0,8 – 1,1	до 0,3	до 0,025	до 0,025	1,1 – 1,4	–	до 0,3	~95
40ХН2МА	0,37 – 0,44	0,17 – 0,37	0,5 – 0,8	1,25 – 1,65	до 0,025	до 0,025	0,6 – 0,9	0,15 – 0,25	до 0,3	~95

## **2 Методики исследования зубьев зубчатых колёс**

Методическая часть данной работы заключается в приготовлении образцов (микрошлифов) из зубьев тяжелонагруженного колеса, проверка их макро и микро структур, замера твёрдости и микротвёрдости термоупрочнённого слоя а так же анализ его толщины. По анализу толщины и наблюдаемой структуры можно определить правильно ли были подобраны режимы термообработки, позволяющие добиться требуемых свойств детали.

### **2.1 Методика поверхностной закалки токами высокой частоты (ТВЧ)**

Поверхностная закалка осуществлялась на индукционной установке УВГ-2-25. Данная установка предназначена для выполнения различных технологических процессов при термической обработке деталей чёрных и цветных металлов путём индукционного нагрева токами высокой частоты (рис.17).



Рисунок 17 – Индукционная установка УВГ-2-25

Установка позволяет работать на любой частоте в диапазоне частот 50...100 кГц в режиме автоподстройки частоты и дискретной регулировки

мощности, что позволяет производить оперативную смену индукторов под необходимый технологический процесс и выполнять работы широкого профиля.

## **2.2 Методика приготовления шлифов**

Шлиф изготавливают по поперечному сечению образца. Механическая зачистка проводится наждачной бумагой различной зернистости. При смене наждачной бумаги изменяют направление шлифовки на 90 ° для удаления рисок, созданных предыдущим шлифованием.

Заключительный этап обработки – механическое полирование образца до зеркального блеска. Полирование образцов проводится на ватмане с применением алмазной пасты зернистостью 20/14; 3/1.

Каждая операция проводится до полного исчезновения следов предыдущей. После полирования образцы тщательно протирают спиртом.

Качество полирования контролируется просмотром шлифа под микроскопом при увеличении в 50 раз. В случае необходимости шлиф просматривают при увеличении от 1250 до 1500 раз. Поверхность должна быть зеркальной, не иметь рисок и царапин.

## **2.3 Выявление микроструктуры образца**

Заключительный этап в приготовлении шлифа – травление. Травление основано на том, что полированная металлическая поверхность шлифа, опущенного в реактив, представляет собой участки (фазы) с различными по величине электрохимическими потенциалами. Поэтому зерна каждой фазы имеют различную травимость. Для выявления микроструктуры основного металла используется травитель, в данном случае 4-х процентный раствор азотной кислоты в спирте (таблица 3).

Условия травления: температура 18–20 ° С, время 20–30 секунд.

Таблица 3– Состав используемого реактива

Компоненты	Объём, мл
Азотная кислота	4
Спирт	96

Травление считается законченным, если поверхность шлифа становится слегка матовой. После остатки реактива смываются водой, и шлиф высушивают спиртом, прикладывая к нему лист фильтровальной бумаги.

## 2.4 Традиционный метод измерения твёрдости образца

Измерение твёрдости образца (микрошлифа) проводилось на твердомере ТК-2М – прибор настольного типа, предназначенный для измерения твердости металлов и сплавов по методу вдавливания алмазного конуса или стального закалённого шарика под действием заданной нагрузки в течении определённого времени (рис.18).



Рисунок 18 – Измерение твёрдости образца на приборе ТК-2М.

Испытания проводились в соответствии с ГОСТом 9013-59.

На приборе измерения твёрдости материала проводится по 3м шкалам:

шкале «А», «В» и «С».

*Шкала «A»* применяется в практике сравнительно редко. Испытание проводится алмазным конусом, для определения твердости изделий из твёрдых сплавов а так же для испытания изделий с поверхностной термической обработкой. При испытании неответственных деталей твёрдостью HRC 20 – 50 допускается применение наконечника из твёрдого сплава.

*Шкала «B»* используется для определения твердости мягких металлов с наибольшей твёрдостью 100 единиц, так как при более высокой твёрдости испытание шариком становится недостаточно чувствительным ввиду малой глубины проникновения шарика в металл (менее 0,06 мм).

*Шкала «C»* применяется для испытания материалов с твёрдостью не более 70 единиц, так как при большей твёрдости на конусе алмаза создаётся слишком большое давление, и он может разрушиться.

При проведении испытаний необходимо следить, что бы расстояние центра отпечатка от края образца или центра другого отпечатка при испытании на шкалах «А» и «С» было не менее 3, а по шкале «В» – не менее 4 мм.

По приведенной ниже таблице в зависимости от твёрдости образца выбирают шкалу твёрдости, нагрузку и вид наконечника.

Таблица 4 – Характеристики измерения твёрдости образца.

Применимая твёрдость металла, HV	Обозначение шкалы	Вид наконечника	Нагрузка, кгс	Обозначение твёрдости по Роквеллу	Допустимые пределы шкалы
60240	«В»	Стальной шарик	100	HRB	25100
240–900	«С»	Алмазный конус	150	HRC	20–67
390–900	«А»	Алмазный конус	60	HRA	70–85

## 2.5 Измерение микротвёрдости образца

Измерение микротвёрдости образца проводилось на микротвердомере

ПМТ-3М (рис.19). Данный прибор применяется при определении твёрдости таких объектов, которые не могут быть испытаны обычно применяемыми методами( по Бринеллю, Роквеллу, Виккерсу), а именно мелких деталей приборов, тонких полуфабрикатов (лент, фольги, проволоки), тонких слоёв, получающихся в ходе термической обработки (азотирования, цианирования и др.) и гальванических покрытий .



Рисунок 19 – Микротвердомер ПМТ – 3М и ручной пресс.

В нашем случае производился замер твёрдости поверхности – упрочнённого слоя.

## 2.6 Методика проведения макроанализа

Макроскопический анализ – изучение строения материала не вооружённым глазом или увеличением до 30ти крат.

Макроанализ проводился на приборе МБС 3 – микроскопе с увеличением от 4x до 100 крат (рис.20), работающем как при искусственном так и естественном освещении. С помощью данного прибора визуально удалось определить величину упрочнённого слоя, а так же тщательнее рассмотреть такие поверхностные дефекты как сколы, трещины, выкрашивание кромки

зуба.



Рисунок 20 – Микроскоп МБС 3

## 2.7 Методика проведения микроанализа

Микроскопический анализ заключается в исследовании структуры с помощью микроскопа и фотокамеры (рис.21).



Рисунок 21 – Микроскоп фирмы *Carl Zeiss*

Наблюдаемая структура называется микроструктурой. Анализ проводился при увеличении в 100 и 500 раз. Изображение, передаваемое цифровой фотоаппаратурой, выводится на монитор компьютера. Далее

полученное изображение можно сохранить в необходимом нам формате, например, с расширением *jpg* или *gif*.

### **3 Результаты исследования тяжелонагруженных зубчатых колёс**

#### **3.1 Анализ дефектов реальных зубчатых колёс**

Для подробного изучения причин разрушения зубчатых колёс, с целью назначения оптимально подходящего метода поверхностной термической обработки, был проведён анализ вышедших из строя реальных зубчатых колёс. В результате анализа выяснены механизмы образования очагов разрушений, а так же основные причины разрушения зубьев зубчатых колёс.

##### **3.1.1 Износ поверхности, определяемый контактной выносливостью зуба**

Для проведения анализа было представлено зубчатое колесо со значительными повреждениями основных контактных поверхностей трех зубьев зубчатого колеса в виде многочисленных глубоких язв (рис. 22).



*a*



*б*

Рисунок 22 – Общий вид зубчатого колеса после разрушения: *a* – общий вид колеса; *б* – язвы на рабочей поверхности зуба

Данный вид износа, сопровождающийся образованием питтинга на поверхностях зубьев в зубчатых колесах, относится к усталостному виду. Выкрашивание частиц (питтинги) обусловлены усталостными разрушениями, которые возникают под действием циклических нагрузок (рис. 23).



Рисунок 23 – Питтинги на поверхностях зубьев зубчатого колеса

Наличие ступенек на поверхности питтингов свидетельствуют о циклическом движении трещины, приводящей в конечном итоге к выкрашиванию.

В данном случае этот износ имеет локальный характер и наблюдается только на трех зубьях, по-видимому, это связано с наличием дефектов в этой области, возникших в результате либо metallургических либо технологических факторов.

Склонность к питтингообразованию увеличивается с увеличением количества неметаллических включений и наличием несплошностей в приповерхностной зоне. В случаях применения поверхностной обработки с целью повышения циклической долговечности в переходной зоне могут образовываться надрывы и зародыши усталостного разрушения, которые способствуют выкрашиванию.

Для проведения анализа был представлен зуб зубчатого колеса с повреждением контактной поверхности (рис. 24).

Поверхность, подвергнувшаяся повреждению, несёт на себе наличие сколов и вырывов материала. Они образовались благодаря тому, что на зуб

приходились высокие контактные нагрузки, не предназначенные для данного рода конструкции либо материала.

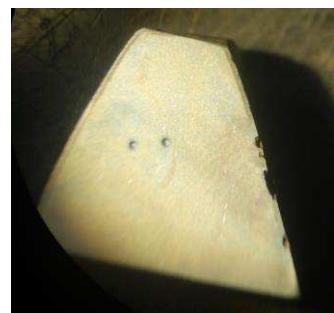


Рисунок 24 – Макрофотография повреждённого зуба

На снимке видно, что на повреждённой поверхности произошло выкрашивание материала.

Данный вид износа, сопровождающийся образованием питтинга на поверхностях зубьев в зубчатых колесах, относится к контактно-усталостному виду. Выкрашивание частиц (питтинг) обусловлены усталостными разрушениями, которые возникают под действием циклических нагрузок.

На рисунке 25 более наглядно показано место выкрашивания материала.

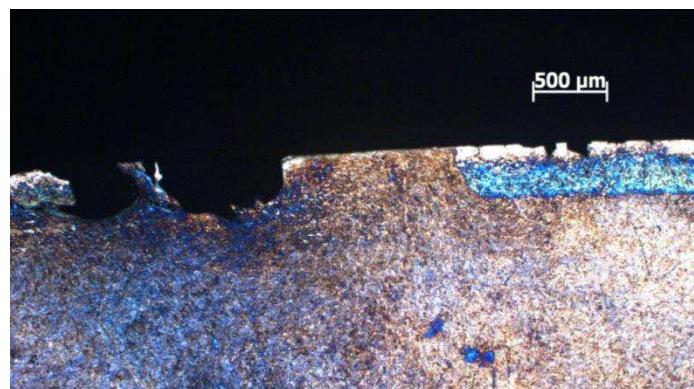


Рисунок 25 – Снимок микроструктуры зоны выкрашивания материала

В месте образования питтинга, помимо выкрашивания материала в повреждённой части так же наблюдается ещё один дефект – зарождение трещины и её дальнейшее распространение (рис. 26).

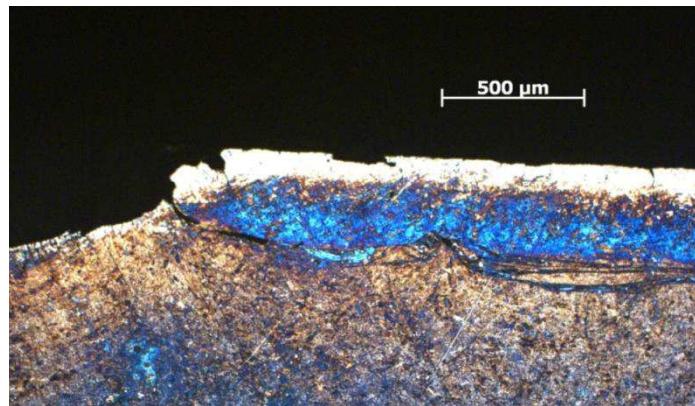


Рисунок 26 – Проникновение трещины под термоупрочнённый слой

В ходе исследования поврежденных участков были проведены замеры твёрдости материала в зонах подвергнутых и не подвергнутых термической обработке.

Замеры производились на микротвердомере ПМТ 3М, при нагрузке на приборе в 100г. После выдержки образца под нагрузкой производился расчёт диагонали отпечатка и соответствующей ему твёрдости. В таблице 5 представлены полученные результаты.

Таблица 5 – Результаты замера твёрдости образца № 1

№ п/п	Расстояние от края зуба (мкм)	Диагональ отпечатка (мкм)	Твёрдость HV (Мпа)	твёрдость HRC
1	60	19,5	4890	50
2	120	20,1	4640	48
3	180	18,9	5140	52,5
4	240	20,4	4420	47
5	300	22,5	3665	39
6	360	27,6	2460	24
7	420	28,2	2320	29,6

По первой таблице результатов замера твёрдостей был построен график зависимости микротвёрдости образца от расстояния от края зуба (рис. 27).

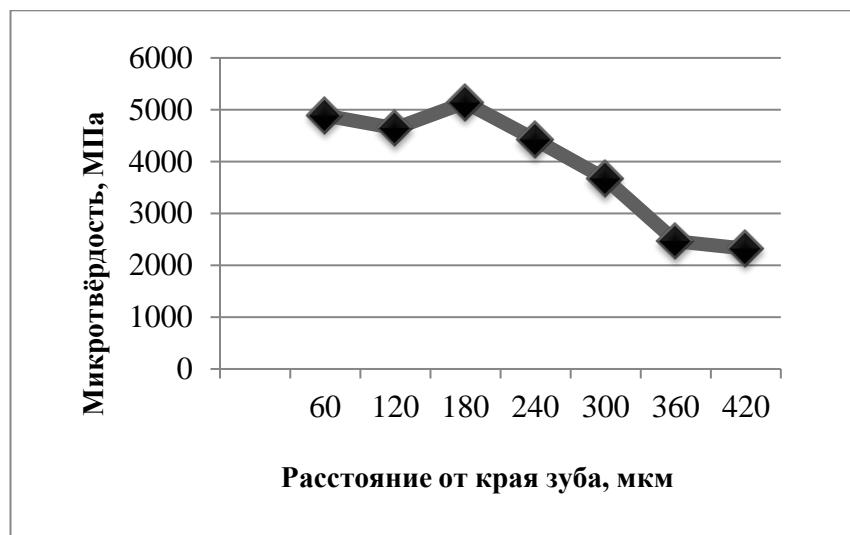


Рисунок 27 – График зависимости микротвёрдости от расстояния от края зуба

Замеры производились на расстоянии равном 60 мкм от предыдущего отпечатка.

Данный дефект может привести к трещинам и сколам упрочнённых поверхностей, образованию питтингов среди упрочнённых слоёв, и в конечном счёте разрушению зуба.

### **3.1.2 Анализ причин выхода из строя за счёт усталостного разрушения по основанию зуба**

Для проведения анализа было представлено зубчатое колесо после разрушения. Разрушение двух зубьев произошло по их основанию (рис 28). Для определения причин разрушения были проведены комплексные исследования, включающие: 1 – фрактографические исследования, 2 – определение механических свойств, 3 – исследование микроструктуры стали.



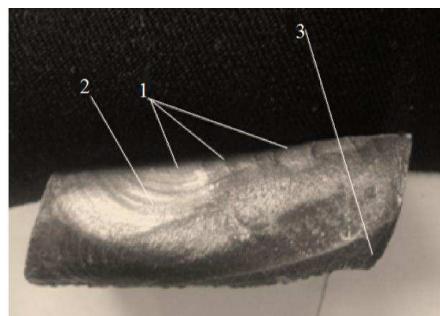
*a*



*b*

Рисунок 28 – Общий вид зубчатого колеса после разрушения: *a* – общий вид; *б* – слом зубьев.

Фрактографические исследования указывают на то, что разрушение произошло по усталостному механизму (рис. 29). Поверхность разрушения имеет 3 характерные участка, отличающиеся своим строением. Зона 1 – очаги зарождения трещины усталости, 2 – зона распространения усталостной трещины с типичным строением в виде линий остановки трещины, 3 – зона долома, имеющая небольшую протяженность.



*a*



*b*

Рисунок 29 – Поверхности разрушения основания зубьев зубчатого колеса: *a* – очаги образования трещин; *б* – ступенчатая структура поверхности разрушения

Можно отчетливо наблюдать, что разрушение обоих зубьев проходило по одинаковому механизму. Об этом свидетельствуют фрактограммы обоих зубьев, имеющих идентичный вид. Разрушение носит усталостный характер. Наблюдаются многоочаговый характер зарождения трещин усталости, на что указывают «ступеньки» на поверхности разрушения (рис. 29, *б*). Впоследствии

эти трещины слились в одну магистральную трещину усталости, которая распространилась по основанию зуба на значительное расстояние. Нагрузка, по-видимому была распределена достаточно равномерно, хотя трещина росла несколько быстрее вправо об этом свидетельствуют линии остановки трещины, имеющие серпообразный вид. Небольшая площадь поверхности окончательного разрушения (долома) зубьев (рис. 29, а) свидетельствует об относительно невысокой нагрузке, которая привела к разрушению.

Известно, что циклическая прочность и долговечность зависят от большого числа факторов, из которых большое значение имеют структура, свойства, напряженное состояние поверхностного слоя, качество поверхности и др. Отрицательное влияние на предел выносливости оказывают напряжения растяжения и концентраторы напряжений.

Исследования твердости указывают на наличие поверхностного упрочнения зубьев зубчатого колеса. Микротвердость вблизи поверхности составляет HV 642–694, что соответствует HRC 58, по мере удаления от поверхности твердость уменьшается и в сердцевине зуба она составляет HV 320–350, что соответствует HRC 35.

Упрочненную поверхность зубьев можно наблюдать на темплете после травления (рис. 30)



Рисунок 30 – Макроструктура поперечного темпleta зуба зубчатого колеса после разрушения

Упрочненная зона четко проявляется в виде темной окантовки по периметру зуба. Следует отметить, что твердость поверхности, измеренная по Роквеллу при нагрузке 150 кг имеет значения HRC 47–50, что несколько ниже величины, определенной на микротвердомере, это указывает на небольшую толщину упрочненной зоны.

Микроструктура стали, исследованная на оптическом микроскопе, находится в хорошем соответствии с показаниями твердости. Поверхностный слой имеет трооститное строение с повышенной твердостью. Сердцевина имеет достаточно дисперсное и однородное строение, которое соответствует сорбиту, обладающая повышенной прочностью и ударной вязкостью.

Очаги зарождения трещин усталости находятся в зоне действия максимальных напряжений у основания зуба. Поверхность зубчатого колеса у основания зубьев имеет большое количество дефектов в виде ямок и неровностей (рис. 31).

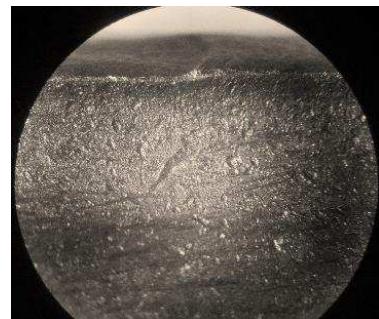


Рисунок 31 – Поверхность основания разрушенного зуба

Как отмечалось выше, циклическая долговечность во многом определяется качеством поверхности. В данном случае дефекты поверхности являются концентриаторами напряжений и могли послужить очагами зарождения трещин усталости. Об этом также свидетельствует многоочаговый характер зарождения трещин усталости.

Следует отметить большое количество дефектов на основных контактных поверхностях зубчатого колеса в виде ямок и достаточно глубоких

рисок. Это может быть следствием механической обработки, а также наличием инородных твердых включений в смазочном материале.

Выводы:

- 1 Разрушение произошло в результате усталости при изгибе за счет действия циклических нагрузок.
- 2 Зарождение усталостной трещины носит многоочаговый характер.
- 3 Очагами зарождения трещин могли послужить дефекты поверхности основания зубьев, вызванные механической обработкой, наличием каких-либо примесей и включений в смазочном материале.
- 4 Окончательное разрушение произошло под действием невысоких нагрузок.

### **3.1.3 Анализ выхода из строя зубчатого колеса, посредством пластического деформирования зубьев**

Для анализа было взято зубчатое колесо, работающее в лебедке экскаватора. По визуальному анализу шестерни видно, что на первом рисунке зубья явно деформированы (рис.32, *a*). Причиной этому является то, что на данную передачу приходились высокие контактные нагрузки. На втором же рисунке видно, что зубья фактически отсутствуют в той части колеса, на которую приходилось зацепление (рис. 32, *б*).



*a*



*б*

Рисунок 32 – Зубчатое колесо: *a* – деформированные зубья; *б* – шестерня с изношенными зубьями

Изначально было известно, что технологией поверхностной обработки зубьев являлось ионное азотирование. Величина упрочнённого слоя ,при этом, составляла 0.3 мм. При работе детали в данной передаче, работающей при значительных нагрузках это крайне не допустимо. При работе контактное напряжение ,возникающее в зоне зацепления превосходили предел текучести материала, лежащего под упрочнённой зоной. Поскольку толщина упрочнённого слоя не большая это первоначально привело к продавливанию слоя, его разрушению и дальнейшей пластической деформацией, которая выразилась в полном разрушении зубьев.

Очевидно, что причиной разрушения является неправильное назначение поверхностного упрочнения рабочей поверхности зубьев.

Исходя из анализа всех вышеперечисленных видов разрушений, было выяснено, что основными причинами выхода из строя зубчатых колёс являются:

- образование питтингов на контактных поверхностях зубьев;
- разрушение за счёт усталостного износа у основания зуба;
- пластическая деформация зубьев, приведшая к их катастрофическому износу.

Для обеспечения эксплуатационных требований, предъявляемых к тяжелонагруженному зубчатому колесу, необходимо обеспечить высокий уровень прочностных свойств, как венца, так и поверхности зубьев. Для этого необходим упрочненный слой, составляющий несколько мм. В этом случае наиболее целесообразно применение закалки ТВЧ.

### **3.2. Основные сведения о поверхностной индукционной закалке**

#### **3.2.1 Общие сведения об индукционной закалке**

Основоположником метода индукционной термической обработки и промышленного использования токов высокой частоты для нагрева металла является профессор В.П. Вологдин, который разработал теорию индукционного нагрева и создал первые промышленные установки. Ему принадлежит мировой приоритет в этой области [14].

Экономическая целесообразность индукционной поверхностной закалки почти никогда не подвергалась сомнению. Большая скорость нагрева, легкость автоматизации и дозирования его, малые габариты нагревательных устройств позволяют легко встраивать их в линии непрерывных прокатных станов и других автоматизированных агрегатов. Эти технологические особенности позволили не только успешно применять индукционный нагрев вместо печного, но также дали возможность создать некоторые новые технологические процессы, например, разрыв труб на мерные длины в турбоэлектросварочных станах, которые вообще невозможно осуществить при других способах нагрева [15].

Одним из первых методов высокочастотной термической обработки была поверхностная закалка, которая полностью сохранила свое ведущее положение до настоящего времени. Высокочастотная поверхностная закалка применяется в промышленности для получения изделий с твердым износостойчивым поверхностным слоем и сравнительно мягкой и вязкой сердцевиной.

Сердечник может иметь структуру, полученную путем отжига, нормализации или закалки с высоким отпуском. Это часто приводит к возможности замены углеродистыми сталью марок 40 и 45 обычно применяемых в таких случаях легированных сталей: хромистой или даже хромоникелевой.

На практике твердость цементованного слоя чаще всего находится в пределах 58–62 HRC. При поверхностной закалке наиболее часто применяемых марок сталей 40 и 45 также возможно получение твердости 58–62 HRC. Однако колебания в составе стали, в режимах закалки, а также необходимость самоотпуска или отпуска для борьбы с трещинами приводят к тому, что нижняя

допустимая граница твердости в практике заводов снижается до 50 HRC, для стали 40 и до 54 HRC для стали 45.

Таким образом, твердость поверхностного слоя при поверхностной закалке среднеуглеродистой стали получается, как правило, ниже, чем при цементации. Поэтому в тех случаях, когда деталь работает в тяжелых условиях контактной прочности, применяют сталь с повышенным содержанием углерода (У7, 65Г и т. п.), что создает определенные трудности при закалке изделий сложной формы и неизбежно снижает вязкость незакаленной сердцевины.

Однако слой, полученный путем высокочастотной закалки, менее хрупок, чем цементированный или азотированный слой. Недостатком высокочастотной поверхностной закалки по сравнению с цементацией является трудность, а в отдельных случаях даже невозможность получения равномерного слоя закалки по контуру сложных деталей [16].

**Основы индукционного нагрева.** При прохождении по проводнику переменного тока около него создается переменное электромагнитное поле. В куске металла, помещенном в это поле, индуцируются токи, частота которых совпадает с частотой первичного тока (рис. 33). Прохождение индуцированного электрического тока вызывает нагрев металла. Нагрев металла описанным способом называется индукционным, а проводник, по которому пропускается электрический ток, индуцирующим проводом

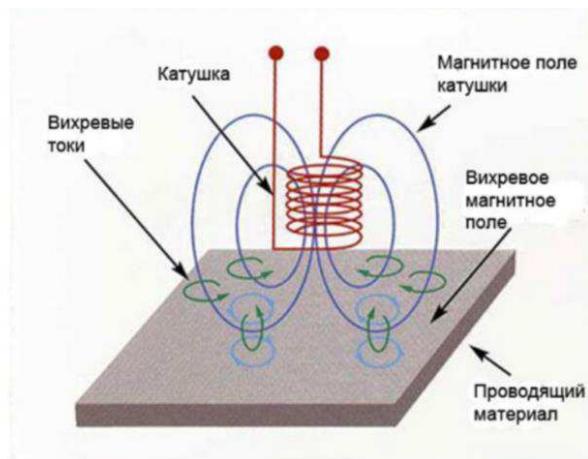


Рисунок 33 – Схема образования магнитного поля при индукционной закалке

Индуктирующий провод может быть изготовлен из любого хорошо проводящего материала и ему может быть придана любая форма. Его делают из прямоугольных медных трубок в виде цилиндрических спиралей [15].

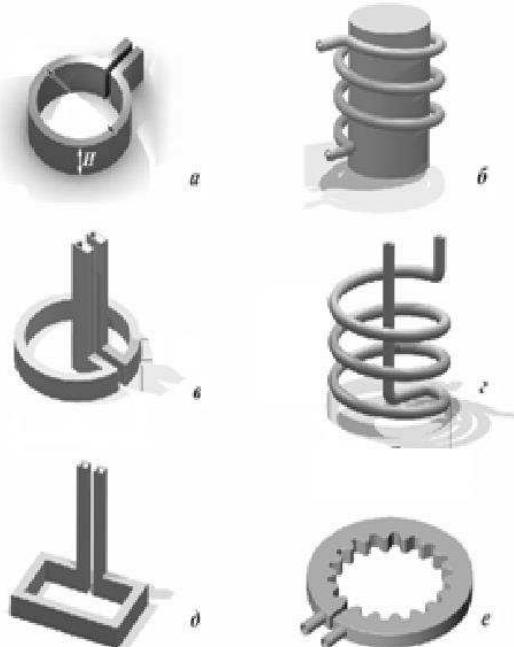


Рисунок 34 – Индукторы для нагрева ТВЧ:

*a, в - одновитковые индукторы ля нагрева наружных и внутренних поверхностей цилиндрических деталей; б, г – многовитковые индукторы для нагрева наружных и внутренних поверхностей цилиндрических деталей; д – петлевой индуктор для нагрева плоских поверхностей; е – индуктор фасонной формы для нагрева шестерен*

**Кольцевой эффект.** Известно, что если проводник свернуть в кольцо или спираль и пропустить через него переменный ток, то наибольшая его плотность будет на внутренней спирали проводника. Это явление, называемое кольцевым эффектом, тем более ярко выражено, чем больше по отношению к диаметру кольца радиальная высота проводника и чем ярче поверхностный эффект.

Кольцевой эффект, являющийся также разновидностью поверхностного эффекта, объясняется асимметрией магнитного поля витка или соленоида. Во

внутренней полости (рис.35) оно значительно сильнее, чем снаружи, вследствие чего главная часть электромагнитной энергии поступает в проводник изнутри.

Кольцевой эффект ухудшает использование сечения проводников, повышая их активное сопротивление.

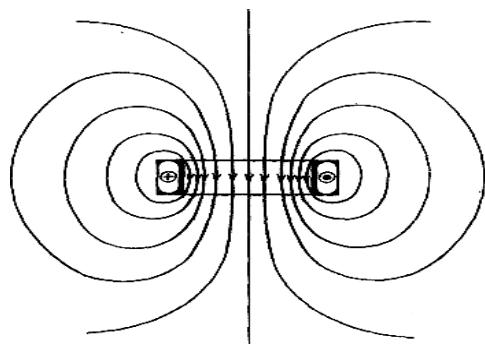


Рисунок 35 – Магнитное поле пустого индуктора

При расчете сопротивления цилиндрических и овальных индукторов, внутрь которых помещена нагреваемая деталь, можно принимать, что ток сконцентрирован лишь на внутренней стороне провода. Усиление магнитного поля внутри индуктора в соединении эффектом близости повышает эффективность нагрева деталей, охваченных индуктором. В этом случае кольцевой эффект полезен, несмотря на увеличение активного сопротивления индуцирующего провода. Однако он затрудняет нагрев внутренних поверхностей, действуя противоположно эффекту близости и уменьшая напряженность магнитного поля у нагреваемой поверхности [17].

**Распределение плотности тока в индуцирующем проводе и нагреваемой детали.** На рисунке 36 приведена картина магнитного поля индуктора, внутрь которого помещен металлический цилиндр.

Ток в индукторе вследствие кольцевого эффекта и эффекта близости сосредоточен на его внутренней поверхности, в большей ее части с почти равномерной плотностью, которая несколько увеличивается к углам провода. Это объясняется тем, что нити тока, лежащие на углах провода, охвачены меньшим магнитным потоком, чем находящиеся в средней части, и в этих нитях индуцируется меньшая противо – Э.д.с., чем в нитях, расположенных в средней части провода.

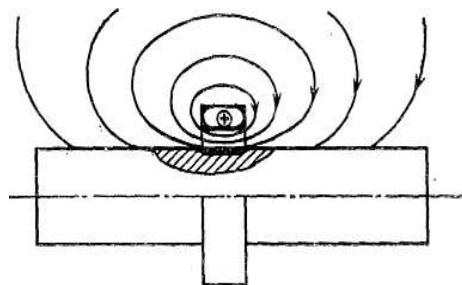


Рисунок 36 – Магнитное поле индуктора, внутрь которого помещена нагреваемая деталь

Наоборот, в цилиндре ток протекает именно под воздействием Э.д.с., наведенной в цилиндре. Эта Э.д.с. тем больше, чем больше магнитный поток, связанный рассматриваемой кольцевой нитью тока. Из картины поля видно, что с наибольшим магнитным потоком связаны нити тока, расположенные в средней плоскости индуктора, где и наблюдается максимальный настил (поверхностная плотность) тока. За пределами индуктирующего провода, индуцированный ток быстро спадает.

Таким образом, ток, индуцированный в цилиндре, сосредоточен в полосе, ширина которой мало отличается от ширины индуктора. Обычно считается, что ширина этой полосы, для кратности называемой активной, приблизительно равна ширине индуктора [17].

**Закономерности нагрева.** Особенностью высокочастотного индукционного нагрева металлов является генерирование тепловой энергии непосредственно в нагреваемом изделии. Такой нагрев определяет характер изменения температуры поверхности и распределение температуры по сечению нагреваемого объекта.

При правильном сочетании размеров изделия и частоты применяемого тока можно индукционным методом достичь очень большой скорости нарастания температуры. В частности, при поверхностной закалке применяют режимы, обеспечивающие нагрев до температуры закалки за время от нескольких секунд до десятых долей секунды [16].

Для индукционного нагрева изделие устанавливают в индуктор (соленоид), представляющий собой один или несколько витков пустотелой водоохлаждаемой медной трубы или шины (рисунок 37, а). Переменный ток, протекая через индуктор, создает переменное магнитное поле. В результате явления индукции в поверхностном слое возникают вихревые токи, и в слое обрабатываемого изделия происходит выделение джоулевой теплоты. Плотность индуктивного переменного тока по сечению проводника (нагреваемого изделия) неодинакова. Ток проходит в основном в поверхностном слое проводника. Это явление называется поверхностным эффектом. Около 90 % теплоты выделяется в слое толщиной  $x$ , которая находится в следующей зависимости от частоты тока  $f$ , магнитной проницаемости  $\mu$  и электрического сопротивления  $\rho$  нагреваемого металла:

$$x = 4.46 * 10^5 \sqrt{\rho(\mu(f))} \quad (2)$$

где  $x$  – толщина слоя:

$f$  – частота тока.

$\mu$  – магнитная проницаемость:

$\rho$  – электрическое сопротивление нагреваемого металла.

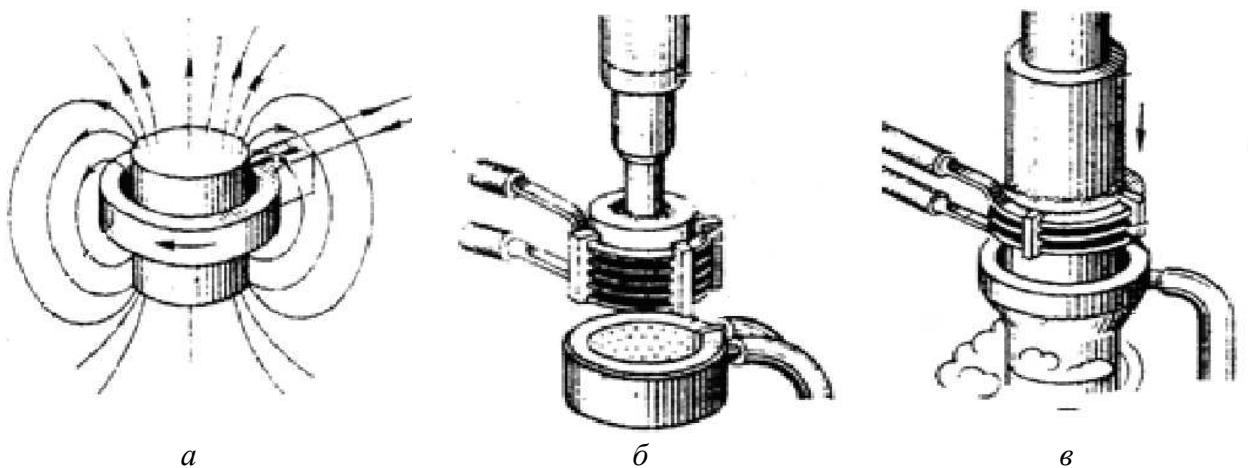


Рисунок 37 – Индукционный нагрев: *а* – схема индукционного нагрева; *б* – закалка при одновременном нагреве всей обрабатываемой поверхности; *в* – при непрерывно-последовательном нагреве

Для закалки при поверхностном нагреве применяют сравнительно большую удельную мощность ( $0,1\text{--}2,0 \text{ кВ/см}^2$ ), поэтому время нагрева неизначительно (2–50 с).

Для получения слоя толщиной 1 мм оптимальная частота тока составляет 50–60 кГц, для слоя толщиной 2 мм – 15 кГц и для слоя толщиной 4 мм ~ 4 кГц.

Глубина закалки примерно равна глубине нагрева до температуры выше критической точки  $A_3$ , глубинные слои детали нагреваются ниже температур критических точек и при охлаждении не упрочняются. При необходимости повышения прочности сердцевины перед поверхностной закалкой деталь подвергают нормализации.

Обычно считают, что площадь сечения закаленного слоя должна быть не более 20 % всего сечения. Для зубчатых колес толщина слоя составляет 0,20–0,28 от их модуля.

При больших скоростях нагрева (50–350 ° С/с) превращение перлита в аустенит сдвигается в область высоких температур, поэтому температура закалки при индукционном нагреве выше, чем при нагреве в печах, где скорость нагрева не превышает 1.5–3.0° С/с. Чем больше скорость нагрева в области фазовых превращений, тем выше должна быть температура для достаточно

полной аустенитизации и получения при охлаждении нормальной структуры (мелкокристаллический мартенсит) и максимальной твердости.

Например, при печном нагреве стали с  $0.4^{\circ}\text{C}/\text{s}$  температура закалки  $840-860^{\circ}\text{C}$ , при индукционном нагреве со скоростью  $250^{\circ}\text{C}/\text{s} - 880-920^{\circ}\text{C}$ , а со скоростью  $500^{\circ}\text{C}/\text{s} - 980-1020^{\circ}\text{C}$ .

Охлаждающую жидкость (воду, водные растворы полимеров) для закалки обычно подают через душевое устройство (спрейер).

Существуют следующие способы закалки с индукционным нагревом:

– одновременный нагрев и охлаждение всей поверхности; применяют для изделий имеющих небольшую упрочняемую поверхность (пальцы, валики, осевые инструменты);

– последовательный нагрев и охлаждение отдельных участков; используют при закалке шеек коленчатых валов (последовательный нагрев и закалка одной шейки за другой), зубчатых колес с модулем более 6 (закалка "зуб за зубом"), кулачков распределительных валов и т. д.;

– непрерывно-последовательный нагрев и охлаждение; применяют для закалки длинных валов, осей и т. д.; при этом методе изделие перемещается относительно неподвижных индуктора и охлаждающего устройства (спрейера) или наоборот. По сравнению с первым методом не требуется большой установочной мощности генератора.

После закалки с индукционным нагревом изделия подвергают низкому отпуску при  $160-200^{\circ}\text{C}$ , нередко и самоотпуску. В этом случае при закалке охлаждение проводят не до конца, и в детали сохраняется некоторое количество теплоты, нагревающей закаленный слой до температур отпуска [18].

**Самоотпуск при поверхностной индукционной закалке и его влияние на свойства стали.** После закалки стали обычно осуществляют операцию отпуска, в результате которого снижается хрупкость и увеличивается вязкость закаленной стали; сталь предохраняется от образования трещин при закалке, что является результатом главным образом увеличения при отпуске хрупкой

прочности; размеры закаленных деталей стабилизируются, так как отпуск останавливает процесс самопроизвольного распада мартенсита, ведущего к изменению размеров и короблению деталей: для остановки самопроизвольного распада мартенсита обычно достаточно проведение низкотемпературного отпуска при температурах равных 120–150 ° С.

Необходимо обратить внимание на то, что низкий отпуск поверхностно закаленной стали существенно влияет на ее прочность.

При поверхностной закалке после высокочастотного нагрева все элементы, определяющие выбранный режим (скорость и длительность нагрева, его температура, интенсивность и длительность охлаждения при закалке), могут быть автоматизированы и с достаточной точностью дозированы. Поэтому при данной технологии закалки имеются все условия для получения хорошей повторяемости результатов самоотпуска. Этому способствует то, что при индукционном нагреве значительная часть тепла, поглощаемого деталью, в процессе нагрева локализуется за пределами слоя закалки в сердцевине детали.

Применение самоотпуска при поверхностной закалке позволяет получить следующие преимущества: 1) закалка без отпуска в печи и создание оптимальных условий для выполнения термической обработки в едином технологическом потоке с полной автоматизацией процесса; 2) отсутствие закалочных трещин на обрабатываемых деталях [19].

**Основные методы закалки зубчатых колёс.** В основном закалка ТВЧ проводится двумя методами:

- со сквозным нагревом зубьев;
- с нагревом только контактных поверхностей зуба (закалка по зубу) или с одновременным нагревом контактных поверхностей и впадины (закалка по впадине).

При закалке со сквозным нагревом зубьев зубчатых колес из сталей, например 45, 40Х, в индукторе нагреваются (до 850–870 ° С), а затем

охлаждаются (водяным душем или погружением зубчатого колеса в масло) сразу все зубья зубчатого колеса (рис. 38).



Рисунок 38 – Сквозной нагрев венца зубчатого колеса

Зубья прокаливаются насквозь. На некоторую глубину (до 5 мм) закаливается также и обод зубчатого колеса. После закалки осуществляют низкий отпуск; твердость поверхности зуба HRC 58–60, а сердцевины – HRC 45–55. Этот метод применяют при закалке зубчатых колес, слабо нагруженных и малого модуля (до 4 мм), так как весь зуб имеет высокую твердость и возможны его поломки в процессе эксплуатации. Зубчатые колеса с модулем более 4 мм закаливать этим способом нецелесообразно.

Крупногабаритные зубчатые колеса закаливают методом по зубу или по впадине. Недостаток метода закалки – по зубу – снижение усталостной прочности зуба. Причина этого недостатка – концентрация напряжений на границе закаленного слоя и поверхности зуба.

Для высокочастотной закалки крупногабаритных зубчатых колес с модулем 10–50 мм, диаметром начальной окружности 2000–5000 мм, числом зубьев 40–500, шириной венца до 1000 мм, массой до 15 000 кг применяется установка, которая состоит из двух закалочных станков и механизированной тележки. Зубчатое колесо устанавливают на механизированную тележку в механическом цехе и транспортируют на закалочный участок. Закалку проводят с противоположных сторон, одновременно двумя закалочными

станками. По окончании закалки всех зубьев закаленное зубчатое колесо вывозят на той же тележке. Применяя различные индукторы, можно проводить закалку по впадине одновременным способом (зубчатых колес с модулем 10–16 мм при длине зуба не свыше 200 мм) и непрерывно-последовательным способом (зубчатых колес с модулем 16 мм и выше).

При закалке по впадине одновременным способом индуктор вводят между зубьев с зазором между индуктором и нагреваемой поверхностью 2–2,5 мм. При этом нагреваются впадина и обе поверхности по всей длине зуба (рис. 39).

Спрейеры подстуживания непрерывно охлаждают наружные поверхности нагреваемых зубьев во избежание отпуска ранее закаленных поверхностей. По окончании нагрева, продолжающегося несколько секунд, индуктор выводят из впадины, и после паузы (для выравнивания температуры) из закалочных спрейеров нагретая поверхность охлаждается водой в течение времени, обеспечивающего закалку с самоотпуском. По окончании закалки зубчатое колесо поворачивают на один зуб, индуктор вводят в очередную впадину между зубьями и процесс повторяют.



Рисунок 39 – Закалка зубчатого колеса «по впадине»

Иногда при закалке крупномодульных зубчатых колес на некоторых зубьях на стороне, противоположной предшествующей закалке, из-за возникновения тепловых и структурных напряжений появляются трещины. Чтобы избежать появления трещин, целесообразно применять способ закалки

по впадине через зуб, заключающийся в следующем. Сначала проводят первую индукционную закалку по впадине через зуб. После первой закалки зубчатое колесо подвергают отпуску при  $180\text{--}200$  ° С. После отпуска закаливают необработанные стороны зубьев, а затем вновь проводят низкий отпуск. При таком способе трещины на поверхности зубьев не возникают.

Шестерни, закалённые одновременным способом по впадине, по сравнению с закалёнными по зубу имеют повышенную усталостную прочность и не нуждаются в дополнительной операции упрочнения впадин наклёпом [20].

### 3.3 Индукционная закалка модели зубчатого венца

Изучив основы индукционного нагрева, был произведен эксперимент, с целью выбора оптимальной технологии упрочнения и назначения подходящих режимов закалки токами высокой частоты.

Эксперимент проводился на установке УВГ-2-25, состоящей из генератора (рис.40 *а*), согласующегося контура (рис.40 *в*) и системы охлаждения (рис.40 *б*).



Рисунок 40 – Индукционная установка УВГ-2-25

Так как наши лабораторные условия не позволяли нам изготовить настоящее зубчатое колесо, то была сделана модель венца зубчатого колеса.

Модель, представленная на рисунке 41 изготавливалась из Стали 40ХН, на которой были нарезаны зубья для моделирования венца зубчатого колеса .

До того, как провести поверхностную закалку ТВЧ, заготовка была подвержена объёмной закалке, при температурах около  $820^{\circ}\text{C}$ , с последующим охлаждением в масло.



Рисунок 41 – Модель венца зубчатого колеса

После закалки заготовка подверглась высокому отпуску при температурах порядка  $500^{\circ}\text{C}$ .

Данная процедура было проведена для того, что бы по сечению всей модели получить сорбитную структуру (рис. 42).

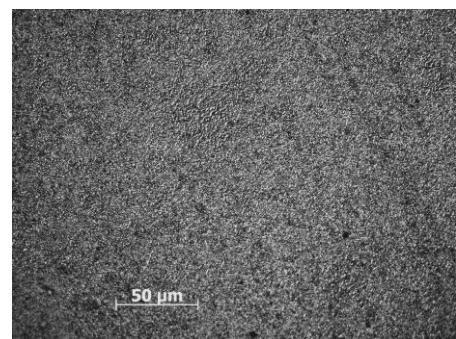


Рисунок 42 – Сорбитная структура модели

Закалка проводилась при частоте тока равной 60 кГц, в многовитковом индукторе, имеющем квадратную форму (рис. 43).



Рисунок 43 – Медный многовитковый индуктор

Зазор между индуктором и деталью составлял около 5ти мм, а время выдержки первого эксперимента составляло 4 секунды.

Эксперимент проводился следующим образом: взятая в щипцы заготовка помещалась в индуктор, после чего включалось напряжение (рис. 44). Далее производилась выдержка заготовки в течение 4х секунд, после чего осуществлялась закалка в воду. Важной особенностью этого этапа являлся быстрый перенос нагретой заготовки в емкость с водой, с дальнейшим интенсивным движением по определенной схеме для снятия паровой рубашки с поверхностного слоя заготовки, которая препятствовала её полноценному охлаждению.



Рисунок 44 – Закалка модели венца колеса

После проведенного эксперимента были проведён микроанализ структуры (рис. 45) , с последующим замером твёрдостей упрочнённого слоя.

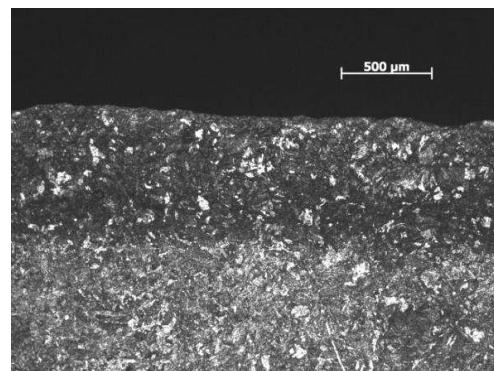


Рисунок 45 – Микроснимок структуры с выдержкой в 4 секунды

На снимке видно, что глубина закалённого слоя составляет около 1 мм.

Ниже приведена таблица замера твёрдостей после 1го эксперимента.

Таблица 6 – показания замеров твёрдостей

№ п/п	Расстояние от края зуба (мкм)	Диагональ отпечатка (мкм)	Твёрдость HV (Мпа)	Твёрдость HRC
1	140	19	5160	52.5
2	280	19,6	4810	50
3	420	20,5	4430	47
4	560	20	4550	48
5	700	20,6	4320	46
6	840	20,2	4490	47.5
7	980	21	4210	45
8	1120	23,5	3270	35
9	1260	24,4	3110	32.5

По таблице был построен график, представленный на рисунке 46

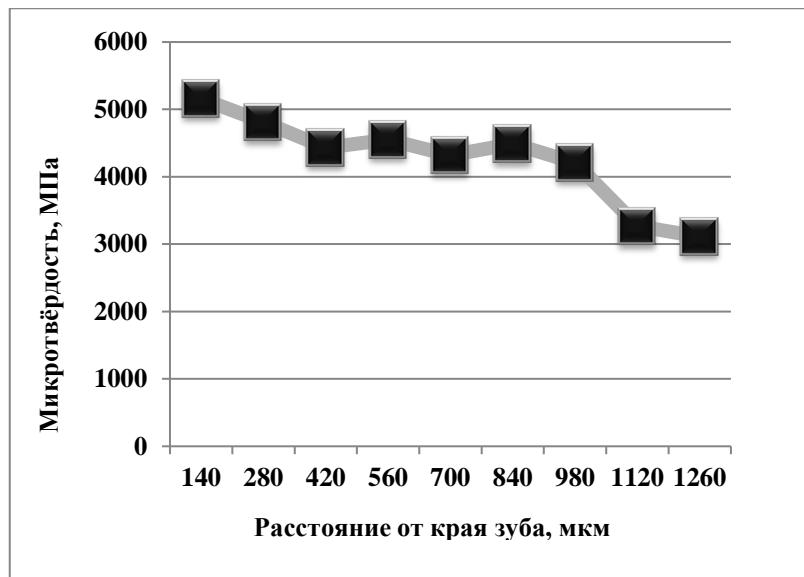


Рисунок 46 – Зависимость микротвёрдости от расстояния от края зуба, с выдержкой в 4 секунды

Данный упрочнённый слой показывает нам, что его глубина не достаточна, и поэтому было предложено провести 2й эксперимент, на котором время выдержки составляло уже 6 секунд.

Эксперимент проводился с теми же параметрами, что и первый. После чего так же был проведён микроанализ полученной структуры (рис. 47).

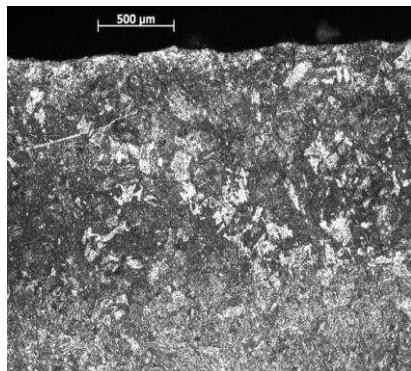


Рисунок 47 – Микроснимок структуры с выдержкой в 6 секунд

Были проведены замеры микротвёрдости заготовки, представленные в таблице 7

Таблица 7 – Показания замеров твёрдостей

№ п/п	Расстояние от края зуба (мкм)	Диагональ отпечатка (мкм)	Твёрдость HV (Мпа)	Твёрдость HRC
1	160	19	5160	52,5
2	320	18,8	5210	53
3	480	20,3	4740	47,5
4	640	19,6	4810	50
5	800	19,8	4960	51
6	960	20	4680	49
7	1120	20,4	4550	48
8	1280	20,7	4380	46,5
10	1440	20	4600	48,7
11	1600	21	4210	45
12	1760	20,8	4320	46
13	1920	24	3270	35
14	2080	24,7	3060	32,5
15	2240	24,3	3110	33

Так же был построен график зависимости твёрдости от расстояния от края зуба, представленный на рисунке 48



Рисунок 48– Зависимость микротвёрдости от расстояния от края зуба, с выдержкой в 6 секунд

Судя по микроструктуре, глубина закалённого слоя на втором эксперименте составляет порядка 2х мм. Так как этого закалённого слоя вполне достаточно для детали, использующейся в тяжелонагруженных передачах, то можно сделать вывод о том, что подбираемый нами режим закалки ТВЧ, а в частности время, выбран верно.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основании проведенного анализа условий эксплуатации изделия, мною был проведен выбор материала и технологии получения изделия. Так же был проведен анализ причин разрушения зубчатых колёс, и на основании его разработана рекомендация по выбору материала и технологии упрочнения зубчатых колёс, с целью получения оптимального сочетания заданных эксплуатационных характеристик. Изучена кинетика индукционного нагрева зубчатых колёс с целью разработки оптимальной технологии упрочнения.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ

- 1 Справочник конструктора-машиностроителя: в 3-х т.: Т. 2. – 8-е изд., перераб. И доп. Под ред. И.Н. Жестковой. – М.: Машиностроение, 2001. – 912с.:ил.
- 2 Толстоногов А.А. Детали машин и основы конструирования: Конспект лекций. – Самара, СамГАПС, 2003.– 100с.
- 3 Иванов М.Н. Детали машин. Учебник для вузов. Изд. 3-е, доп. И перераб. М., «Высш. Школа», 1976.
- 4 Производство зубчатых колёс: Справочник /С.Н. Калашников, А. С. Калашников, Г. И. Коган и др.; Под общ. Ред. Б. А. Тайца. – 3-е изд., перераб. и дополн. – М.: Машиностроение, 1990. – 464.: ил.
- 5 Егоров М.Е. и др. Технология машиностроения Учебник для втузов. Изд. 2-е, доп. М., «Высшая школа» ,1976.
- 6 Типовые технологические процессы изготовления деталей машин : учебное пособие / А.Г. Ткачев, И.Н. Шубин. – 2-е изд., стер. – Тамбов : Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 2007. – 112 с. – 100 экз.
- 7 Технология машиностроения : в 2 кн. Кн. 2. Производство деталей машин: Учеб. пособ. Для вузов/Э.Л. Жуков, И.И. Козарь, С.Л. Мурашкин и др; Под ред. С.Л. Мурашкина.– М.: Высш. шк., 2003.– 295 с.: ил.
- 8 Зубчатые передачи: Справочник/ Е.Г. Гинзбург, Н.Ф. Голованов, Н.Б. Фирун, Н.Т. Халебский; Под общ. Ред. Е.Г. Гинзбурга. – 2-е изд., перераб. и доп. – Л.: Машиностроение. Ленингр. отд-ние, 1980. – 416с., ил.
- 9 Материаловедение: Учебник для вузов / Б.Н. Арзамасов, В.И. Макарова, Г.Г. Мухин и др.; Под общ. Ред. Б.Н. Арзамасова, Г.Г. Мухина. – 7-е изд., стереотип. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э Баумана, 2005. – 648с.: ил.
- 10 Технология и оборудование обработки материалов: в 3 ч. Ч.2. Теория и технология термической обработки металлов и сплавов: учеб. пособие/ Ф.М. Носков, Е.А. Астафьева. – Красноярск : ИПК СФУ, 2011. – 126с.

- 11 Выбор материалов и технологий в машиностроении : Учеб. Пособие / А.М. Токмин, В.И. Темных, Л.А. Свечникова. М.: ИНФРА – М; Красноярск: Сиб. Федер. Ун-т, 2013. – 235 с. – (Высшее образование: Бакалавриат).
- 12 Инструментальные стали. 5-е изд. Геллер Ю.А. М.: Металлургия, 1983. 527с.
- 13 Гуляев А.П. Металловедение. Учебник для вузов. 6-е изд., перераб. и доп. М.: Металлургия, 1986. 544с.
- 14 Индукционная закалка сталей: учебное пособие / Ю.Д. Корягин, В.И.Филатов. – Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2006. – 52 с.
- 15 Богданов В. Н. Применение сквозного индукционного нагрева в промышленности / В. Н Богданов, С. Е Рыскин. – М.: Машиностроение, 1965.
- 16 Головин Г. Ф. Высокочастотная термическая обработка / Г.Ф. Головин, М. М. Замятнин. – Ленинград: Машиностроение, 1990. –239 с.
- 17 Слухоцкий А. Е. Индукторы для индукционного нагрева / А. Е. Слухоцкий, С. Е. Рыскин – Ленинград: Энергия, 1974 – 264 с.
- 18 Рукосуев А. П. Материаловедение / А. П. Рукосуев – КГТУ. – Красноярск, 2001. – 439 с.
- 19 Шепеляковский К. З. Упрочнение деталей машин поверхностной закалкой при индукционном нагреве / К. З. Шепеляковский – М.: Машиностроение, 1972. – 288 с.
- 20 Поверхностная закалка индукционным способом .– Л.: Машиностроение. Ленингр. отд-ние, 1979. – 80 с, ил.

Федеральное государственное автономное  
образовательное учреждение  
высшего образования  
«СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Политехнический институт  
Кафедра Материаловедение и технологии обработки материалов

УТВЕРЖДАЮ  
Заведующий кафедрой  
В.И. Темных  
(подпись)  
« \_\_\_\_ » 2017 г.

**БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА**

**Направление 22.03.01 Материаловедение и технологии материалов  
Профиль 22.03.01.07 Материаловедение и технологии материалов  
в машиностроении**

**Материалы, технология изготовления и поверхностная закалка  
тяжелонагруженных зубчатых колёс**

Научный руководитель

*Токмин 16.06.17*  
(подпись, дата)

А.М. Токмин

Выпускник

*Шестернев 27.06.17*  
(подпись, дата)

П.Н. Шестернев

Нормоконтролер

*Свечникова 27.06.17*  
(подпись, дата)

Л.А. Свечникова

Красноярск 2017